

APPROCHE ANALYTIQUE POUR L'ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ DU SOL SUR LA FONCTION DE COHÉRENCE ET LES DÉFORMATIONS DU SOL.

Abdelghani LAIB¹, Nasser LAOUAMP²

¹ Attaché de recherche, centre national de recherche appliquée en génie parasismique, CGS

² Directeur de recherche, centre national de recherche appliquée en génie parasismique, CGS

Résumé : La caractérisation de l'influence de l'hétérogénéité latérale et plus particulièrement les fluctuations aléatoires de la fréquence prédominante du sol sur la variabilité spatiale des mouvements sismiques en surface et sur les déformations du sol a été étudiée. Dans ce but, un modèle analytique de la fonction de cohérence des mouvements sismiques a été développé. La formulation proposée considère que le mouvement sismique est la combinaison d'effet du mouvement incident à l'interface substratum-couche de sol qui peut être décrit par son incohérence spatiale et sa propagation apparente, et l'effet du site modélisé par un ensemble d'oscillateurs à un degré de liberté avec des fréquences propres qui varient d'une manière aléatoire. Il a été démontré que la forme générale de la fonction de cohérence était contrôlée par le mouvement incident, la contribution du site quant à elle est concentrée au voisinage de la fréquence prédominante et provoque un "creux" sur le graphe de la cohérence, aussi, entraîne-t-elle une infime diminution de la cohérence lorsque la fréquence augmente au-delà de la fréquence propre du sol. En outre, l'évaluation des déformations d'un sol meuble à partir du modèle proposé a indiqué que l'hétérogénéité latérale de la couche de sol influence les valeurs des déformations, cette influence est marquée considérablement aux niveaux des grandes vitesses de propagation d'ondes sismiques. Dans le cas des ouvrages longs ou à supports multiples où la description de la variabilité spatiale est requise, le modèle analytique proposé peut être utilisé.

Mots-Clefs : fonction de cohérence, variabilité spatiale, modèle analytique, hétérogénéité latérale, déformation du sol.

1. INTRODUCTION

La variabilité spatiale des mouvements sismiques dénote les différences dans l'amplitude et la phase des mouvements sismiques aux différents emplacements à la surface du sol. Elle a un effet important sur la réponse des structures étendues telles que les ponts. En effet, la variabilité spatiale du mouvement sismique peut engendrer des contraintes supplémentaires au sein de telles constructions et de ce fait, avoir un impact conséquent sur les caractéristiques de leurs réponses dynamiques. Généralement, la méthode utilisée pour l'étude de la variabilité spatiale des mouvements sismiques est l'adoption des analyses statistiques basées sur les enregistrements sismiques des réseaux d'accélérographes (exp. LSST-Lotung à Taiwan[1]) pour avoir une fonction de cohérence du mouvement décroissante exponentiellement en fonction de la fréquence et la distance de séparation [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Novak et Hindy [7, 8] ont présenté la première analyse stochastique des structures étendues soumises aux mouvements sismiques présentant une perte de cohérence. Harichandran et Vanmarcke [9] ont évalué la fonction de cohérence des mouvements sismiques dans les directions épacentrale, normale à la direction épacentrale et verticale sur la base de l'analyse des événements enregistrés par le réseau SMART-1. Ils ont noté des fluctuations de la phase spectrale au niveau des hautes fréquences, attribuées aux probables conditions locales de site et à l'instabilité de la phase estimée, suggérant une étude statistique. Somerville et al. [10] ont proposé un modèle dans lequel ils attribuent les causes de la variabilité spatiale à l'effet de passage d'onde, l'effet de source, l'effet de la dispersion de l'onde sismique lors de son trajet du foyer au site et l'effet des conditions locales de site. Ils concluent que l'incohérence spatiale mesurée aux sites sédimentaires à stratigraphie plane, tels que l'IMPÉRIAL VALLEY ou LOTUNG, ne puisse pas fournir une bonne description de l'incohérence spatiale aux sites où il y a une hétérogénéité latérale significative. Schneider et al. [11] ont considéré que la fonction de cohérence devait être le résultat du produit de deux termes, le premier correspondant à l'effet de source et au passage d'onde, le second à la perte de cohérence. Dans une autre étude, Spudis [11] a indiqué que les principales contributions à la variabilité spatiale étaient l'effet de passage d'onde, les conditions en surface libre qui pourraient engendrer des

ondes de surface et enfin l'effet de site. Il a aussi suggéré d'après des observations sismologiques que l'effet de source était minimal. Cependant, les fonctions de cohérence dérivées à partir des données d'un réseau d'accélérographes peuvent être significativement différentes de celles dérivées à partir d'autres réseaux. De plus, les fonctions de cohérence obtenues à partir des différents événements enregistrés sur le même site varient significativement [9]. En effet, les modèles empiriques de la fonction de cohérence, qui sont obtenus avec des moyens purement statistiques, ne peuvent pas révéler le mécanisme physique par lequel la variabilité spatiale des mouvements sismiques est entraînée. Cependant, plusieurs chercheurs rapportent que «l'estimation de la variabilité spatiale du mouvement sismique pour un site donné à partir seulement des approches empiriques n'est pas pratique [1]». Afin de franchir les inconvénients des approches empiriques, quelques chercheurs ont recours à des modèles analytiques ou semi empiriques dont les formes fonctionnelles sont basées sur des considérations analytiques mais l'évaluation de leurs paramètres requiert des enregistrements sismiques [12, 13, 14, 15]. Ces modèles sont plus flexibles et adaptables aux caractéristiques spécifiques de site. Der Kiureghian [16] a développé un modèle stochastique en considérant l'effet de passage d'onde, de la perte de cohérence et de la variation des conditions locales de site, l'effet d'incohérence peut être considéré comme étant statistiquement identique pour chaque site et contrôle le module de la fonction de cohérence. Cependant, l'effet de passage d'onde et l'effet de site ont un rapport à la phase de la fonction de cohérence et varient d'un site à l'autre [17]. Zerva et Harada [11] ont investigué l'effet de la stochasticité du sol sur la variabilité spatiale du mouvement sismique par un modèle analytique fondé sur l'hypothèse d'une couche horizontale d'épaisseur constante et des caractéristiques mécaniques aléatoires. Ils ont signalé que l'effet de la stochasticité du sol devrait être intégré dans le modèle de la variation spatiale parce que la variabilité des caractéristiques du sol réduira la fonction de cohérence au niveau de la fréquence propre du sol. Liao et Li [17] ont proposé une méthodologie analytique stochastique pour tenir compte de l'effet de la cohérence des mouvements sismiques sur la réponse du site. Ils ont indiqué que l'irrégularité de la couche du sol d'un site à caractéristiques stochastiques

soumis à une excitation cohérente pouvait réduire les valeurs de la fonction de cohérence au niveau de la fréquence propre du sol.

