

Simulation des signaux sismiques variables dans l'espace en prenant en compte l'effet d'amplification du site

**R. DERBAL^{ab}, N. BENMANSOUR^a, M. DJAFOUR^a, M. MATALLAH^a,
S. IVORRA^c,**

- a. RiSk Assessment & Management Laboratory (RISAM), University of Tlemcen, Algeria.
Email: r.dermal@yahoo.fr
- b. Department of Civil Engineering, Ctr. Univ. Ain Temouchent, Ain Temouchent, Algeria.
- c. Department of Civil Engineering, University of Alicante, San Vicente del Raspeig,
Apartado 99, 03080, Spain

Résumé :

L'évaluation de la réponse sismique des structures étendues consiste à estimer le mouvement du sol qui pourrait résulter d'un tremblement de terre. Un tel mouvement sismique est variable dans l'espace et dans le temps. Le mouvement du sol observé à la surface résulte de la combinaison de la propagation des ondes sismiques entre la source et le site, et particulièrement les conditions géotechniques locales du site. Ces facteurs doivent être pris en considération lors de la représentation du chargement sismique appliqué à des structures étendues. L'objectif principal de ce travail consiste à la simulation des signaux sismiques en prenant en compte l'ensemble des facteurs de la variabilité spatiale des mouvements du sol en particulier les conditions locales du site. Une technique de simulation des mouvements sismiques variables dans l'espace est proposée en utilisant la méthode de représentation spectrale. En adoptant l'approche de simulation inconditionnelle, le mouvement sismique au substratum rocheux est modélisé par la fonction de densité spectrale de puissance de Kanai-Tajimi filtrée et un modèle d'incohérence empirique. Ensuite, les mouvements sismiques en surface sont calculés en considérant l'effet d'amplification du site. Les résultats ont montré que le fait de considérer un site homogène, c.à.d. négliger les conditions locales du site, peut conduire à une sous-estimation de l'action sismique appliquée à la structure que ce soit dans le domaine temporel ou fréquentiel.

Abstract :

The evaluation of the seismic response of extended structures consists to estimate the earthquake ground motion which is variable in space and time. The ground motion observed at the surface results from the combination of the seismic wave propagation between the source and the site, and particularly the local geotechnical site conditions. These factors must be taken into account of a representation of seismic loading applied to extended structures. The main objective of this work consists in simulation of seismic signals taking into account all the factors of the spatial variability of ground motion, especially local site conditions. A technique for simulating spatially variable seismic ground motion is proposed using

the spectral representation method. Adopting an unconditional simulation approach, the seismic ground motion at the bedrock is modeled by the filtered Kanai-Tajimi power spectral density function and an empirical loss coherency model. Then, the ground motion at the surface are calculated considering the site amplification effect. The results showed that considering a homogeneous site, i.e. neglecting the local site conditions, can lead to an underestimation of seismic excitation, whether in the time or frequency domain.

Mots clefs : mouvement sismique – variabilité spatiale – propagation des ondes – conditions géologiques locales du site – amplification du site.

1 Introduction

A l'issue d'un tremblement de terre, la réponse sismique des structures étendues peut être aléatoire. Cela peut être dû principalement à la variabilité spatiale et temporelle du mouvement sismique. Cette variabilité résulte de la combinaison de la propagation des ondes sismiques entre la source et le site à travers un massif de sol qui est un milieu de nature très complexe. Les principaux facteurs de cette variabilité spatiale du mouvement sismique ont été résumés par Der Kiureghian, 1996 [1]. Le premier facteur est l'effet de passage d'onde, qui est dû au décalage temporel du temps d'arrivée des ondes sismiques aux différents supports de fondation d'une structure, du fait de leur vitesse de propagation. Le second facteur est l'effet d'incohérence, qui résulte des différences aléatoires dans les amplitudes et les phases des ondes sismiques dues aux réfractions et réflexions multiples qui se produisent durant leurs propagations le long de leurs trajets. Le dernier facteur est l'effet de site qui est dû à la variation spatiale des caractéristiques locales du profil de sol qui affectent l'amplitude et le contenu fréquentiel de l'onde sismique.

La variabilité spatiale et temporelle du mouvement sismique était définie que par un modèle d'incohérence et par l'effet de passage d'onde. Ces deux effets résultent de la propagation des ondes sismiques dans le sol. Plusieurs travaux ont été réalisés dans ce sens en adoptant l'hypothèse d'un site uniforme et homogène [2 à 6]. Ces dernières années, de nombreuses études sur la variabilité spatio-temporelle du mouvement sismique (SVGM) en considérant l'effet de site ont été entreprises [7 à 13].

Au niveau l'étude menée par Bi et al. 2010 [7], la réponse sismique d'un portique d'un pont est étudiée en adoptant la variabilité spatiale du mouvement sismique. Cette dernière est définie par un modèle de cohérence empirique déduit des enregistrements du réseau SMART1. L'effet de site est pris en compte dans cette étude sous forme d'un sol reposant sur le substratum rocheux. Le mouvement sismique à la base rocheuse est défini par la fonction de densité spectrale de puissance Tajimi-Kanai filtrée. Tandis que les signaux sismiques à la surface sont calculés en utilisant l'amplification du site considéré. Cette dernière dépend des paramètres du sol adoptés sous chaque support du pont. Une étude paramétrique en fonction des profondeurs et des propriétés du sol est également réalisée. Les résultats ont montré que l'amplification des signaux sismiques est liée directement à l'effet de site. Ainsi, une représentation réelle de l'input sismique adoptant l'effet de la variabilité spatiale du mouvement sismique doit prendre en considération l'effet d'amplification résultant de l'effet de site.

La prédiction de la réponse des structures étendues sous un chargement sismique qui tient en compte l'effet de la variabilité spatiale et temporelle du mouvement du sol est un enjeu important. Pour cette raison, quelques chercheurs ont développé des méthodes de simulation des signaux sismiques tenant en compte l'effet de la variabilité spatiale et temporelle du mouvement de sol.

En effet, Benmansour et al. 2013 [14] ont développé une technique de génération des signaux sismiques variables dans l'espace et dans le temps. Cette technique se base sur la méthodologie de représentation spectrale mise en place par Shinozuka 1971 [15]. Au niveau de la méthode de simulation des signaux sismiques développée, les signaux générés peuvent être obtenus en accélération, en vitesse ou même en déplacement sans passer par l'intégration.

Une étude d'investigation a été entreprise par Benmansour et al. [2-3]. Elle consistait à comparer la méthode proposée par le règlement parasismique des ouvrages d'art (RPOA 2008) [16] avec des approches plus raffinées et avec les dispositions de l'Eurocode 8. Les résultats obtenus ont montré que la méthode simplifiée proposée dans le RPOA 2008 surestime la demande sismique. Afin d'obtenir des résultats semblables aux autres méthodes, ils préconisent que quelques dispositions doivent être modifiées.

