

EFFETS DES HÉTÉROGÉNÉITÉS DU SOL SUR SES RÉPONSES SISMQUES EN CHAMP LIBRE

SOIL HETEROGENEITIES EFFECTS ON ITS FREE-FIELD SEISMIC RESPONSES

Réception : 04/05/2019

Acceptation : 16/06/2019

Publication : 30/06/2019

MESSAOUDI Akila¹, MEZOUAR Nourredine², HADID Mohamed³, LAOUAMI Nasser⁴

¹Laboratoire des Travaux Publics Ingénierie de Transport et Environnement (TPiTE), École Nationale Supérieure des Travaux Publics (ENSTP), 01 Rue Sidi Garidi, Kouba, 16051, Alger, Algeria
messa_aki@yahoo.fr

²Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS), 01 Rue Kaddour Rahim, BP252, Hussein Dey, Alger, Algeria.
nmezouar@cgs-dz.org

³Laboratoire des Travaux Publics Ingénierie de Transport et Environnement (TPiTE), École Nationale Supérieure des Travaux Publics (ENSTP), 01 Rue Sidi Garidi, Kouba, 16051, Alger, Algeria
hadid_mohamed2003@yahoo.fr

⁴Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS), 01 Rue Kaddour Rahim, BP252, Hussein Dey, Alger, Algeria.
nlaouami@cgs-dz.org

Résumé - La prise en compte de la variabilité spatiale des caractéristiques mécaniques du sol est une donnée incontournable à intégrer dans les méthodes actuelles de calcul en Dynamique des Sols. Les méthodes usuelles, basées sur des approches déterministes utilisant des modèles de sols homogènes, aussi sophistiquées soient-elles ne permettent pas d'expliquer ou de prédire, entre autres, le mouvement différentiel de la structure soumise au séisme, ou le problème du dévers des structures importantes et massives, dans le cas statique. L'aléa naturel du sol lié, d'une part à l'hétérogénéité de ses constituants, et d'autre part au niveau de la sédimentation des couches, augmente la complexité de la modélisation de l'action sismique à la base de la structure. Une approche probabiliste permet cependant d'intégrer de manière quantitative les incertitudes et les dispersions associées aux propriétés du sol. Ces dernières varient aléatoirement dans l'espace et dans le temps pour constituer un champ aléatoire. L'objectif de cet article est l'analyse de la propagation de l'onde sismique dans un milieu aléatoire (sol hétérogène). Deux types d'hétérogénéité sont considérés : (1) une hétérogénéité quelconque due à la distribution aléatoire du module de cisaillement dans un profil de sol ; (2) une hétérogénéité des interfaces d'un multicouche de sol, traduite par des couches de sol ayant des épaisseurs aléatoires. Des modèles de sols hétérogènes sont générés par la simulation de Monté Carlo. La variation spatiale du module de cisaillement est contrôlée par les trois paramètres suivants : (1) la fonction d'inter-corrélation ; (2) la distance de corrélation ; (3) l'écart-type autour de la moyenne.

Ces sols hétérogènes sont simulés puis intégrés dans le programme de calcul universel par éléments finis 'FLUSH', sous une propagation d'onde incidente verticale de type SH. Les réponses des modèles de sol homogènes (monocouche et multicouche) sont données par le calcul (1D) de la colonne de sol. Les réponses des sols hétérogènes (quelconque et à interfaces aléatoires) à différents points du sol « en champ libre » sont données par des modèles bidimensionnelles (2D) de maillage en éléments finis quadratiques, avec des frontières absorbantes latérales. Dans ce contexte, le champ libre représente et suppose un sol sans aucune structure (bâtiment, ouvrage d'art ou autres).

Les résultats ont montré l'importance de la prise en considération des hétérogénéités dans les modèles de calcul en Dynamique des Sols. L'hétérogénéité quelconque du sol fournit des amplifications moins importantes accompagnées d'un effet de filtrage vers les basses fréquences, comparées à celles correspondantes à la couche homogène. Le modèle avec interfaces aléatoires fournit, quant à lui, des amplifications plus importantes, accompagnées d'un effet de filtrage vers les hautes fréquences, comparées à celles correspondantes au multicouche équivalent.