L'objectif de cet article est la caractérisation de l'influence de l'hétérogénéité latérale et plus particulièrement les fluctuations aléatoires de la fréquence prédominante du sol sur la variabilité spatiale des mouvements sismiques en surface du sol d'une part, et sur les déformations du sol d'autre part. Un modèle de la fonction de cohérence est développé en représentant l'effet du passage d'onde par une différence de phase, i.e., vitesse apparente de propagation constante ce qui est généralement le cas pour les ondes de cisaillement. La perte de cohérence est modélisée par la fonction de Luco et Wong [14] qui est très largement utilisée. L'analyse est centrée sur l'effet du site qui est fondé sur l'hypothèse de la propagation verticale des ondes S à travers une couche du sol à propriétés aléatoires. Les contributions des différents facteurs de la variation spatiale des mouvements sismiques et les déformations résultantes sont examinées pour un exemple d'un sol meuble. Dans le cas où la description de la variabilité spatiale est requise et les données sismiques du site ne sont pas disponibles, le modèle analytique proposé peut être utilisé.

2. Modèle du mouvement sismique dans un milieu aléatoire

2.1. Principe du modèle

En se basant sur l'hypothèse de la propagation verticale des ondes S à travers une couche de sol horizontale à propriétés déterministes et s'étendant latéralement à l'infini, surmontant un semi espace élastique, les accélérations des mouvements sismiques à la surface du sol sont modélisés par la densité spectrale de puissance (DSP) de KANAI-TAJIMI d'un bruit blanc filtré par le milieu dont la fonction de transfert est [18] :

$$H(i\omega) = \frac{\omega_g^2 + 2i\xi_g \omega_g \omega}{(\omega_g^2 - \omega^2) + 2i\xi_g \omega_g \omega} \quad (1)$$

Et la DSP :

$$S_0(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2 \frac{\omega^2}{\omega_g^2}}{(1 - \frac{\omega^2}{\omega_g^2})^2 + 4\xi_g^2 \frac{\omega^2}{\omega_g^2}} A \quad (2)$$

où ξ_g et ω_g représentent le coefficient d'amortissement et la fréquence prédominante de la couche de sol et A, est la DSP d'un bruit blanc. $i = \sqrt{-1}$.

Dans la réalité, le sol montre une hétérogénéité latérale due à la variation spatiale des propriétés mécaniques telles que le module de cisaillement, la densité, ...etc. de ce fait, on se propose dans cet article d'analyser une couche de sol 2D avec des propriétés stochastiques. La modélisation consiste à discrétiser le sol avec des ressorts parallèles espacés ayant des fréquences naturelles différentes fluctuant aléatoirement autour d'une moyenne ω_0 le long de l'axe des x (fig. 1) ; ainsi, la fréquence naturelle peut être exprimée comme suit :

$$\omega^*(x) = \omega_0 (1 + \omega(x)) \quad (3)$$

où $\omega(x)$ est un champ aléatoire homogène à moyenne nulle avec un écart type $\sigma_{\omega\omega}$.

On introduit l'aléa dans le milieu en supposant que le coefficient d'amortissement du milieu ξ_g est égal à une valeur moyenne ξ , la fonction de transfert $H(i\omega)$ (équation 1) devient :

$$H(x, \omega) = \frac{(\omega^*(x))^2 + 2i\xi\omega(\omega^*(x))}{((\omega^*(x))^2 - \omega^2) + 2i\xi\omega(\omega^*(x))} \quad (4)$$

Il est à noter que cette approche est applicable pour des sites qui peuvent être représentés par des couches de sol horizontales et possédant une topographie quasi-régulière. On cherche à déterminer la fonction d'autocorrélation et la fonction d'intercorrélation pour un milieu avec aléa à la sortie du modèle ; cette corrélation est fonction de la distance de séparation et la variance du milieu.

2.2. Fonction de corrélation

En se basant sur la théorie des vibrations aléatoire, la variabilité spatiale des mouvements sismiques est mieux mesurée par la fonction de corrélation et la fonction de cohérence.

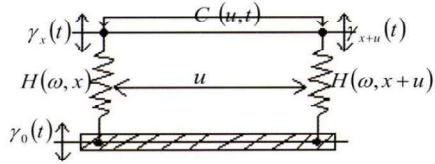


Fig.1. Modélisation du site ; cas d'une couche à propriétés stochastiques. $C(u, t)$: Fonction d'intercorrélation. $\gamma_0(t)$: Bruit blanc. $\gamma_x(t)$ et $\gamma_{x+u}(t)$: Bruits blancs filtrés. $H(\omega, x)$ et $H(\omega, x+u)$: fonctions de transfert.

La réponse impulsionnelle $h(x, t)$, qui est la transformée de Fourier inverse de $H(x, \omega)$, s'écrit :

$$h(x, t) = \begin{cases} \frac{\omega^*(x)}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega^*(x)t} \times \\ \cos(\omega^*(x)\sqrt{1-\xi^2}t + \phi) & \text{pour } t \geq 0 \\ 0 & \text{pour } t < 0 \end{cases} \quad (5)$$

avec :

$$\phi = -\arctg \left[\frac{1-2\xi^2}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} \right] \quad (6)$$

Par définition, la fonction d'intercorrélation est donnée par :

$$C_{xy}(x, \tau, u) = \int_0^\infty h(x, t) h(x+u, t+\tau) dt \quad (7)$$

où x et y sont les abscisses des deux points distincts sur le site.

La réponse impulsionnelle $h(x, t)$ est développée en série de Taylor au voisinage de ω_0 de la manière suivante (pour $t \geq 0$) :

$$h(x, t)|_{\omega^*(x)=\omega_0} = \frac{\omega_0 e^{-\xi\omega_0 t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \times \left\{ \begin{aligned} &\cos(\omega_0\sqrt{1-\xi^2}t + \phi) + \\ &\omega(x) \left[\cos(\omega_0\sqrt{1-\xi^2}t + \phi) - \right. \\ &\quad \left. \omega_0\xi t \cos(\omega_0\sqrt{1-\xi^2}t + \phi) - \right. \\ &\quad \left. \omega_0\sqrt{1-\xi^2}t \sin(\omega_0\sqrt{1-\xi^2}t + \phi) \right] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

A l'aide de l'équation (8), il devient possible

de calculer la moyenne de la fonction d'intercorrélation :

$$\hat{C}_{xy}(\tau, u) = E[C_{xy}(x, \tau, u)] = E \left[\int_0^\infty h(x, t) h(x+u, t+\tau) dt \right] \quad (9)$$

où E est l'opérateur espérance mathématique.