Un autre travail a été présenté par Bi et al. 2012 [8], où une méthode de génération des signaux sismiques présentée en considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique. La théorie de propagation des ondes, présentée par Wolf 1985, a été utilisée pour définir l'effet de site. Les signaux sismiques à la base rocheuse sont supposés être composés d'ondes SH (hors plan) ou une combinaison d'onde P et SV considérant un angle incident donné. Ces signaux sont définis par la fonction de densité spectrale de Kanai-Tajimi et par un modèle de cohérence empirique. Les résultats ont montré que la méthode proposée est caractérisée par une modélisation réaliste des mouvements sismiques variables dans l'espace en adoptant des paramètres variables du site par rapport à l'hypothèse d'intensité identique des mouvements sismiques.

L'étude de l'influence de l'effet de la variabilité spatiale du mouvement sismique sur le comportement dynamique du pont suspendu du Bosphore a été présentée par Adanur et al. 2016 [9]. Ils ont utilisé les vibrations aléatoires basées sur une approche d'analyse spectrale et deux méthodes de spectre de réponse. La variabilité spatiale du mouvement du sol prend en considération les effets de l'incohérence, du passage d'onde et la réponse du site. Afin de définir la fonction de densité spectrale de puissance et les valeurs caractérisant le spectre de réponse choisi, ils ont utilisé les enregistrements du tremblement de terre de Kocaeli (Turquie) du 17 août 1999. En conclusion, ils ont observé que la réponse sismique de la structure pour chaque analyse de vibration aléatoire est directement liée à l'intensité et au contenu fréquentiel de la fonction de densité spectrale de puissance adoptée.

Shiravand et Parvanehro 2019 [10] ont fourni des résultats comparatifs de ponts à haubans soumis à des excitations différentielles (tenant en compte l'effet de la variabilité spatiale du mouvement de sol) et uniformes. Vingt chargements sismiques ont été générés en adoptant quatre différentes classes de sol. Les résultats de leurs recherches indiquent que, selon le type de sol, la réponse du pont peut varier considérablement.

Les récentes recherches en matière de variabilité spatiale et temporelle du mouvement sismique ont montré que le fait de négliger l'effet du site entraîne une sous-estimation des excitations sismiques considérées [7 à 13].

L'objectif principal de cette étude est de quantifier l'amplification des mouvements sismiques qui peut résulter quand un mouvement sismique variable dans l'espace est considéré. Cette amplification est directement liée à l'effet de site qui doit être pris en compte dans la définition d'un chargement sismique différentiel. Un modèle de simulation des signaux sismiques tenant en compte l'ensemble des facteurs de la variabilité spatiale du mouvement de sol est présenté.

2 Description des mouvements sismiques variables

2.1 Effet d'incohérence

Les mouvements sismiques variables dans l'espace sont généralement modélisés d'une manière probabiliste par des champs stochastiques. La variabilité de ces signaux sismiques peut être mesurée dans le domaine fréquentiel en utilisant des fonctions statistiques du second ordre. L'effet d'incohérence est défini par la fonction suivante [9-17] :

$$\gamma_{jk}(\omega) = \frac{S_{jk}(\omega)}{\sqrt{S_j(\omega)S_k(\omega)}} \quad (1)$$

Avec : ω est la fréquence angulaire. $S_j(\omega)$ et $S_k(\omega)$ sont les fonctions de densité spectrale de puissance des processus stationnaires $g_j(t)$ et $g_k(t)$, respectivement. $S_{jk}(\omega)$ est la fonction d'inter-densité spectrale de puissance entre deux mouvements

La fonction de cohérence peut avoir la forme suivante :

$$\gamma_{jk}(\omega) = |\gamma_{jk}(\omega)| \exp\left(-i \frac{\omega d_{jk}}{V_a}\right) \quad (2)$$

d_{jk} est la distance horizontale projetée le long de la direction de propagation des ondes (entre le point j à le point k) et V_a est la vitesse apparente des ondes.

2.2 Effet de passage d'onde

L'effet de passage d'onde est introduit en post génération en appliquant un décalage temporel. La valeur de ce décalage dépend de la distance d_{jk} et de la vitesse de propagation apparente V_a et elle est égale à [1-14] :

$$D_T = d_{jk}/V_a \quad (3)$$

2.3 Effet de site

Considérant un point j' situé au substratum rocheux et sa projection verticale à la surface est le point j . La fonction de transfert pour la propagation d'onde de cisaillement dans une couche horizontale de sol est donnée par l'équation suivante [18] :

$$H_j(i\omega) = \frac{U_j(i\omega)}{U_{j'}(i\omega)} = \frac{(1+r_j-i\xi_j)\exp(-i\omega\tau_j(1-2i\xi_j))}{1+(r_j-i\xi_j)\exp(-2i\omega\tau_j(1-2i\xi_j))} \quad (4)$$

Où : ξ_j est le coefficient d'amortissement calculé à partir de la dissipation d'énergie due à la propagation des ondes sismiques. τ_j est le temps de propagation que fait l'onde du point j' au j et r_j est le coefficient de réflexion.

3 Technique de simulation des signaux sismiques variables

La simulation des signaux temporels stationnaires et variables dans l'espace a été réalisée en utilisant la méthode de représentation spectrale décrite par Deodatis, 1996 [19]. Rappelons que les points j' et k' sont localisés à la base rocheuse et leurs projection à la surface sont j et k .

En considérant un processus stationnaire $g_j(t)$; $j = 1, 2, \dots, n$. La matrice d'inter-densité spectrale de puissance au niveau du substratum rocheux $S_{j'k'}(\omega)$ par [1-14] :

$$S_{j'k'}(\omega) = [\sqrt{S_{j'}(\omega) S_{k'}(\omega)} \gamma_{j'k'}(\omega)] \quad j', k' = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

Ensuite, La matrice d'inter-densité spectrale de puissance au niveau de la surface $S_{jk}(\omega)$ est calculée et elle donnée par [7-12] :

$$S_j(\omega) = |H_j(i\omega)|^2 S_g(\omega) \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

$$S_{jk}(\omega) = H_j(i\omega)H_k^*(i\omega)S_{j'k'}(i\omega) \quad j \neq k \text{ et } j' \neq k' \quad (7)$$

L'indice « * » représente le conjugué complexe.

La matrice d'inter-densité spectrale de puissance à la surface $S_{jk}(\omega)$ est décomposée en utilisant la méthode de décomposition de Cholesky :

$$S_{jk}(\omega) = L(\omega)L^{T*}(\omega) \quad (8)$$

En utilisant les éléments réels et polaires de la matrice $L(\omega)$, les processus stochastiques stationnaires $g_j(t)$ sont simulés par la série suivante lorsque $N \rightarrow \infty$ [14] :

$$g_j(t) = 2 \sum_{m=1}^n \sum_{l=1}^N |L_{jm}(\omega)| \sqrt{\Delta\omega} \cos(\omega_l - \theta_{jm}(\omega_l) + \phi_{ml}) \quad (9)$$

Où : $\omega_l = l\Delta\omega$ et $\Delta\omega = \omega_u/N$

Sachant que N est le nombre de pas de fréquence angulaire pour atteindre la fréquence de coupure ω_u .