Mots - clés : Sol hétérogène, interfaces aléatoires, réponse en champ libre.

Abstract- Taking into account the spatial variability of the mechanical characteristics of the soil, is an inevitable fact to integrate into the current calculation in Soil Dynamics. The usual methods, based on deterministic approaches using homogeneous soil models, as sophisticated as they are, do not explain or predict, among other things, the differential movement of the structure subjected to the earthquake, or the problem of slant of large and massive structures, in the static case. The natural hazard of the soil linked, on the one hand, to the heterogeneity of its aggregates, and on the other hand to the sedimentation of the layers, increases the complexity of the modeling of the seismic action at the base of the structure. A probabilistic approach, however, allows for the quantitative integration of uncertainties and dispersions associated with soil properties. The latter randomly vary in space and time to form a random field. The objective of this paper is to analysis the propagation of the seismic wave in a random medium (heterogeneous soil). Two types of heterogeneity are considered: (1) any heterogeneity due to the random distribution of the shear modulus in a soil profile; (2) a heterogeneity of the interfaces of the multilayer soil, represented by soil layers having random thicknesses. Heterogeneous soil models are generated by Monté Carlo simulation. The spatial variation of the shear modulus is controlled by the three following parameters: (1) the inter-correlation function; (2) the correlation distance and (3) the standard deviation around the average.

These heterogeneous soils are simulated then integrated in the finite element universal design program 'FLUSH', under a vertical incident wave propagation of type SH. The responses of homogeneous soil models (monolayer and multilayer) are given by the (1D) calculation of the soil column. Two-dimensional (2D) models through a quadratic finite elements mesh, give the responses of heterogeneous soils (random and random interfaces) at different points of the soil 'in free field', with laterals absorbing boundaries.

Seismic responses at different points in the 'free field' soil are then calculated. In this context, the free field represents and supposes a soil without any structure (building, bridges or others). The results showed the importance of considering heterogeneities in the numerical model in the Soil Dynamics domain. The results showed the importance of considering the heterogeneities in models computation of Soil Dynamics. Stochastic heterogeneity provides smaller amplifications accompanied by a filtering effect at low frequencies, compared to those corresponding to the homogeneous layer. The model with random interfaces provides greater amplifications accompanied by a filtering effect towards the high frequencies, compared to those corresponding to the equivalent multilayer.

Keywords: Heterogeneous soil, random interfaces, free field response

1. Introduction

Dans le domaine de la géostatistique, les sols sont des milieux hétérogènes, qu'on les examine à l'œil nu ou au microscope électronique, on est frappé par la diversité des formes et des dimensions des particules ou des agrégats de particules, par l'existence de vides, de fissures, de zones plus compactes, etc. Cette hétérogénéité n'a rien de singulier, vu que les processus qui conduisent à la formation d'un sol donné ont inévitablement subi des fluctuations dans le temps et dans l'espace ; de telle sorte qu'il est normal que leurs propriétés varient tant avec la profondeur (c.-à-d. avec l'âge) qu'horizontalement. Les propriétés mécaniques du sol, masse volumique et module de cisaillement, varient d'un bout à l'autre du massif de sol et ne sont pas toujours connues avec une précision suffisante pour justifier une analyse déterministe ou quasi-déterministe. Cependant, deux éléments essentiels ont concouru au développement des méthodes statistiques et probabilistes dans ce domaine : (1) le besoin des ingénieurs et des chercheurs de calculer le risque de ruine de leurs projets ; (2) le besoin ressenti par les spécialistes de pouvoir quantifier la variation naturelle des propriétés des sols de façon à optimiser les reconnaissances géotechniques.