Après de longues manipulations algébriques, on trouve :

$$\hat{C}_{xy}(\tau, u) = \frac{\omega_0 e^{-\xi\omega_0|\tau|}}{4\xi(1-\xi^2)} \times \left\{ \begin{aligned} &\cos(\omega_0\sqrt{1-\xi^2}|\tau|) + \\ &\xi \sin(\omega_0\sqrt{1-\xi^2}|\tau| + 2\phi + \phi_1 + \pi) \end{aligned} \right\} + C_{\omega\omega}(u) \times \{a(\tau) - b(\tau) + c(\tau) + d(\tau) + e(\tau)\} \quad (10)$$

où :

$$a(\tau) = \left\{ \frac{\cos(\omega_0\sqrt{1-\xi^2}|\tau|) \times \left[\frac{\omega_0 e^{-\xi\omega_0|\tau|} (1-2\xi^3\omega_0|\tau| + \xi\omega_0|\tau|)}{8\xi^3(1-\xi^2)} \right] \right\}$$

$$b(\tau) = \frac{\omega_0^2|\tau| e^{-\xi\omega_0|\tau|}}{4\xi\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\omega_0\sqrt{1-\xi^2}|\tau|)$$

$$c(\tau) = \frac{\omega_0 e^{-\xi\omega_0|\tau|}}{4(1-\xi^2)} \sin(\omega_0\sqrt{1-\xi^2}|\tau| + 2\phi + \phi_1 + \pi)$$

$$d(\tau) = \cos(\omega_0\sqrt{1-\xi^2}|\tau| + 2\phi) \times \left[\frac{-\omega_0 e^{-\xi\omega_0|\tau|} (\xi + \omega_0|\tau|)}{8(1-\xi^2)} \right]$$

$$e(\tau) = \sin(\omega_0\sqrt{1-\xi^2}|\tau| + 2\phi) \times \left[\frac{\omega_0 e^{-\xi\omega_0|\tau|}}{8\sqrt{1-\xi^2}} \right]$$

$$\phi_1 = \arctg \left(\frac{-\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \right)$$

$C_{\omega\omega}(u) = E[\omega(x)\omega(x+u)]$ est la fonction d'autocorrélation de $\omega(x)$.

La moyenne de la fonction d'autocorrélation est obtenue en mettant la distance de séparation égale à ($u = 0$) zéro dans l'équation (10) :

$$\hat{C}_{xx}(\tau) = \frac{\omega_0 e^{-\xi \omega_0 |\tau|}}{4\xi(1-\xi^2)} \times \left\{ \cos(\omega_0 \sqrt{1-\xi^2} |\tau|) + \xi \sin(\omega_0 \sqrt{1-\xi^2} |\tau| + 2\phi + \phi_1 + \pi) \right\} + \sigma_{\omega\omega}^2 \times \{a(\tau) - b(\tau) + c(\tau) + d(\tau) + e(\tau)\} \quad (11)$$

Avec :

$$\sigma_{\omega\omega}^2 = E[\omega(x)^2] = C_{\omega\omega}(u=0) \text{ est la variance de } \omega(x).$$

Les fonctions de corrélation décrivent la variabilité spatiale des mouvements sismiques dans le domaine temporel. Il est intéressant de passer à la description de la variabilité spatiale dans le domaine fréquentiel où la notion de la DSP est introduite.

2.3. Fonction densité spectrale de puissance

Par définition, la fonction d'inter-DSP est la transformée de Fourier de la fonction d'intercorrélation. On peut écrire :

$$S_{xy}(u, \omega) = TF[\hat{C}_{xy}(u, \tau)] \quad (12)$$

A partir des équations (10) et (12) et après de longues manipulations algébriques, la fonction d'inter-DSP est déterminée comme :

$$S_{xy}(u, \omega) = \frac{f(\omega)}{g(\omega)} + \frac{C_{\omega\omega}(u)}{i(\omega)} \times \{j(\omega) + k(\omega) + l(\omega) + m(\omega) + n(\omega)\} \quad (13)$$

où :

$$\begin{aligned} f(\omega) &= \left\{ \begin{aligned} &[\omega_0^2 + \omega^2] \cdot [\omega_0^2 + \xi \omega_0^2 \sin(2\phi + \phi_1 + \pi)] \\ &+ [\omega_0^2 \sqrt{1-\xi^2} (\omega_0^2 - \omega^2) \cos(2\phi + \phi_1 + \pi)] \end{aligned} \right\} \\ g(\omega) &= 2(1-\xi^2) [\omega_0^4 + \omega^4 - 2\omega_0^2 \omega^2 (1-2\xi^2)] \\ i(\omega) &= \left\{ \begin{aligned} &2(1-\xi^2) [\omega_0^2 + \omega^2 - 2\omega_0 \omega \sqrt{1-\xi^2}]^2 \times \\ &[\omega_0^2 + \omega^2 + 2\omega_0 \omega \sqrt{1-\xi^2}]^2 \end{aligned} \right\} \\ j(\omega) &= \omega_0^2 \omega^2 [4\omega_0^2 \omega^2 (1-\xi^2) + (\omega_0^2 + \omega^2)^2] \\ k(\omega) &= \omega_0^4 [-2\xi^2 (\omega_0^4 + \omega^4) + (\omega_0^2 - \omega^2)^2] \cos(2\phi) \\ l(\omega) &= 2\xi \omega_0^4 \sqrt{1-\xi^2} (\omega_0^4 - \omega^4) \sin(2\phi) \end{aligned}$$

$$m(\omega) = \left\{ \begin{aligned} &\xi \omega_0^2 \sin(2\phi + \phi_1 + \pi) \times \\ &[\omega_0^6 + \omega^6 + \omega_0^2 \omega^2 (4\xi^2 - 1)(\omega_0^2 + \omega^2)] \end{aligned} \right\}$$

$$n(\omega) = \left\{ \begin{aligned} &\omega_0^2 \sqrt{1-\xi^2} \cos(2\phi + \phi_1 + \pi) \times \\ &[\omega_0^6 - \omega^6 + \omega_0^2 \omega^2 (4\xi^2 - 3)(\omega_0^2 - \omega^2)] \end{aligned} \right\}$$

Supposant comme d'habitude que l'auto-DSP du mouvement est spatialement invariante. Elle est obtenue en mettant la distance de séparation égale à zéro ($u=0$) dans l'équation (13). Il est intéressant de signaler que pour un écart-type $\sigma_{\omega\omega}$ nul, i.e., une couche de sol à propriétés déterministes, l'expression de l'auto-DSP (équation 14) se réduit à la densité spectrale de Kanai-Tajimi [18].

$$S_{xx}(\omega) = \frac{f(\omega)}{g(\omega)} + \frac{\sigma_{\omega\omega}^2}{i(\omega)} \times \{j(\omega) + k(\omega) + l(\omega) + m(\omega) + n(\omega)\} \quad (14)$$

2.4. Calcul des caractéristiques du site

L'évaluation des paramètres du modèle proposé ω_0 , $C_{\omega\omega}(u)$, $\sigma_{\omega\omega}$ et ξ , peut se faire d'une manière expérimentale, empirique ou bien numérique, i.e., simulation numérique de la variation spatiale des propriétés du sol. Dans cet article, le travail fait par A. Zerva & T. Harada [11] peut être considéré comme une référence. Ils ont proposé un profil de sol d'une longueur de 1200m. Pour la simplicité, ils ont considéré que

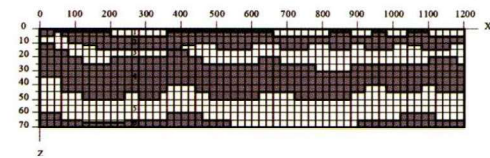


Fig.2. Profil du sol considéré [11].

l'hétérogénéité des sols résultait de la variabilité aléatoire d'épaisseurs de six sous-couches constituant le profil du sol de profondeur constante de 70m. Les caractéristiques du sol sont constantes dans chacune des sous-couches du sol et sont données dans le tableau (1), ainsi, les limites des sous-couches sont, approximativement, des successions de lignes droites comme il est montré dans la figure (2). Le profil du sol est subdivisé en 60 colonnes de dimensions 20mx70m.