La variation temporelle **non stationnaire** des mouvements sismiques est exprimée en multipliant les signaux stationnaires simulés par la fonction d'enveloppe de Jennings [20], tel que :

$$f_j(t) = \zeta(t) \cdot g_j(t), \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

Avec :

$$\zeta(t) = \begin{cases} (t/t_0)^2 & 0 \leq t \leq t_0 \\ 1 & t_0 < t \leq t_n \\ \exp[-0.155(t - t_n)] & t_n < t \leq T \end{cases} \quad (11)$$

Où : $t_0 = 2$ s et $t_n = 10$ s.

4 Mouvement sismique au substratum rocheux

Le mouvement de sol au niveau du substratum rocheux est défini par la fonction de densité spectrale de puissance Tajimi-Kanai filtrée [21] :

$$S_g(\omega) = |H_p(\omega)|^2 S_0(\omega) = \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + (2\omega_f \omega \xi_f)^2} \cdot \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \Gamma \quad (12)$$

Avec : $|H_p(\omega)|^2$ est un filtre passe-haut. $S_0(\omega)$ est la fonction de densité spectrale de puissance Tajimi-Kanai. ω_g et ξ_g sont la fréquence centrale et le taux d'amortissement de la fonction de densité spectrale de puissance Tajimi-Kanai. Γ est un facteur d'échelle en fonction de l'intensité du mouvement sismique. ω_f et ξ_f sont la fréquence centrale et le taux d'amortissement du filtre passe-haut.

5 Exemple Numérique

Dans cette étude, le schéma proposé représente est une structure de pont supporté par trois piles. Les deux travées entre les piles ont une longueur égale à 100 m. Nous allons considérer trois points situés à la surface A_g , B_g et C_g et leurs projections au substratum rocheux A_b , B_b et C_b respectivement (voir Figure 1).

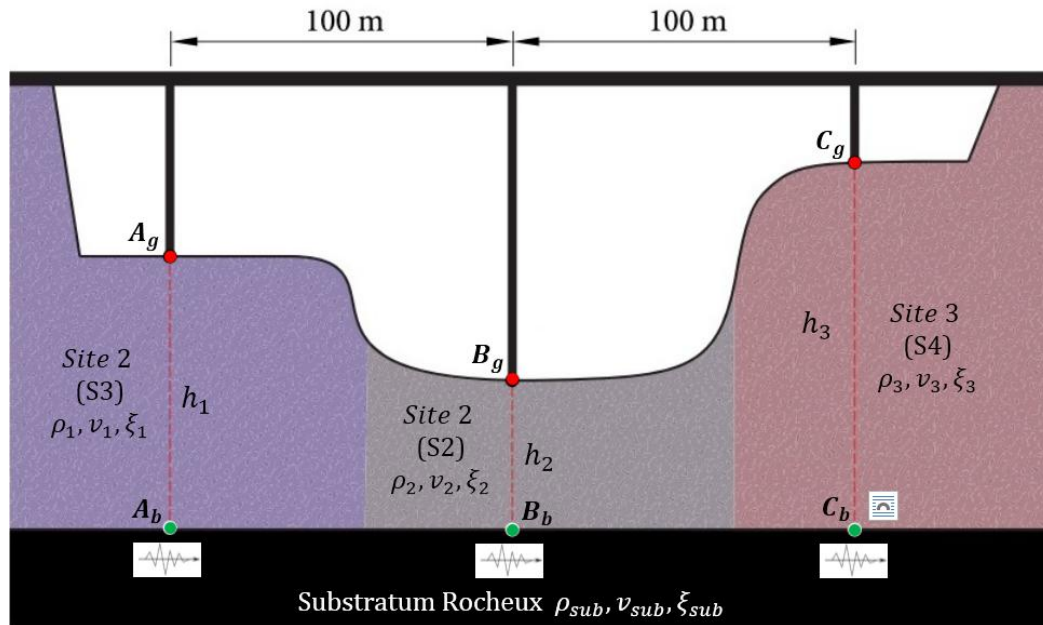


Figure 1. Schéma d'un pont implanté à des sites différents

Catégorie	Description	Vs (m/s)
S1	Rocheux	$V_s \geq 800$
S2	Ferme	$400 \leq V_s \leq 800$
S3	Meuble	$200 \leq V_s \leq 400$
S4	Très meuble	$100 \leq V_s \leq 200$

Tableau 1. Caractéristiques géotechniques des sites [16]

En se basant sur de la classification des sites décrite par le règlement parasismique des ouvrages d'art algérien (RPOA 2008) [16], trois type de site ont été choisis (voir tableau 1). Le premier site est ferme noté S2, le second est meuble noté S3 et le troisième est très meuble noté S4. La moyenne de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement sismiques a été adoptée. Les paramètres du substratum rocheux et des sites choisis sont donnés par le tableau 2.

Site 1 (S3)				Site 2 (S2)			
ρ_1 (KN/m ³)	v_1 (m/s)	ξ_1 (%)	h_1 (m)	ρ_2 (KN/m ³)	v_2 (m/s)	ξ_2 (%)	h_2 (m)
1800	300	6	20	2000	600	5	10
Site 3 (S4)				Substratum			
ρ_3 (KN/m ³)	v_3 (m/s)	ξ_3 (%)	h_3 (m)	ρ_{sub} (KN/m ³)	v_{sub} (m/s)	ξ_{sub} (%)	/
1500	150	7	30	3000	1500	5	/

Tableau 2. Paramètres des sites adoptés

Dans ce travail, les paramètres de la fonction de densité spectrale de puissance Tajimi-Kanai filtrée sont donnés par le tableau 3. L'accélération maximale (PGA) qui correspond à ces valeurs est $0.2g$, le déplacement maximal (PGD) est de 0.082 m et la durée du signal est 20 s [7-8]. Cette fonction de densité spectrale est illustrée par la [figure 2](#).

ω_g (Hz)	ξ_g	ω_f (Hz)	ξ_f	Γ (m^2/s^3)
10π	0.6	0.5π	0.6	0.0034

Tableau 3. Paramètres de la fonction de densité spectrale de puissance Tajimi-Kanai filtrée.