2. Techniques d'analyse de la variabilité spatiale des propriétés des sols

Pour les géo-statisticiens, dont l'objectif final est de dimensionner des ouvrages, le souci principal posé est : comment peut-on tenir compte de la variabilité naturelle des propriétés des sols dans les modèles de calculs ? Des méthodes statistiques et des techniques très variées ont été proposées. Ces techniques peuvent être classées selon leur processus de calcul : (1) déterminer des moyennes et des écarts-type, rechercher la forme des lois de répartition des paramètres et tester leurs significations ; (2) rechercher des corrélations simples et multiples ; (3) analyser des lois de variation spatiale.

Toutefois, de nombreuses études statistiques ont été réalisées sur les propriétés physiques et mécaniques des sols. Magnan et Bagheri (1982) concluent que les études statistiques telles que menées, à savoir la détermination des moyennes, des écarts types et la recherche

de lois de répartition des paramètres, ne sont pas parfaitement adaptées aux sols. Ils estiment qu'il serait illusoire de limiter l'analyse statistique des propriétés des sols à l'identification des lois de distributions théoriques.

Il faut orienter les efforts d'analyses vers les **variations spatiales** des paramètres mécaniques dans le massif de sol. D'après le théorème de superposition, la technique d'analyse la plus courante pour décrire les variations spatiales des propriétés des sols consiste à décomposer les variations spatiales de chaque propriété en une fonction déterministe des coordonnées des points de mesure dans l'espace, appelée tendance (moyenne) et en une composante aléatoire. Nous avons utilisé cette technique pour simuler l'aspect aléatoire du module de cisaillement du sol. La masse volumique (densité) et le coefficient de Poisson sont considérés constants en tout lieu. Ce choix résulte d'une part, des conclusions de la géostatistique qui soulignent le caractère fortement variable de ce paramètre (module de cisaillement) dans l'espace, en comparaison avec les autres paramètres tels que la densité et le coefficient de Poisson, et d'autre part, de son influence directe sur la réponse dynamique des sols. Nous avons généré des modèles de sols aléatoires quelconques à partir de la simulation de Monté Carlo, donnée par l'équation (1) ci-dessous.

$$G(x, y) = G_0 \left[1 + \sum_{p=1}^N \sum_{l=1}^N \sqrt{\frac{8l_x l_y \sigma^2}{(1+l_x^2(p\Delta k_p)^2)(1+l_y^2(l\Delta k_l)^2)}} \cos(k_p x + k_l y + \phi_{kl}) \right] \quad (1)$$

Ce processus est asymptotiquement gaussien quand N est grand d'après le théorème de la limite centrale, nous prenons N=100.

ϕ_{kl} : Réalisations de déphasage aléatoire, uniformément distribuées sur $[0 - 2\pi]$.

$\Delta k_p, \Delta k_l$: Pas en nombre d'ondes dans les directions x et y respectivement.

k_p, k_l : Nombres d'ondes dans les directions x et y respectivement.

σ^2 : Variance du module de cisaillement.

l_x, l_y : Distances de corrélations dans le plan (x, y), respectivement suivant les axes x et y.

La variation spatiale du module de cisaillement est contrôlée par les trois paramètres suivants : (1) fonction d'auto-corrélation qui exprime la perte de corrélation ou de ressemblance du paramètre d'un point à un autre du milieu, la fonction d'auto-corrélation adoptée est de type exponentiel ; (2) la distance de corrélation qui donne l'ordre de grandeur de la taille de l'hétérogénéité, en d'autres termes, c'est la distance au-delà de laquelle on considère qu'il n'y a plus de corrélation entre deux points considérés ; (3) l'écart-type (σ) qui exprime le degré de fluctuation autour de la valeur moyenne du module de cisaillement du sol.

L'analyse de l'hétérogénéité du sol est prise ici sous ses deux formes possibles :

- 1- Monocouche de sol hétérogène quelconque, c.-à-d. que le module de cisaillement possède une distribution aléatoire dans l'espace bidimensionnel (fig.1).
- 2- Multicouche de sol à interfaces aléatoires, l'épaisseur des couches est aléatoire (fig.5).

Ces modèles de sols hétérogènes quelconques sont bien évidemment générés à partir d'un modèle de sol homogène tel que :

G_0 : Module de cisaillement du monocouche homogène, et qui représente également la valeur moyenne du module de cisaillement du sol hétérogène généré.