Les auteurs ont trouvé pour cet exemple particulier une moyenne de la fréquence

prédominante ω_0 égale à 5.64 rad/s ($f_0 = 0.89 \text{ Hz}$) avec un écart-type $\sigma_{\omega\omega} = 0.101$. De plus, ils ont calculé la fonction de corrélation spatiale de $\omega(x)$ en interprétant chaque valeur comme étant une réalisation du processus stochastique, le calcul est fait comme suit :

$$\tilde{C}_{\omega\omega}(u_k) = \frac{1}{N-k} \sum_{n=1}^{N-k} \left[\frac{\omega^*(x_n + u_k) - \omega_0}{\omega_0} \right] \left[\frac{\omega^*(x_n) - \omega_0}{\omega_0} \right] \quad (15)$$

où N est le nombre total des colonnes du sol.

Afin d'éviter des valeurs petites pour le nombre $N-k$, la plus grande distance de séparation a été limitée à $u=600\text{m}$ [11]. La fonction de corrélation spatiale résultante normalisée par $\sigma_{\omega\omega}^2$ est représentée dans la figure (3). Dans le cas où il y a une nécessité à une approximation analytique de la fonction de corrélation spatiale $\tilde{C}_{\omega\omega}(u_k)$, les auteurs ont choisi une fonction de sorte qu'elle reproduise le comportement de la variabilité spatiale des pulsations de manière analytique et qu'elle admette des dérivées du premier et second ordre avec des valeurs finies en $u = 0$:

Tableau 1. Caractéristiques du profile du sol [11].

Sous-couche du sol	Masse volumique (g.cm^{-3})	Module de cisaillement (Kg.cm^{-2})	Vitesse des ondes S (m.s^{-1})
1 Sable	1.8	133	85
2 Sable	1.7	287	125
3 Argile	1.5	612	200
4 Gravier	1.9	2050	325
5 Grès	2.1	5360	500
6 Grès	2.2	14367	800

$$C_{\omega\omega}(u) = \sigma_{\omega\omega}^2 f_{\omega\omega}(u) \quad (16)$$

avec :

$$f_{\omega\omega}(u) = \left[1 - 2 \left(\frac{u}{b_{\omega}} \right)^2 \right] \exp \left(- \left(\frac{u}{b_{\omega}} \right)^2 \right) \quad (17)$$

et où b_{ω} est la longueur de corrélation. Sa valeur est déterminée de manière à ce que $C_{\omega\omega}(u)$ et $\tilde{C}_{\omega\omega}(u)$ s'annulent pour la même distance de séparation u . Dans cet exemple, $\tilde{C}_{\omega\omega}(u) = 0$ pour une distance de séparation $u \approx 110 \text{ m}$ (figure 3), et $b_{\omega} = 155.56 \text{ m}$.

Du fait de l'absence des données relatives au coefficient d'amortissement, il est supposé que $\zeta = 0.20$ pour un sol meuble (basse fréquence prédominante). $\zeta = 0.20, 0.40$ et 0.60 sont couramment utilisés comme des valeurs des coefficients d'amortissement pour un sol meuble, moyenne consistance et ferme respectivement [19].

L'effet de l'hétérogénéité du sol sur les mouvements sismiques en terme de l'auto-densité spectrale est montré sur la figure (4), l'énergie de la densité spectrale de puissance est concentrée au voisinage de la moyenne de la fréquence prédominante du profil du sol avec une forme qui se rapproche de celle du spectre de Kanai-Tajimi.

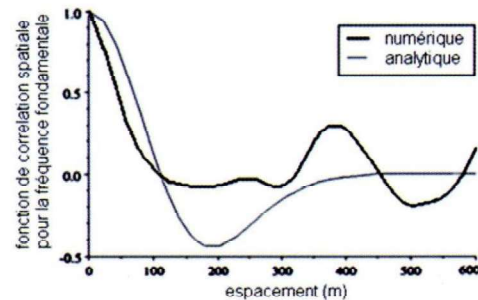


Fig.3. Fonction de corrélation de la fréquence fondamentale [11].

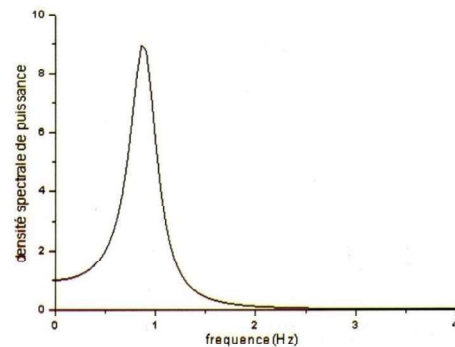


Fig.4. Auto-densité spectrale de puissance (DSP) des mouvements du site. $\zeta = 0.20$, $f_0 = 0.89 \text{ Hz}$, $\sigma_{\omega\omega} = 0.101$.

2.5. Fonction de cohérence

La fonction de cohérence est le moyen le plus commode pour la description de la variabilité spatiale des mouvements sismiques. Elle est définie comme suit :

$$\gamma(\omega, u) = \frac{S_{xy}(\omega, u)}{S_{xx}(\omega)} \quad (18)$$

En substituant les équations (13) et (14) dans l'équation (18), la cohérence du mouvement du site devient :

$$\gamma_{site}(\omega, u) = \frac{H_1(\omega) + C_{\omega\omega}(u)H_2(\omega)}{H_1(\omega) + \sigma_{\omega\omega}^2 H_2(\omega)} \quad (19)$$

avec :

$$H_1(\omega) = i(\omega) \times f(\omega) \quad (20)$$

$$H_2(\omega) = g(\omega) \times \{j(\omega) + k(\omega) + l(\omega) + m(\omega) + n(\omega)\} \quad (21)$$

L'hétérogénéité du sol affecte la cohérence des mouvements sismiques conformément à l'équation (19). En effet, le mouvement à la surface du sol est le résultat de la superposition du mouvement au niveau de l'interface substratum-couche de sol et du mouvement relatif entre le substratum et la surface du sol. En outre, on ignore l'effet de la présence des différentes sous-couches de sol au-dessus du substratum sur le mouvement total de celui-ci, le mouvement incident est indépendant des ondes réfléchies et réfractées provenant des sous-couches du sol au-dessus du substratum. La fonction de cohérence du mouvement total en surface du sol sera :

$$\gamma_{tot}(u, \omega) = \gamma_{site}(u, \omega) \cdot \gamma_i(u, \omega) \quad (22)$$

La variabilité spatiale des mouvements sismiques est causée par leur propagation apparente à la surface du sol et le changement dans leur forme (perte de cohérence) aux différents points avec l'hypothèse de l'insignifiance de l'effet de source sur cette variation. Ainsi, la cohérence du mouvement incident englobe l'effet de la perte de cohérence et l'effet de passage d'onde.

$$\gamma_i(u, \omega) = \gamma_{coh}(u, \omega) \cdot \gamma_{i_prop}(u, \omega) \quad (23)$$

L'incohérence des mouvements incidents est donnée par le modèle de Luco et Wong [14] qui se base sur la propagation d'ondes de cisaillement à distance H à travers un milieu aléatoire :

$$\gamma_{coh}(u, \omega) = \exp(-\bar{\alpha}^2 \omega^2 u^2) \quad (24)$$

où $\bar{\alpha}$ est un paramètre qui contrôle la diminution exponentielle de la fonction de cohérence. Plus sa valeur est importante, plus la perte de cohérence en fonction de la distance de séparation et la fréquence est importante. Sa valeur est comprise entre 2 et $3.10^{-4} m^{-1}s$.