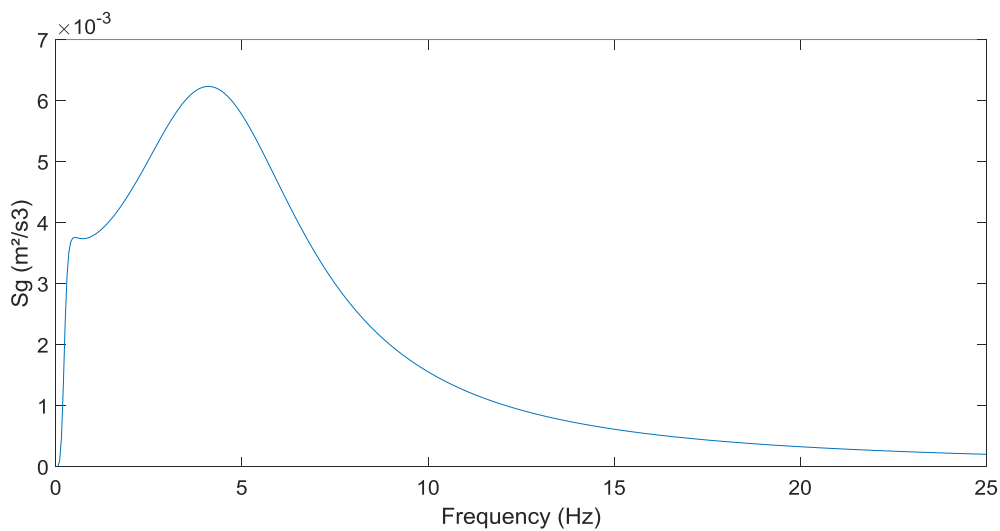


Figure 2. Fonction de densité spectrale de puissance Tajimi-Kanai filtrée.

Les fonctions de transfert des trois points A_g , B_g et C_g situés à la surface sont illustrées dans la [figure 3](#).

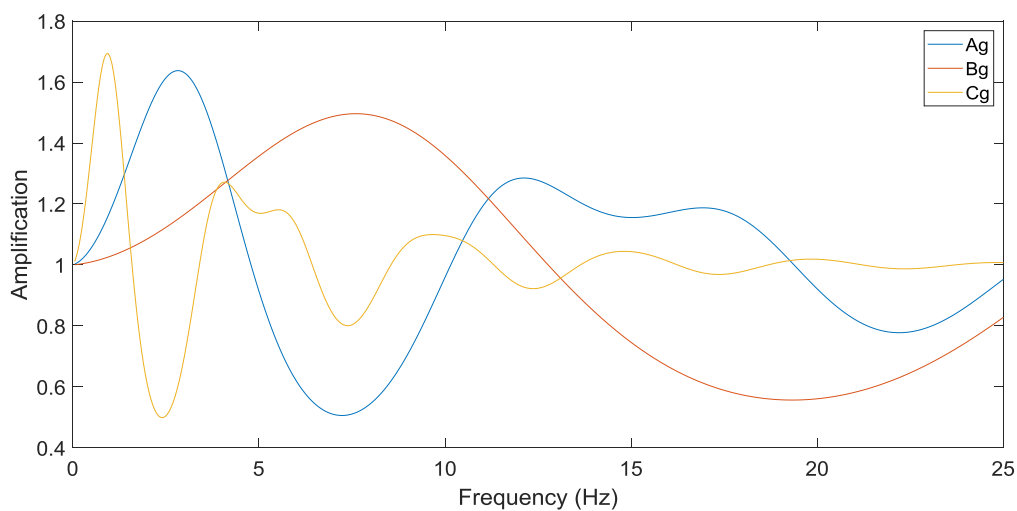


Figure 3. Fonctions de transfert au niveau des points à la surface

D'après la figure 3, on remarque que l'amplification maximale est enregistrée pour un sol très meuble au point C_g et elle est égale à 1.7 correspondant à une fréquence dominante de 0.95 Hz. Tandis que l'amplification la plus faible est mesurée pour un sol ferme au point B_g et sa valeur est de 1.5 correspondant à une fréquence dominante de 7.60 Hz.

Dans cette étude, un modèle de cohérence empirique est utilisé pour décrire le mouvement sismique entre les points situés au substratum rocheux. Ce modèle est celui de Hao [22] et il est donné par l'équation suivante :

$$\gamma_{A_b B_b}(i\omega) = |\gamma_{A_b B_b}(i\omega)| e^{i\omega d/V_a} = e^{-\beta d_{A_b B_b}} e^{-\alpha(\omega)\sqrt{d}\left(\frac{\omega}{2\pi}\right)^2} e^{i\omega d_{A_b B_b}/V_a} \quad (3)$$

$$\text{Avec : } \alpha(\omega) = \begin{cases} \left(\frac{2\pi a}{\omega}\right) + \left(\frac{b\omega}{2\pi}\right) + c & 0.314 \text{ rad/s} \leq \omega \leq 62.83 \text{ rad/s} \\ 0.1a + 10b + c & \omega > 62.83 \text{ rad/s} \end{cases} \quad (4)$$

Où : a, b, c et β sont des constantes et leurs valeurs correspondent à l'évènement 45 du réseau SMART 1. Ces valeurs sont données par le tableau 1 [7].

Cohérence	a	b	c	β
Correspond à l'évènement 45	3.583×10^{-3}	-1.811×10^{-5}	1.177×10^{-4}	1.109×10^{-3}

Tableau 4. Paramètres de la fonction de cohérence de Hao.

6 Résultats et Discussion

En utilisant la technique de simulation décrite ci-dessus, les signaux sismiques ont été générés en accélération et en déplacement. Quatre cas de simulation sont considérés :

- Le premier cas néglige la variabilité spatiale du mouvement sismique (SVGM) c.à.d. le cas uniforme. C'est le cas des méthodes classiques de calcul sismique des structures où les supports d'une structure étendue reçoivent un signal sismique identique et en même temps. Cette hypothèse est loin d'être réelle.
- Le second cas néglige l'effet de site c.à.d. seuls les effets de passage d'onde et de cohérence sont considérés. Ce cas sert à examiner la conséquence de ne pas prendre en compte l'effet de site dans la représentation du chargement sismique appliqué à une structure étendue.
- Le troisième cas ne prend en compte que l'effet de site c.à.d. que les effets de passage d'onde et de cohérence sont négligés. Ce chargement sismique est utilisé pour quantifier l'apport de l'effet de site seul dans la représentation du chargement sismique.
- Le quatrième cas consiste à prendre en compte tous les facteurs de la SVGM. C'est le cas de chargement sismique le plus réaliste. Dans ce cas, les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique (SVGM) sont combinés.

Ces cas de simulation des chargements sismiques sont schématisés dans le tableau 5.