Le modèle de sol homogène utilisé possède les caractéristiques données dans le tableau 1. Tous les profils de sol traités ici, sont supposés linéaires, aucune non-linéarité matérielle n'est envisageable.

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques du modèle de sol homogène.

Table 1: Mechanical characteristics of the homogeneous soil model

G_0 (MPa)	V_s (m/s)	ξ (%)	ρ (Kg/m ³)	μ
80	210	3	1800	0.40

V_s : vitesse de propagation de l'onde sismique S.

ξ, ρ, μ : sont respectivement le taux d'amortissement, la masse volumique et le coefficient de Poisson du sol.

Les analyses ont été effectuées par le programme de calcul universel 'FLUSH' en éléments finis [12]. Le sol est soumis à une onde sismique de type SH à incidence verticale.

3. Réponses d'un modèle de sol aléatoire quelconque

Le sol considéré dans cette partie est un sol monocouche d'épaisseur 20m et de largeur 130 m, simulé et modélisé numériquement par un maillage en éléments finis. En effet, le maillage en éléments finis permet d'attribuer à chaque maille un module de cisaillement.

La courbe de la figure 1 représente la distribution aléatoire du module de cisaillement (l'unité de G_0 est en psi (1MPa=145,0377 psi), à un écart type de 60%. La distance de corrélation dans le sens horizontal : $l_x=15$ m et dans le sens vertical : $l_y=2.5$ m.

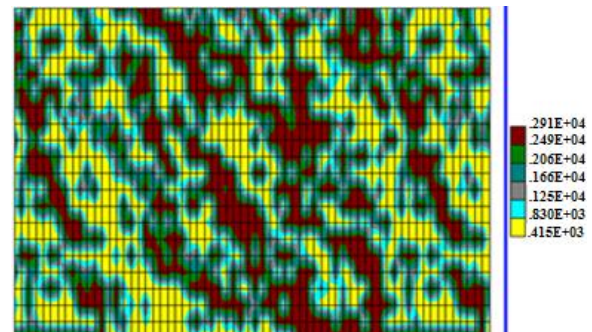


Figure 1 : Distribution aléatoire du module de cisaillement du modèle de sol, (Modèle exponentiel, $\sigma=60\%$)

Figure 1: Stochastic distribution of shear modulus of the soil model, (Exponential).

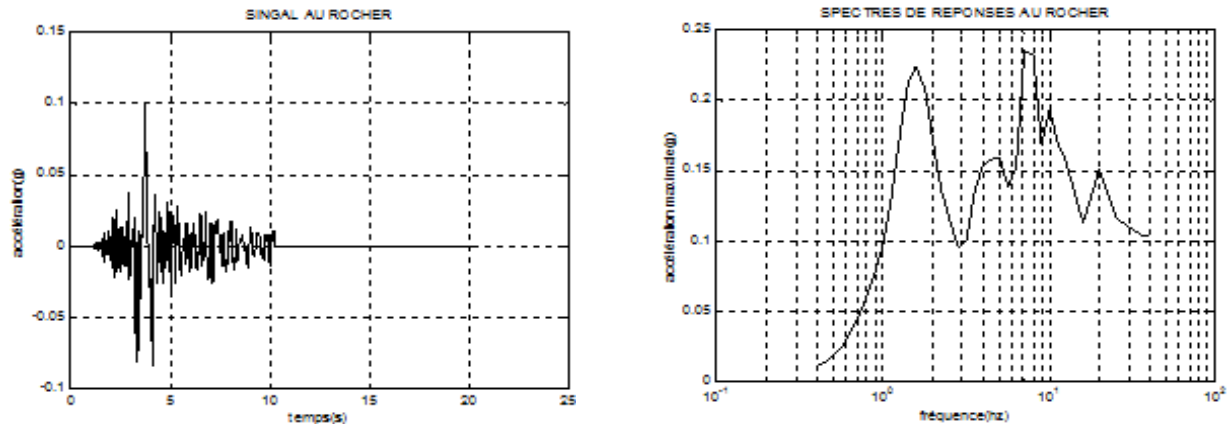


Figure 2 : Accélération et son spectre de réponses correspondant au substratum rocheux

Figure 2: Acceleration and its corresponding response spectrum at the bedrock

L'input sismique au substratum est un accélérogramme riche en haute fréquences, pris le même à la base de tous les modèles de sols traités. Il est représenté (et son spectre de réponses correspondant) à la figure 2. L'intensité de ce signal est $PGA=0.1g$ de telle sorte qu'aucune non-linéarité ne soit envisageable.