Ce modèle a déjà été utilisé à plusieurs reprises par des chercheurs pour l'analyse dynamique des structures étendues ainsi que pour l'étude de la variabilité spatiale [19, 14, 20]. De plus, il a été démontré que ce modèle est en concordance avec les données expérimentales. Der Kiureghian [12] l'a déjà utilisé pour la description de la cohérence du mouvement au niveau du substratum.

La propagation apparente des ondes sismiques est décrite par l'expression suivante :

$$\gamma_{i_prop}(u, \omega) = \exp\left(-\frac{i\omega u}{c}\right) \quad (25)$$

L'équation (25) représente une variation spatiale déterministe du mouvement sismique dû à la propagation des ondes planes dans un milieu élastique infini, la vitesse des ondes (ondes de cisaillement) est indépendante de la fréquence, par conséquent, la vitesse apparente est constante. Cette forme de la fonction de cohérence pour le passage d'onde a été utilisée par plusieurs chercheurs [19, 14, 21, 11]. Il est à noter que c est la vitesse apparente de propagation des ondes le long de l'interface; elle est en fonction de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le semi-espace ainsi que de leur angle d'incidence au niveau de l'interface.

A partir des équations (19, 22-25), La variation spatiale du mouvement total en surface devient :

$$\gamma_{tot}(u, \omega) = \frac{H_1(\omega) + C_{\omega\omega}(u)H_2(\omega)}{H_1(\omega) + \sigma_{\omega\omega}^2 H_2(\omega)} \times \exp(-\bar{\alpha}^2 \omega^2 u^2) \exp\left(-\frac{i\omega u}{c}\right) \quad (26)$$

L'équation (26) comprend l'effet de l'hétérogénéité du site, l'effet de l'incohérence et l'effet de passage d'onde. L'amplitude de la fonction (26) qui décrit la perte de cohérence seule est :

$$\gamma_{coh}(u, \omega) = \frac{H_1(\omega) + C_{\omega\omega}(u)H_2(\omega)}{H_1(\omega) + \sigma_{\omega\omega}^2 H_2(\omega)} \times \exp(-\bar{\alpha}^2 \omega^2 u^2) \quad (27)$$

Afin d'analyser ces effets séparément, leurs contributions sont isolées l'une de l'autre.

En absence de la couche du sol à propriété aléatoire ou si cette couche a des propriétés déterministes, la variabilité du mouvement en surface devient identique à celle du mouvement incident (équation 23). La perte de cohérence du mouvement pour les distances de séparation de 50, 100, 200 et 500m en fonction de la fréquence (équation 24) est représentée sur la figure (5) avec un coefficient $\bar{\alpha}$ pris égal à $2.5 \times 10^{-4} \text{ s.m}^{-1}$, une valeur intermédiaire entre celles proposées par Luco et Wong [14] à partir de l'analyse de données sismiques. L'effet du passage d'onde sur le mouvement incident (équation 25) se révèle par le déphasage déterministe dans l'arrivée des ondes aux différentes stations, l'angle du déphasage est de :

$$\theta(u, \omega) = \arctg \frac{\Im \exp(-i\omega u/c)}{\Re \exp(-i\omega u/c)} = -\frac{\omega u}{c} \quad (28)$$

avec $\Im$ et $\Re$ indiquant la partie réelle et imaginaire respectivement.

Pour un mouvement du substratum entièrement cohérent avec c qui tend vers l'infini, l'hétérogénéité du sol affecte la cohérence des mouvements sismiques conformément à l'équation (19). La contribution de l'hétérogénéité de la couche de sol à la variabilité spatiale du mouvement aux distances de séparation de 50, 100, 200 et 500 m est présentée sur la figure (6) ; les valeurs de la fonction de corrélation spatiale utilisées sont celles de $\tilde{C}_{\omega\omega}(u)$ (équation 15).

Les cohérences sur la figure (6) s'atténuent au voisinage du premier mode propre du sol et gardent des valeurs constantes proches de la corrélation parfaite lorsque la fréquence

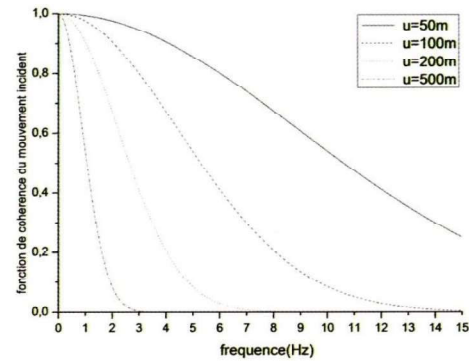


Fig.5. Variation de la perte de cohérence du mouvement incident avec la distance de séparation.

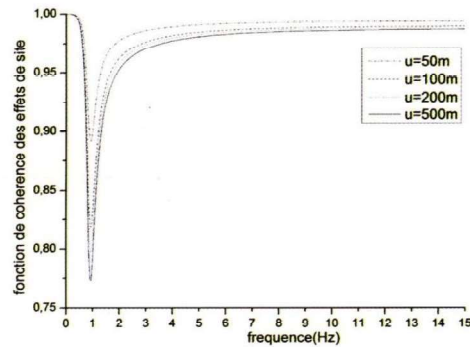


Fig.6. Variation de la cohérence des effets de site avec la distance de séparation.

augmente au-delà. Ces valeurs diminuent avec la distance de séparation.

Le comportement de la cohérence sur la figure 6 s'explique par le fait que la couche du sol répond au mouvement incident comme un ensemble d'oscillateurs à un degré de liberté avec des fréquences propres qui varient doucement autour de ω_0 et qui sont corrélées. Cette corrélation diminue avec la distance de séparation (équation 15, figure 3). Lorsque les fréquences de l'excitation sont proches de la valeur moyenne de la fréquence propre des oscillateurs, la réponse du système est affectée par la variabilité de cette valeur propre ce qui induit une perte de cohérence à son niveau. Lorsque la fréquence augmente au-delà de la fréquence propre du sol, le mouvement devient plus ou moins cohérent. Cette cohérence est une fonction de la corrélation des fréquences propres des oscillateurs qui est à son tour dépendante de la distance de séparation des oscillateurs.

L'amplitude de la fonction cohérence totale (équation 27) qui décrit la perte de cohérence seule est représentée sur la figure 7. Il est à noter à partir de la figure que la forme globale de la cohérence est contrôlée par le mouvement incident ; l'hétérogénéité du site provoque un "creux" sur le graphe de la cohérence au voisinage de la valeur moyenne de la fréquence prédominante du sol, aussi, elle entraîne une infime diminution de la cohérence lorsque la fréquence augmente au-delà de la fréquence propre du sol. La contribution de la couche de sol diminue avec la distance.