Cas de chargement sismique	Variabilité spatiale du mouvement sismique (SVG M)		
	Incohérence des ondes sismiques	Passage d'onde	Effet de site
Uniforme	O	O	O
Négligeant l'effet de site	X	X	O
Ne considérant que l'effet de site	O	O	X
Considérant tous les facteurs de la SVG M	X	X	X

X : Facteur considéré O : Facteur négligé

Tableau 5. Cas de simulation des signaux sismiques (chargements sismiques)

En premier lieu, des signaux sont simulés aux points A_b , B_b et C_b , localisés au substratum rocheux en adoptant un mouvement du sol totalement cohérents. Cette procédure est réalisée pour caractériser et vérifier le signal sismique cible.

Les trois mouvements sismiques simulés sont illustrés aux figures 4 et 5 pour l'accélération et le déplacement, respectivement. Ces figures montrent que les trois signaux simulés se coïncident. L'accélération maximale (PGA) est 0.262g et le déplacement maximal (PGD) est égale à 0.11 m. nous remarquons que ces valeurs sont proches du PGA et PGD cibles définis ci-dessus.

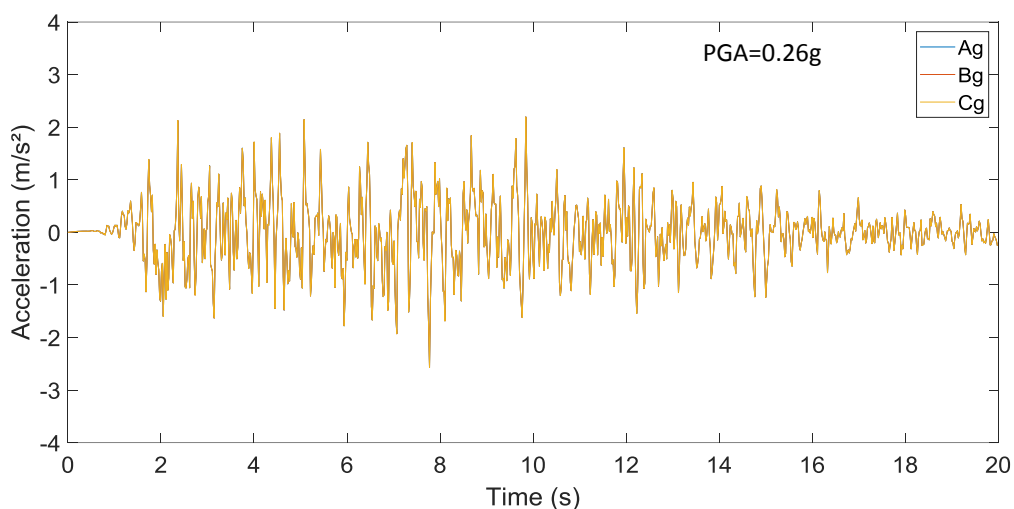


Figure 4. Accélérations simulées dans le cas uniforme

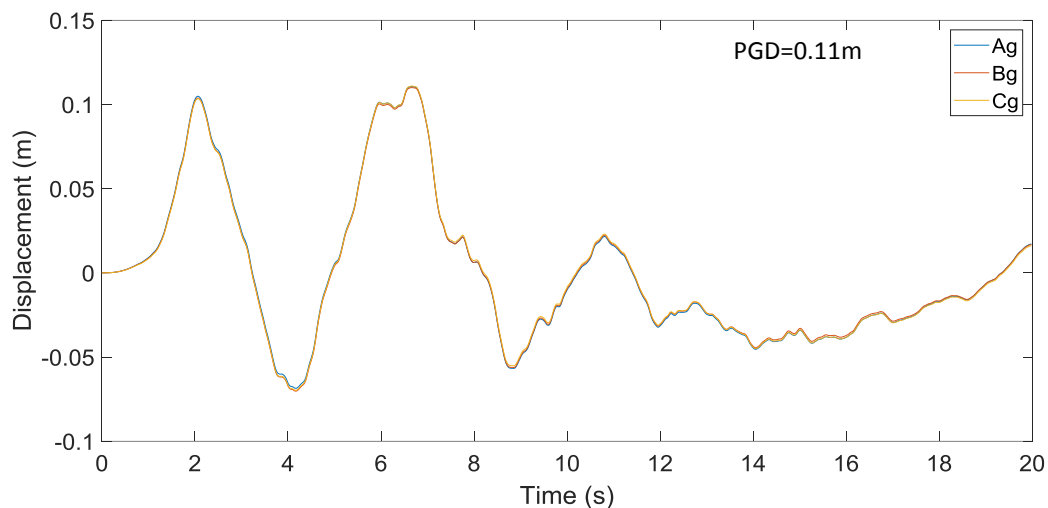


Figure 5. Déplacements simulés dans le cas uniforme

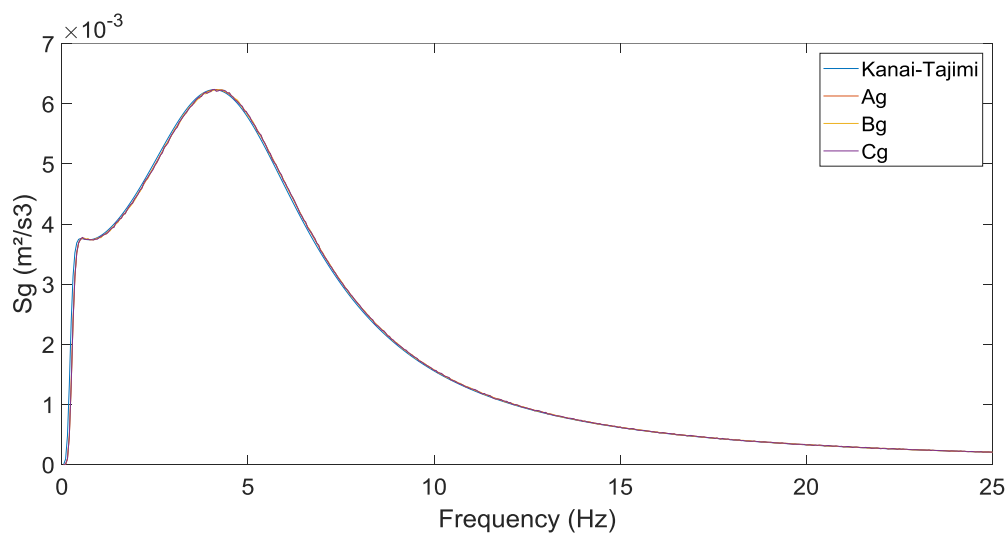


Figure 6. Comparaison de densités spectrale de puissance (signaux générés stationnaires)