3.1. Effets de l'hétérogénéité quelconque du sol sur la réponse sismique en champ libre

Dans le contexte de ce travail, le champ libre (surface libre) représente (suppose) un sol sans aucune structure (bâtiment, ouvrage d'art ou autres). La figure 3 montre la fonction de transfert entre le substratum rocheux et la surface libre du sol respectivement homogène et hétérogène. Pour la couche homogène, la réponse en surface libre est uniforme, elle correspond à la réponse de la colonne de sol (1D), l'amplification substratum/surface libre est représentée à la figure 3. Quant à la couche hétérogène quelconque, nous calculons 09 accélérations horizontales (réponses) et leurs transformées de Fourier respectives, ce qui correspond à 09 points en champ libre équidistants de 10 m (figure 4). Nous pouvons, ensuite, ressortir les fonctions de transfert à chacune de ces positions par rapport au substratum rocheux. La figure 3 représente subséquemment la moyenne, la moyenne + écart-type et la moyenne - l'écart-type de ces neuf 09 fonctions de transfert. L'écart-type indique la fluctuation autour de cette moyenne.

Ces courbes indiquent : (1) l'hétérogénéité du sol induit un effet de filtrage de sa réponse sismique. Cet effet est traduit par le décalage de la fréquence fondamentale de la couche de sol vers les basses fréquences (la fréquence passe de 2,6 Hz dans le cas homogène à 1.5 Hz pour le cas hétérogène quelconque); (2) l'observation et l'analyse de ces courbes indiquent globalement une réduction de l'amplification de la réponse sismique en surface de sol hétérogène en comparaison avec le sol homogène.

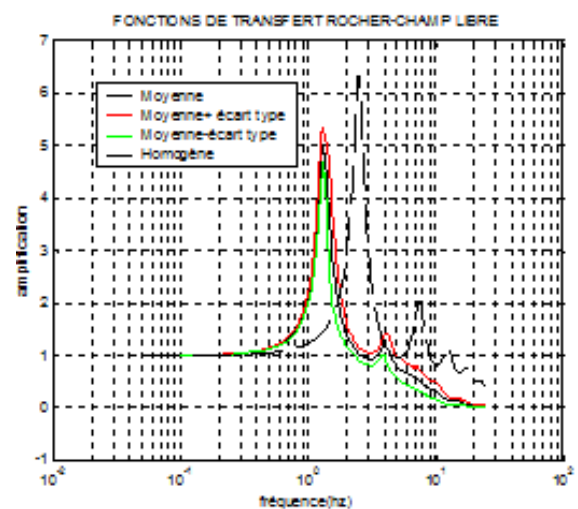


Figure 3 : Comparaison de l'amplification en surface libre du sol.

Figure 3: Comparison of free field soil amplification

3.2 Etude du mouvement de rotation induit par l'hétérogénéité du sol

Les pics des accélérations calculées à la surface libre (sol hétérogène) se révèlent différents entre eux d'un à point à l'autre de cette surface. Par conséquent, il est clair que l'hétérogénéité du sol induit des mouvements différentiels en surface qui peuvent engendrer des mouvements de rotation (de rocking) à la base de structures implantées sur ces sols.