La fonction de cohérence avec et sans l'effet du site est en accord avec les observations antérieures effectuées sur les différents réseaux d'accélérographes qui indiquent que la variabilité des conditions locales du site ne puisse pas particulièrement influencer la structure de corrélation globale du mouvement total [22]. Ceci justifie aussi l'utilisation des modèles de la fonction de cohérence avec des paramètres obtenus à partir des enregistrements en surface (tel que le modèle de Luco et Wong) pour décrire la fonction de cohérence du mouvement incident. Cependant, la chute dans la fonction de cohérence au niveau de la fréquence propre du sol est bien marquée.

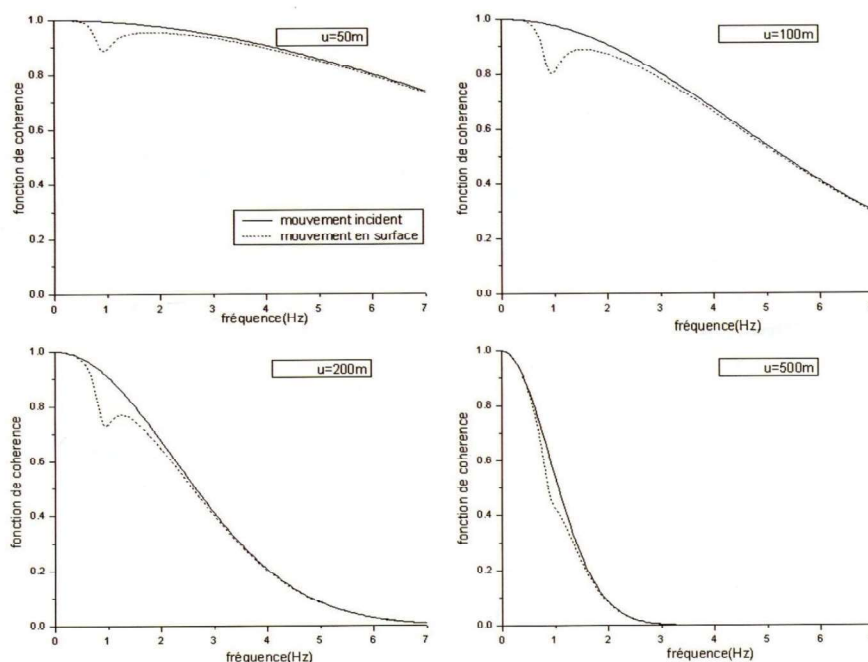


Fig.7. Variation de la cohérence totale (du mouvement incident et du site).

La fonction de cohérence avec et sans l'effet du site est en accord avec les observations antérieures effectuées sur les différents réseaux d'accélérographes qui indiquent que la variabilité des conditions locales du site ne puisse pas particulièrement influencer la structure de corrélation globale du mouvement total [22]. Ceci justifie aussi l'utilisation des modèles de la fonction de cohérence avec des paramètres obtenus à partir des enregistrements en surface (tel que le modèle de Luco et Wong) pour décrire la fonction de cohérence du mouvement incident. Cependant, la chute dans la fonction de cohérence au niveau

de la fréquence propre du sol est bien marquée. Cette chute dans la fonction de cohérence a été déjà remarquée par Kanasewish [23] qui a suggéré que les résonances du site puissent être identifiées à partir des creux dans le spectre de cohérence des mouvements pour des petites distances de séparation. Cranswick [24] a aussi indiqué que les perturbations avec des petites variations dans les caractéristiques du sol pouvaient induire de grands changements sur les fonctions de transfert, et comme la cohérence est une mesure de la similarité des mouvements, elle serait faible au voisinage de la fréquence de résonance. Liao et Li [17] ont

répétitive de ce phénomène de chute aux enregistrements sismiques. La légère diminution de la cohérence lorsque la fréquence de l'excitation augmente au-delà de la fréquence propre du sol est due à la corrélation partielle des paramètres du sol. La présente approche considère que l'effet de site résulte de la réponse de différentes colonnes du sol qui transmettent l'excitation à la surface. Ces colonnes sont assimilées à un ensemble d'oscillateurs à un degré de liberté avec des paramètres corrélés. Cette corrélation est une fonction de la distance de séparation des oscillateurs.

Une comparaison a été faite entre le modèle développé dans cet article et celui de A. Zerva et T. Harada [11], les résultats de la comparaison des cohérences des effets du site pour les distances de séparation de 50, 100, 200 et 500 m sont représentés

dans la figure 8. Le modèle développé dans cette étude s'accorde avec le modèle de Zerva et Harada pour la proportion de la chute de la cohérence au niveau de la fréquence propre du sol, néanmoins, la cohérence estimée par Zerva et Harada garde une valeur constante proche de la corrélation parfaite lorsque la fréquence augmente au-delà de la fréquence propre du sol. Cette valeur est la même pour les différentes distances de séparation ce qui est discordant avec le modèle développé ici où la corrélation entre les paramètres du sol est en fonction de la distance de séparation, ce qui mène à une cohérence dépendante de la distance de séparation.

3. Calcul des déformations du sol

Généralement, l'évaluation des déformations du sol pour l'analyse des

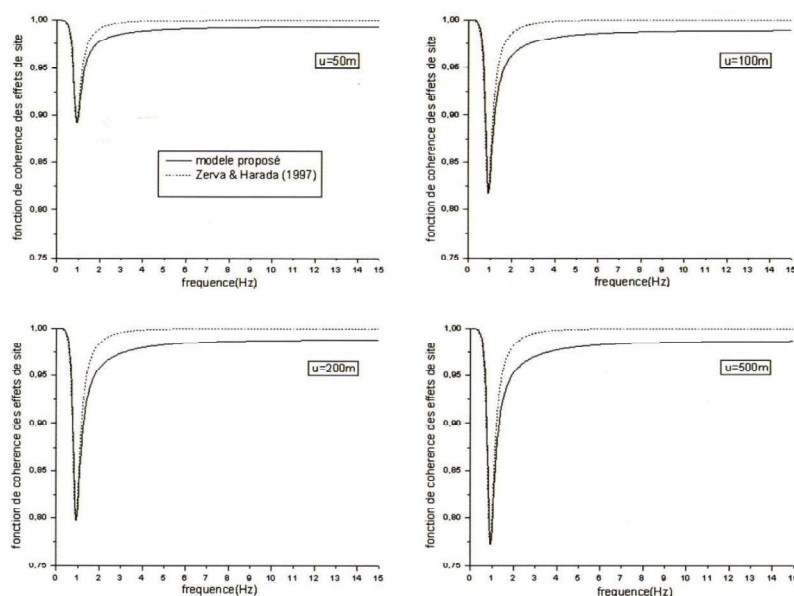


Fig.8. Comparaison entre le modèle proposé de la fonction de cohérence des effets de site et celui du Zerva et Harada (1997).

structures étendues est basée sur l'hypothèse que le mouvement sismique peut être approché par une onde se propageant d'une façon invariable sur la surface du sol avec une vitesse de propagation apparente c , i.e., l'effet de l'incohérence des mouvements n'est pas considéré. Une estimation du maximum des déformations $\varepsilon_{\max}$ est obtenue à partir de :

$$\frac{\varepsilon_{\max}}{v_{\max}} = \frac{1}{c} \quad (29)$$

où $v_{\max}$ est la vitesse maximale à un point à la surface du sol.