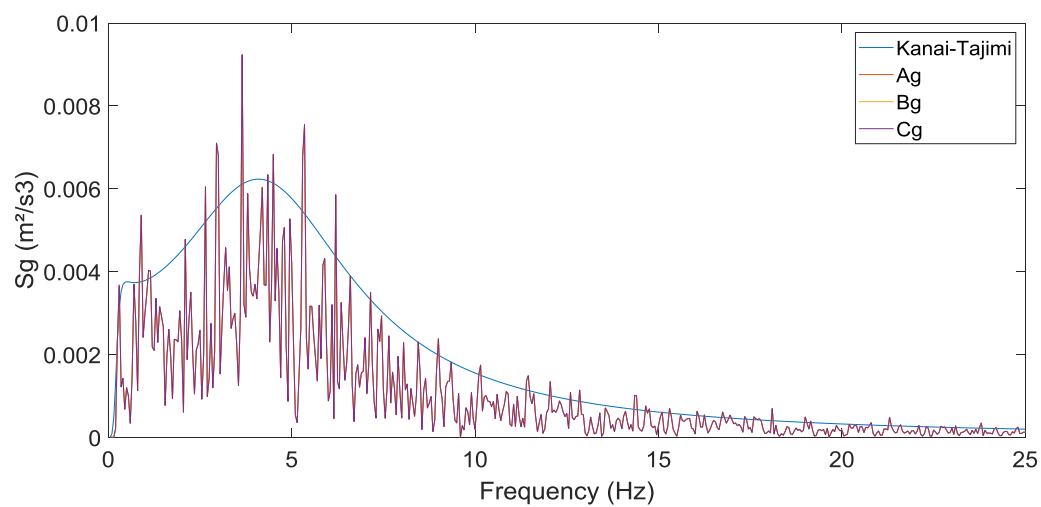


Figure 7. Comparaison de densités spectrale de puissance (signaux générés non stationnaires)

La comparaison des densités spectrales de puissance des signaux générés avec la fonction de densité spectrale filtrée de Tajimi-Kanai filtrée cible est illustrée par les figures 6 et 7. Elle montre que les densités spectrales de puissance des mouvements simulés correspondent au spectre cible.

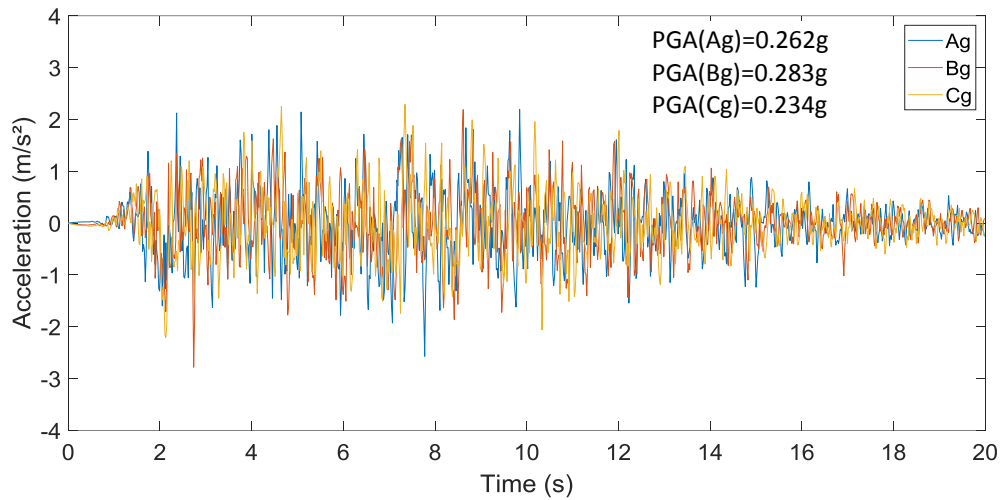


Figure 8. Accélérations simulées dans le cas négligeant l'effet de site

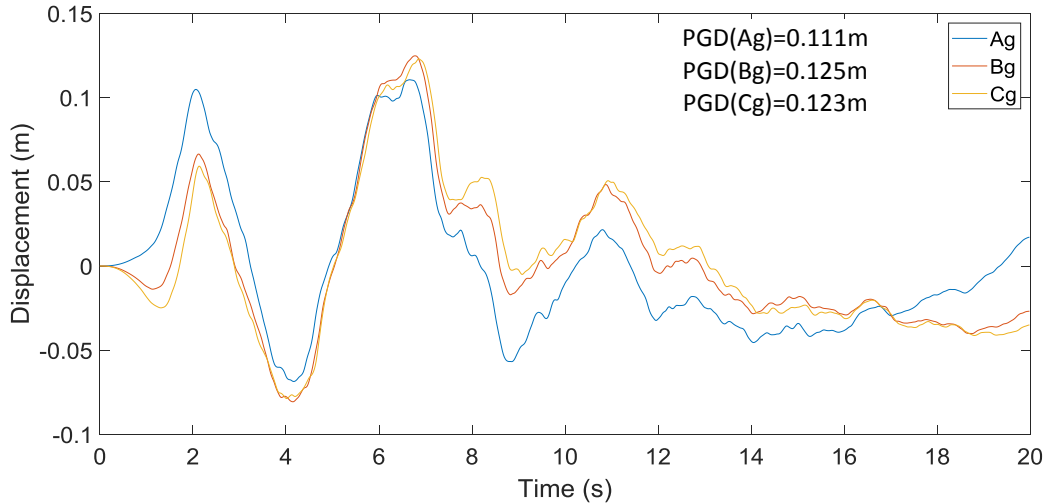


Figure 9. Déplacements simulés dans le cas négligeant l'effet de site

Les résultats du second cas de simulation (l'effet de site est négligé) décrits en accélérations et en déplacements sont illustrés dans les figures 8 et 9, respectivement. Le signal en accélération au point B_b développe un PGA maximal égale à $0.283g$ et un PGD de $0.125 m$. En comparant ces valeurs avec ceux du signal cible simulé dans le cas uniforme, les résultats restent très proches.

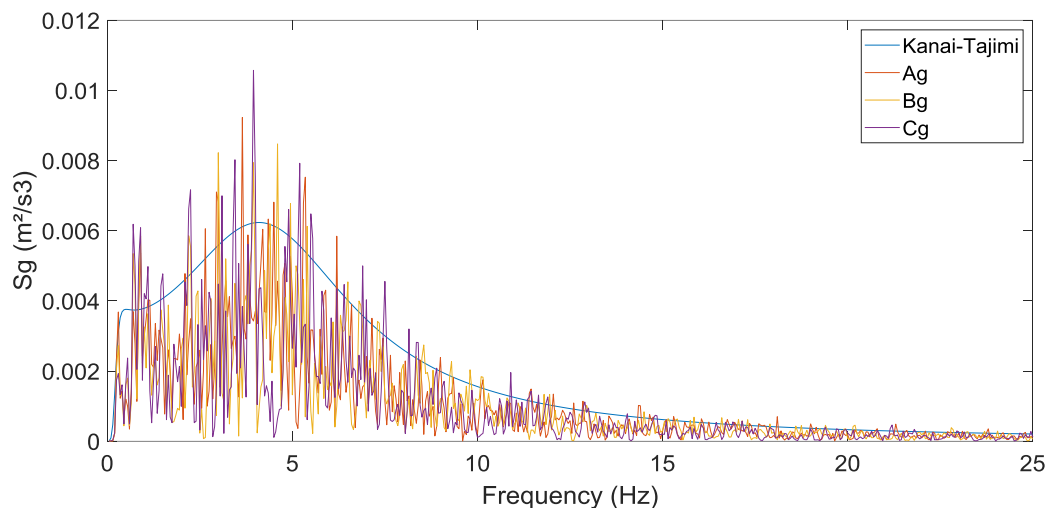


Figure 10. Comparaison de densités spectrale de puissance dans le cas négligeant l'effet de site (signaux générés non stationnaires)

Les densités spectrales de puissance des signaux générés sont calculées et comparés avec la fonction de densité spectrale filtrée de Tajimi-Kanai (voir Figure 10). Ces densités spectrales sont légèrement supérieures au spectre cible.