Nous normalisons ces mouvements différentiels par rapport à leurs distances de séparation : nous les appelons « les rotations adimensionnelles ». Pour évaluer ce mouvement induit de rotation, nous utilisons les 09 points cités ci-dessus, à la surface libre du sol hétérogène. Le mouvement de rotation adimensionnelle est d'abord calculé par l'équation suivante :

$$\theta_{ij} = \frac{\ddot{x}_i(t) - \ddot{x}_j(t)}{u_{ij}} \quad (2)$$

$\ddot{x}_i(t), \ddot{x}_j(t)$: Accélérations horizontales aux points i et j respectivement à la surface du sol.

u_{ij} : Distance de séparation entre les deux points i et j .

Le calcul des écarts types se fait ensuite entre couples de deux points avec une distance de séparation de u_{ij} (entre points).

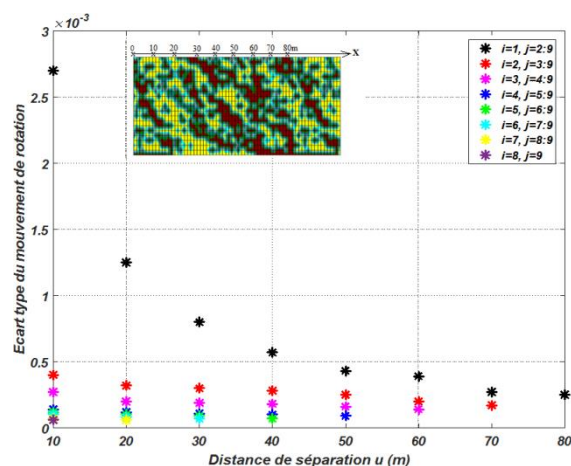


Figure 4 : Variation de l'écart-type du mouvement de rotation en fonction de la distance de séparation.

Figure 4: Variation of the standard deviation of the rotational movement with the separation distance.

Ces écarts-types (notés sigma) sont représentés par la figure 4 qui indique que le mouvement de rotation induit est inversement proportionnel à la distance de séparation. Il atteint des valeurs extrêmes pour de faibles distances, de l'ordre de la largeur d'un bâtiment (10-30 m).

4. Réponses des modèles de sols à interfaces aléatoires quelconques

Cette seconde partie du travail consiste en l'analyse d'un deuxième modèle de milieu hétérogène, en l'occurrence le multicouche à interfaces aléatoires (l'épaisseur des différentes couches varie aléatoirement). Celui-ci résulte d'un réarrangement établi au niveau des simulations du milieu aléatoire quelconque détaillé ci-dessus. Ce réarrangement donne un milieu constitué d'un entassement de plusieurs couches d'épaisseurs aléatoires où la couche la plus dure se trouve juste au-dessus du rocher et la couche la moins dure en surface.

Cette distribution du module de cisaillement (augmentation en profondeur), comme la majorité des propriétés des sols, est justifiée géologiquement (superposition des dépôts de sol du plus récent au plus ancien) et elle est imposée par la variation des pressions de confinement en profondeur [16].

Un multicouche homogène (possédant une épaisseur constante pour chaque couche) est ensuite construit à partir du multicouche à interfaces aléatoires, en moyennant les épaisseurs aléatoires de chaque couche. Les nouvelles couches auront des épaisseurs égales à la moyenne de la plus grande et la plus petite des épaisseurs de la couche à interfaces aléatoires correspondante. Nous prolongeons ensuite la couche la plus dure (juste au-dessus du substratum) de telle sorte à reproduire la même épaisseur totale du profil.

La figure 5 indique les 03 tracés (hétérogène quelconque, hétérogène à interfaces aléatoires et le multicouche homogène, (L'unité de G_0 est en psi avec 1MPa=145,0377psi).

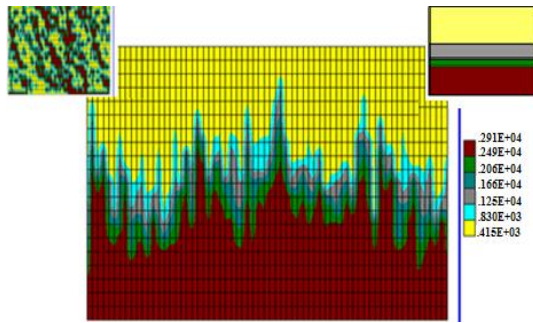


Figure 5 : Distribution du module de cisaillement après réarrangement : multicouche à interfaces aléatoires.