Les effets de la propagation des ondes, l'incohérence

du mouvement incident et l'hétérogénéité du sol sur la déformation de celui-ci seront analysés dans ce qui suit.

La variance des déformations horizontales le long de la direction de propagation des ondes à la surface du sol est de :

$$\sigma_{ee}^2 = C_{ee}(u, \tau) \Big|_{u=0, \tau=0} \quad (30)$$

où $C_{ee}(u, \tau)$ est la fonction de corrélation des déformations horizontales, et comme la déformation est la dérivée du déplacement, la corrélation des déformations sera :

$$C_{ee}(u, \tau) = -\frac{\partial^2 C_{xy}^{tot}(u, \tau)}{\partial u^2} \quad (31)$$

La fonction d'intercorrélation des mouvements sismiques à la surface du sol $C_{xy}^{tot}(u, \tau)$ est définie :

$$C_{xy}^{tot}(u, \tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xy}^{tot}(u, \omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (32)$$

L'écart type d'une quantité aléatoire fournit des informations sur sa valeur maximale moyenne car les valeurs de l'écart type sont proportionnelles aux valeurs maximales moyennes.

À partir des équations (30-32) et en remplaçant l'inter-DSP par son expression, on obtient :

$$\sigma_{ee}^2 = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial^2}{\partial u^2} [H_1(\omega) + C_{\omega\omega}(u)H_2(\omega)] \times \exp(-\alpha^2 \omega^2 u^2) \cdot \exp\left(-\frac{i\omega u}{c}\right) S_{xx}^i(\omega) d\omega \Big|_{u=0} \quad (33)$$

où $S_{xx}^i(\omega)$ est la densité spectrale des mouvements incidents.

Comme on a besoin des dérivées de la fonction de corrélation spatiale $C_{\omega\omega}(u)$ pour $u = 0$, son expression analytique est utilisée. En supposant que $S_{xx}^i(\omega)$, la densité spectrale des accélérations des mouvements incidents est une fonction qui varie lentement en fonction de la fréquence et, sachant que $H_1(\omega)$ et $H_2(\omega)$ sont des fonctions paires, l'équation (33) devient :

$$\sigma_{ee}^2 = \frac{S_{xx}^i(\omega_0)}{\pi} \left\{ \begin{aligned} &(2\alpha^2 + 1/c^2) \times \\ &\left[\int_0^{+\infty} \frac{H_1(\omega)}{\omega^2} d\omega \right. \\ &\quad \left. + \sigma_{\omega\omega}^2 \int_0^{+\infty} \frac{H_2(\omega)}{\omega^2} d\omega \right] \\ &\quad \left. - \sigma_{\omega\omega}^2 f_{\omega\omega}''(0) \int_0^{+\infty} \frac{H_2(\omega)}{\omega^4} d\omega \right] \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

$$\text{où } f_{\omega\omega}''(0) = \frac{C_{\omega\omega}''(0)}{\sigma_{\omega\omega}^2} \quad (35)$$

La variance des vitesses du mouvement sismique (vitesses d'une particule) s'écrit :

$$\sigma_{vv}^2 = -\frac{\partial^2 C_{xy}^{tot}(u, \tau)}{\partial \tau^2} \Big|_{u=0, \tau=0} \quad (36)$$

Donc,

$$\sigma_{vv}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega^2 S_{xy}^{tot}(u, \omega) d\omega \Big|_{u=0} \quad (37)$$

De la même manière pour le calcul de la variance des déformations, la variance des vitesses du mouvement sismique devient :

$$\sigma_{vv}^2 = \frac{S_{xx}^i(\omega_0)}{\pi} \left\{ \int_0^{+\infty} \frac{H_1(\omega)}{\omega^2} d\omega + \sigma_{\omega\omega}^2 \int_0^{+\infty} \frac{H_2(\omega)}{\omega^2} d\omega \right\} \quad (38)$$

À partir des équations (34) et (38), le rapport de l'écart type des déformations sur celui des vitesses sera :

$$\frac{\sigma_{ee}}{\sigma_{vv}} = \sqrt{\frac{(2\alpha^2 + 1/c^2) + \frac{6\sigma_{\omega\omega}^2}{b_{\omega}^2} \times \int_0^{+\infty} \frac{H_2(\omega)}{\omega^4} d\omega}{\int_0^{+\infty} \frac{H_1(\omega)}{\omega^2} d\omega + \sigma_{\omega\omega}^2 \int_0^{+\infty} \frac{H_2(\omega)}{\omega^2} d\omega}} \quad (39)$$

Moyennant le calcul numérique de l'équation (39), la figure 9 représente l'écart-type des déformations du sol normalisé par rapport à celui des vitesses en fonction de la vitesse de propagation apparente à la surface du sol c . L'équation (39) intègre les contributions des effets de propagation, d'incohérence et des conditions locales des sites. Dans le cas d'absence de la couche de sol (ou couche de sol avec des caractéristiques déterministes), les effets du mouvement incident seul seront :

$$\frac{\sigma_{ee}}{\sigma_{vv}} = \sqrt{(2\alpha^2 + 1/c^2)} \quad (40)$$

Les effets du site seuls sur le rapport σ_{ee}/σ_{vv} sont obtenus en mettant $\alpha = 0$ à l'équation (39).

La forme des courbes dans la figure 9 est en accord avec les études portant sur l'analyse des déformations du sol lors du séisme de SAN FERNANDO en 1971 [25] ainsi qu'avec des

simulations des déformations et des vitesses sismiques [20, 11]. Au niveau des faibles vitesses de propagation, la déformation due au mouvement incident n'est pas affectée par la perte de cohérence du mouvement ; elle est en accord avec l'approximation que l'on fait dans la pratique : considérer la déformation égale au rapport de la vitesse sismique du sol sur la vitesse apparente de propagation. Quand les ondes de volumes sont prédominantes (i.e. au niveau des grandes vitesses de propagation) comme c'est le cas pour les ondes de cisaillement, l'effet de la perte de cohérence sur les déformations devient significatif. Concernant la déformation due au mouvement total (à la surface du sol), l'effet de la perte de cohérence est marqué même au niveau des faibles vitesses de propagation et par conséquent, l'effet de l'hétérogénéité de la couche de sol aussi. Ainsi, quand le mouvement est dominé par les ondes de surfaces, l'approximation $\varepsilon/v = 1/c$ sous-estime légèrement la déformation du sol. Cette sous-estimation est considérable quand le mouvement est dominé par les ondes de volume. Pour le sol meuble considéré dans cette étude, la contribution de l'hétérogénéité du sol contrôle essentiellement ses déformations. Cet effet n'était pas effectivement évident à partir de la variabilité spatiale des mouvements (figure 7).