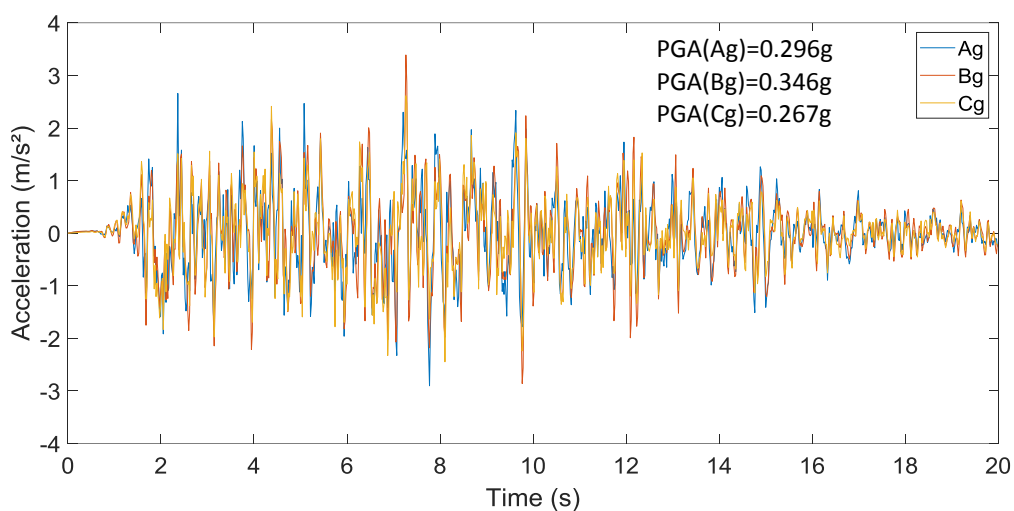


Figure 11. Accélérations simulées dans le cas adoptant que l'effet de site

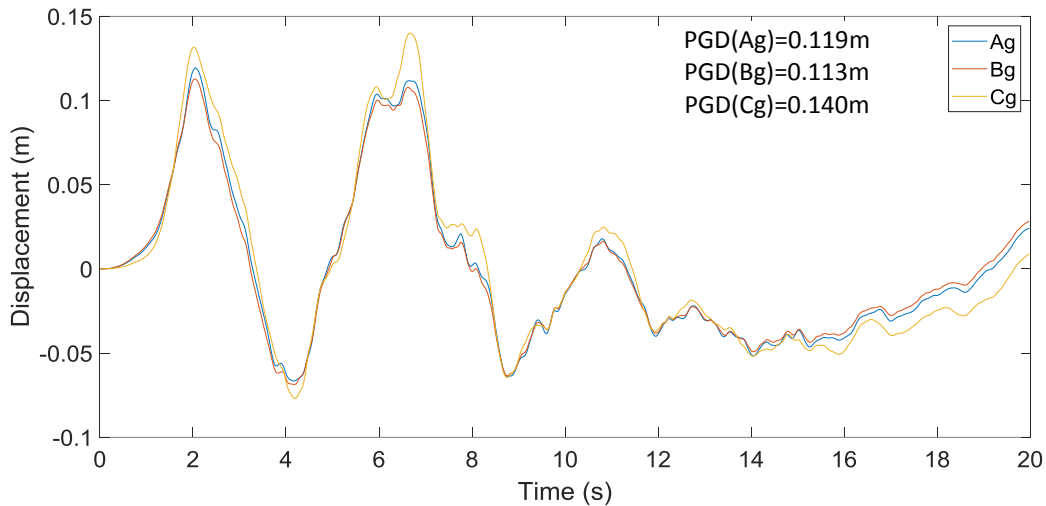


Figure 12. Déplacements simulés dans le cas adoptant que l'effet de site

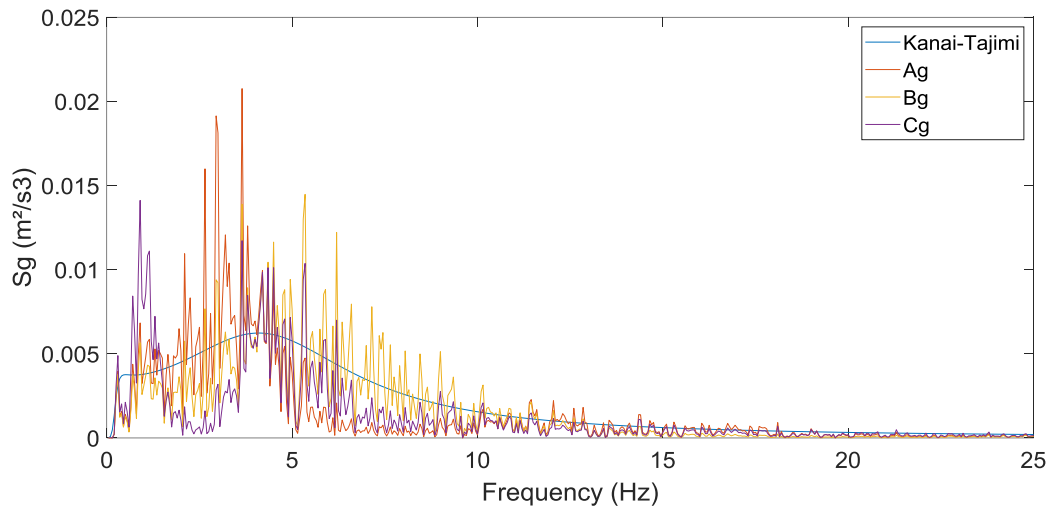


Figure 13. Comparaison de densités spectrale de puissance dans le cas adoptant que l'effet de site (signaux générés non stationnaires)

Dans ce cas de simulation, les densités spectrales de puissance calculées des signaux générés sont supérieures à la densité spectrale filtrée de Tajimi-Kanai (voir Figure 13).