Figure 5: Shear modulus distribution after rearrangement: multi-layer with random interfaces.

La figure 6 montre la fonction de transfert entre le substratum rocheux et la surface libre du milieu respectivement multicouche homogène et multicouche à interfaces aléatoires. Pour le multicouche homogène, la réponse en surface libre est uniforme, elle correspond à la réponse de la colonne de sol (1D). Quant au multicouche à interfaces aléatoires, la fonction de transfert est en fait la moyenne de plusieurs fonctions de transfert calculées à des positions variées en surface.

Ces courbes indiquent que la modélisation avec interfaces aléatoires induit un effet de filtrage. En effet, la fréquence fondamentale du multicouche homogène est décalée vers les hautes fréquences. Le multicouche à interfaces aléatoires est plus rigide que le multicouche homogène du fait qu'il est plus difficile de déplacer relativement (faire glisser) deux couches à interfaces aléatoires.

La figure 7 montre les spectres de réponse des deux modèles de multicouches : homogène et avec interfaces aléatoires. Pour ce dernier modèle, il s'agit de la moyenne de plusieurs spectres calculés en surface. La prise en compte de l'hétérogénéité des interfaces peut induire (cas de l'excitation sismique utilisée montrée en figure 2 dans le présent travail) une augmentation de la réponse sismique à la surface libre, comparée à la réponse du multicouche hétérogène.

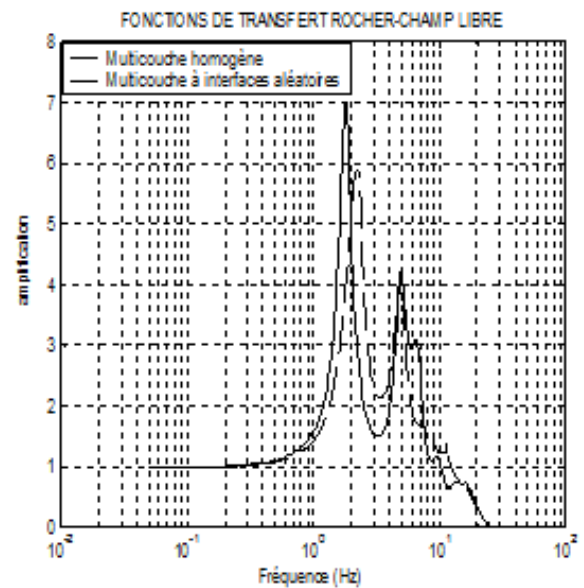


Figure 6 : Comparaison de l'amplification en surface libre du sol pour les deux modèles multicouches : homogène et à interfaces aléatoires.

Figure 6: Comparison of the soil free field amplification for the two multilayer models: homogeneous and with random interfaces

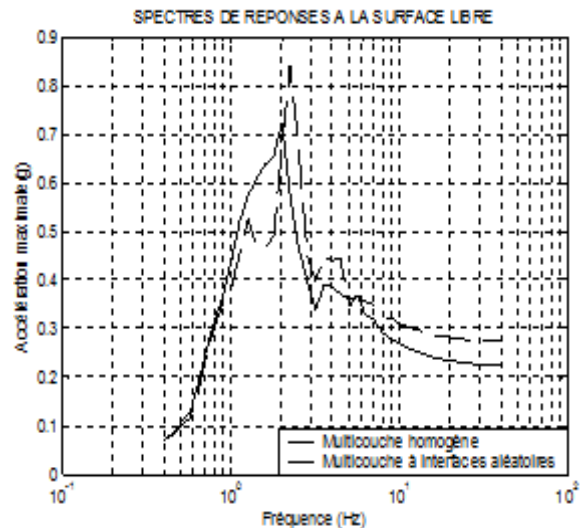


Figure 7 : Amplification et filtrage des réponses en spectre de réponse en champ libre d'un multicouche à interfaces aléatoires.