A partir de la figure 9, lorsque la vitesse apparente c_r augmente au-delà d'une valeur critique, la déformation due au mouvement total est essentiellement constante et contrôlée par les effets d'incohérence. Cette valeur critique est approximativement égale à 1000 m/s, pour

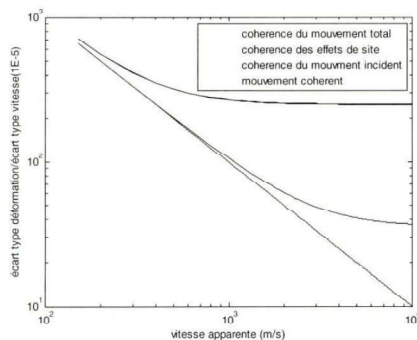


Fig.9. Variation du rapport de l'écart type des déformations sur celui des vitesses en fonction de la vitesse de propagation apparente.

$c < c_r$, il existe une région de transition où les effets de la propagation commencent à contribuer aux déformations qui se mettent à augmenter jusqu'à

ce qu'elles deviennent, approximativement, proportionnelles à l'inverse de la vitesse de propagation. La figure 9 confirme que les valeurs les plus élevées de la déformation sont obtenues au niveau des faibles vitesses de propagation (i.e. les effets de la propagation peuvent être plus significatifs pour la réponse des structures étendues dans les régions où les ondes de surface sont prédominantes). Evidemment, les effets combinés de la cohérence du mouvement incident avec celle de la couche de sol donnent les plus grandes valeurs de déformations.

4. Conclusion

La variabilité spatiale des mouvements sismiques a des effets significatifs sur la réponse des structures étendues. Sa caractérisation est importante pour une analyse fiable de ces structures.

Une approche analytique de la fonction de cohérence des mouvements sismiques due à l'hétérogénéité des sols surmontant un substratum est développée. Le modèle proposé représente l'effet du passage d'onde par une différence de phase, i.e. vitesse apparente de propagation constante, ce qui est généralement le cas pour les ondes de cisaillement. La perte de cohérence est modélisée par la fonction de Luco et Wong qui est très largement utilisée. L'analyse est centrée sur l'effet du site qui est fondé sur l'hypothèse de la propagation verticale des ondes S à travers une couche du sol à propriétés aléatoires.

Il a été démontré que la forme générale de la fonction de cohérence était contrôlée par le mouvement incident, la contribution du site quant à elle est concentrée au voisinage de la fréquence prédominante et provoque un "creux" sur le graphe de la cohérence, aussi, elle entraîne une infime diminution de la cohérence lorsque la fréquence augmente au-delà de la fréquence propre du sol. En outre, l'évaluation des déformations du sol meuble à partir du modèle proposé a indiqué que l'hétérogénéité de la couche de sol influence les valeurs des déformations. Cette influence est marquée considérablement aux niveaux des grandes vitesses de propagation d'ondes sismiques, i.e. les ondes de volume.

Les résultats de cette analyse révèlent l'importance de la prise en compte de l'hétérogénéité de la couche de sol dans l'étude de la variabilité spatiale des mouvements sismiques. Dans le cas où la description de la variabilité spatiale est requise et les données sismiques du site ne sont pas disponibles, le modèle analytique proposé peut être utilisé. Les mouvements de rocking et de torsion en champ libre induits par la variabilité

spatiale des mouvements sismiques ont des effets considérables sur les structures d'où la nécessité de dériver des formules simples pour introduire ces effets dans l'analyse des structures.

Références

- [1] Abrahamson, N., Schneider, J.F. & Stepp, J.C. Empirical spatial coherency functions for applications to soil-structure interaction analyses. *Earthquake Spectra*. 1991. 7. 1-27.
- [2] Feng, Q. & Hu, Y. Spatial correlation model of ground motion. *Earthquake Engineering and Engineering vibration*. 1981. 1 (2). 1-8.
- [3] Loh, C. H. Analysis of the spatial variation of seismic waves and ground movements from SMART I data. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1985. 13. 561-581.
- [4] Loh, C. H. & Lin, S. G. Directionality and simulation in spatial variation of seismic waves. *Engineering Structures*. 1990. 12 (4). 134-143.
- [5] Nakamura, H. & Yamazaki, F. Spatial variation of Earthquake ground motion based on dense array records. *Transaction of the 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology* 1995. 3. 19-24.
- [6] Zerva, A. & Zervas, V. Spatial variation of seismic ground motions: An overview. *Appl Mech Rev*. 2002. 55. no3. 271-297.
- [7] Novak, M. & Hindy, A. Seismic response of buried pipelines, 3rd canadian conference on earthquake engineering, Montreal Canada. 1979.
- [8] Hindy, A. & Novak, M. Response of pipelines to random ground motion. *J. Eng. Mech. Div*. 1980. 106. 339-360.
- [9] Harichandran, R.S. & Vanmarcke, E.H. Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*. 1986. 112. 154-174.
- [10] Somerville, P. G. McLaren, J. P. Saikia, C. K. & Helmberger, D.V. Site-specific estimation of spatial incoherence of strong ground motion, in: L. J. Von Thun (Ed.), *Proc. Earthquake Engineering and Soil Dynamics II Conf. ASCE, Geotechnical Special Publication No. 20*. 1988. 188-202.
- [11] Zerva, A. & Harada, T. Effect of surface layer stochasticity on seismic ground motion coherence and strain estimates. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 1997. 445-457.
- [12] Der Kiureghian, A. A coherency model for spatially varying ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1996. 99-111.
- [13] Laouami, N. & Labbe, P. Analytical approach for evaluation of seismic ground motion coherency function. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2001. 727-733.
- [14] Luco, J.E. & Wong, H.L. Response of a rigid foundation to a spatially random ground motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1986. 891-908.
- [15] Riepl, J. Effets de site: Evaluation expérimentale et modélisations multidimensionnelles. Application au site test EURO-SEISTEST (Grèce). Mémoire de thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, Grenoble. novembre 1997.
- [16] DING, H. P. LIU, Q. f. JIN, X. & YUAN, Y.F. A coherency function model of ground motion at base rock corresponding to strike-slip fault. *Acta Seismologica Sinica* 2004. 17 No.1. 64-69.
- [17] S. Liao & J. Li stochastic approach to site-response component in seismic ground motion coherency model; *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 22 (2002) 813-820
- [18] Kanai, K. Semi empirical formula for the seismic characteristics of the ground. *Bulletin of the earthquake research institute, 35*. Tokyo: university of Tokyo. 1957. 309-25.
- [19] Der Kiureghian, A. & Neuenhofer, A. Response spectrum method for multiple-support seismic excitation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1992. 713-740.
- [20] Zerva, A. Spatial incoherence effects on seismic ground strains. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 1992. 7. 217-226.
- [21] Zerva, A. Response of multi-span beams to spatially incoherent seismic ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1990. 819-832.
- [22] Schneider, J.F. Stepp, J.C. & Abrahamson, N.A. The spatial variation of earthquake ground motion and effects of local site conditions, in: *Proceedings of the Fourth US-National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs. CA 1990.
- [23] Kanasewich, E.R. *Time Sequence Analysis in Geophysics*. University of Alberta Press. Edmonton. Alberta. 1981.
- [24] Cranswick, E. The information content of high-frequency seismograms and the near surface geologic structure of hard rock recording sites. *Pure and Applied Geophysics*. 1988. 333-363.
- [25] O'Rourke, M. J. Castro, G. & Hossain, I. Horizontal strain due to seismic waves. *Journal of Geotechnical Engineering. ASCE*. 1984. 110. 1173-1187.