Figure 7: Amplification and filtering of the free field responses in term of response spectrum of a multilayer with random interfaces

5. Conclusion :

L'hétérogénéité quelconque du sol implique une atténuation et un effet de filtrage de la réponse sismique en tous points de la surface du sol comparé au monocouche homogène. Cette hétérogénéité induit des mouvements différentiels entre paires de deux points en surface. Ces mouvements sont appelés effet du mouvement de rotation induit. Ils sont inversement proportionnels à la distance de séparation entre les deux points de calcul considérés.

Le multicouche à interfaces aléatoires induit un effet de décalage de la fréquence fondamentale vers les hautes fréquences comparées au multicouche homogène. Le multicouche à interfaces aléatoires est plus rigide que le multicouche homogène du fait qu'il est plus difficile de déplacer relativement (faire glisser) deux couches à interfaces aléatoires. Le multicouche à interfaces aléatoires peut induire aussi une amplification du mouvement moyen par rapport à la réponse du multicouche homogène.

Références bibliographiques

- [1] AKI K., LARNER K.L., (1970), 'Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves', J Geophys Res 75:5
- [2] BADAOU M., BERRAH M., K. and MÉBARKI A., (2008), 'Seismic Behavior Of A Heterogeneous Soil With Uncertain Height', The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, Beijing, China
- [3] BARD P-Y., GARIEL J-C. (1986), 'The seismic response of 2D sedimentary deposits with large vertical velocity gradients', Bull Seism Soc Am 76:343-366
- [4] CASAGRAND A., (1965). 'Role Of « calculated risk » in earthwork and foundation engineering', ASCE, JI of SMFD, vol.91, no SM4.
- [5] CLOUGH R.W., and PENZIEN J., (1975). 'Dynamics of structures', Mc Graw Hill, New York.
- [6] DU C., and WANG G., (2015) 'Seismic Response Analysis of Heterogeneous Soils Using 2D Spectral Element Method', The 28th

KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, November 16-18, 2015, Bangkok, Thailand

- [7] FRANCKEL A., and CLAYTON R.W., (May, 10, 1986). 'Finite difference simulation of seismic scattering: Implication for the propagation of short period seismic waves in the crust and model of crustal heterogeneity'. Journal of geophysical Research, vol. 91, No. B6 pp. 6465-6489.
- [8] HERRMANN H., and BUCKSCH H., (2014) 'heterogeneous soil' In book: Dictionary Geotechnical Engineering, DOI: 10.1007/978-3-642-41714-6_80796
- [9] IDRIS I.M., and al., 'Seismic response of soil layers', Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, pp1003-1031.
- [10] LAIB A., LAOUAMI N., and SLIMANI N., (2015) 'Modeling of soil heterogeneity and its effects on seismic response of multi-support structures', Earthq. Eng. Eng. Vib. 14: 423,
- [11] LAOUAMI N., et NOUR A., (2000). 'Estimation probabiliste du tassement et du dévers de grand ouvrage en milieu hétérogène', Projet de recherche. Centre Nationale de recherches appliquées en génie parasismique. Algérie.
- [12] LYSMER J., UDAKA T., TSAI C-F and SEED H.G., (November 1975). 'FLUSH a computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems', Earthquake Engineering Research Center, ReportNo.EERC 75-30.
- [13] MAGNAN J-P., (1982). 'Les méthodes statistiques et probabilistes en mécanique des sols'. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées.
- [14] MESSAOUDI A., (2001). 'Interaction sol-structure en milieu hétérogène'. Thèse de Magister. USTHB (Algérie)
- [15] MITTAL R. K., and RAWAT S., (2019) 'Effect of Soil Heterogeneity on Soil-Structure Interaction' In book Soil Dynamics and Earthquake Geotechnical Engineering DOI: 10.1007/978-981-13-0562-7_3
- [16] POPESCU R., PRESVOST J.H., DEODATIS G., (1998) 'Spatial Variability of Soil Properties: two case studies' Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Seattle, Washington, ASCE



[17] WANG S., and HAO H., (2002), 'Effects of Random Variations of Soil Properties on Site Amplification of Seismic Ground Motions,' Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22: 551–564