Les résultats illustrés dans les figures 14 et 15 sont issus du cas de simulation qui prend en considération tous les facteurs de SVGM. Ces derniers se résument à l'effet d'incohérence, de passage d'onde et les conditions locales du site. Les accélérations simulées donnent lieu à un PGA maximal de 0.343g mesuré pour B_b . Un PGD maximal, égale à 0.152 m, est enregistré au point C_b .

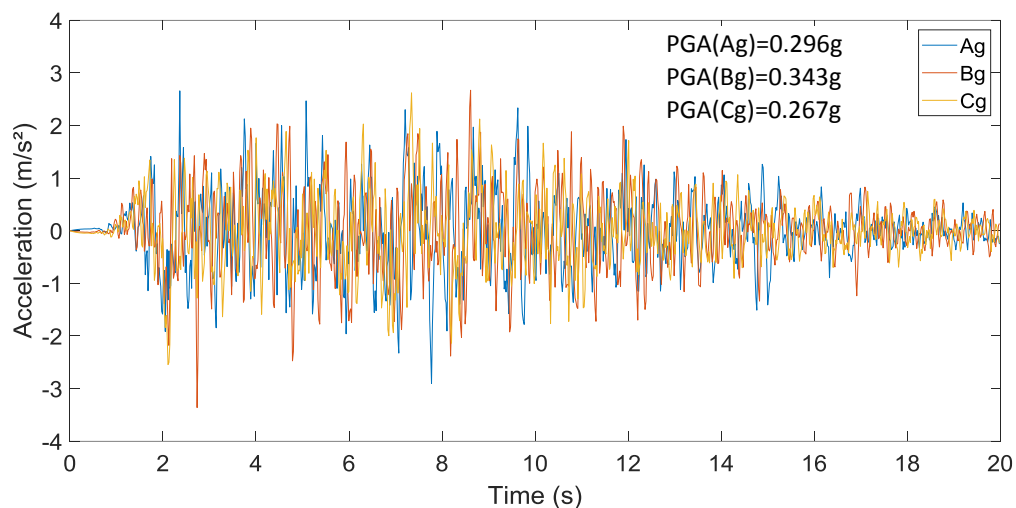


Figure 14. Accélérations simulées dans le cas considérant tous les facteurs de la SVGM

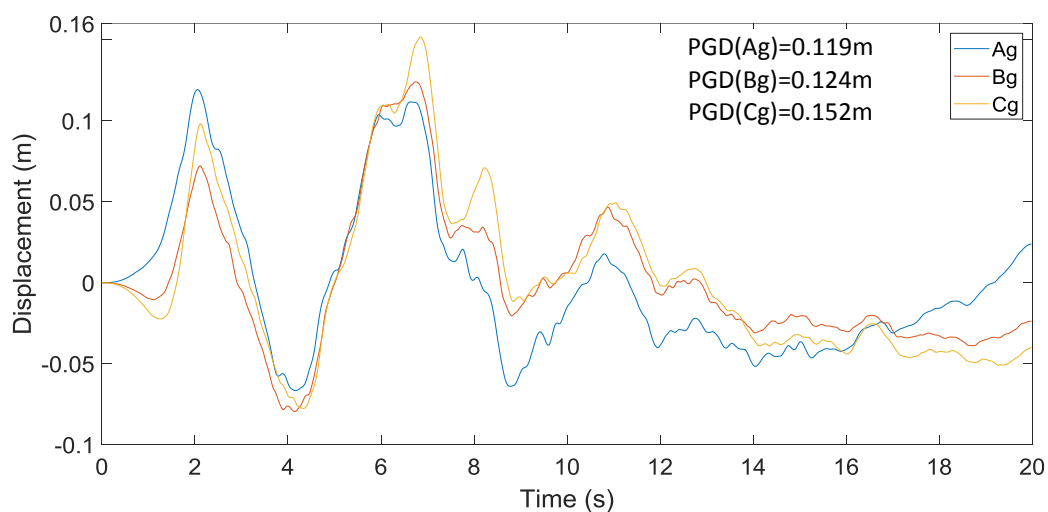


Figure 15. Déplacements simulés dans le cas considérant tous les facteurs de la SVGM

Sachant que l'analyse sismique des structures étendues en adoptant l'effet de la SVGM est souvent réalisée en imposant des déplacements à la base [2-6]. En effet, l'input sismique est simulé en termes de déplacement et appliqué sous forme de séries temporelle à chaque point de liaison sol structure.

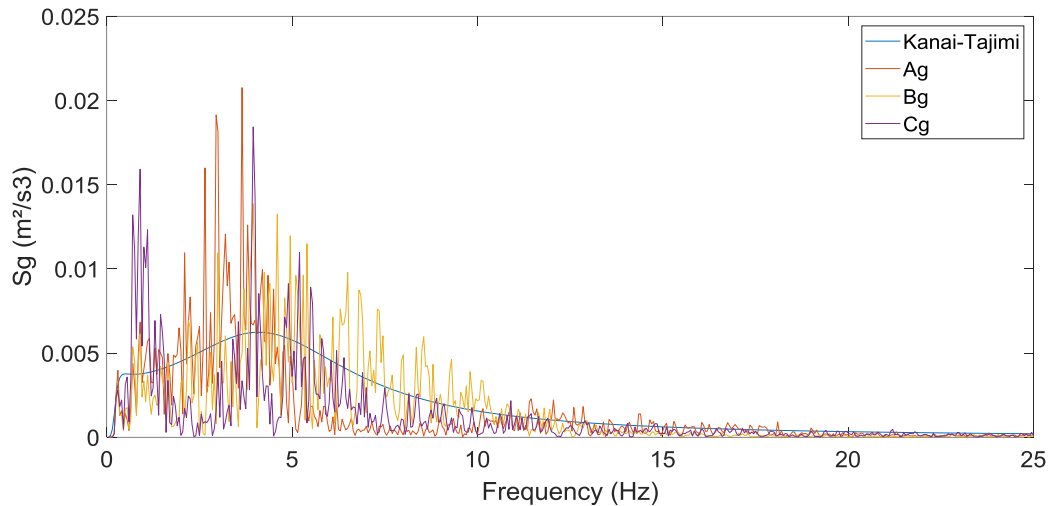


Figure 16. Comparaison de densités spectrales de puissance dans le cas négligeant l'effet de site (signaux générés non stationnaires)

Dans le cas de simulation où l'ensemble des facteurs de la SVGM ont été pris en considération, les signaux sismiques générés développent des densités spectrales de puissance supérieures à la DSP cible mais suivent son enveloppe (voir Figure 16).

À l'issue des résultats de ces quatre cas de simulation des signaux sismiques, les déplacements simulés maximaux correspondent au cas qui tient en compte de tous les facteurs de la SVGM. Tandis que le cas uniforme donne lieu à des déplacements simulés les plus petites. On remarque que les déplacements simulés issus du cas où seul l'effet de site est adopté sont proches de ceux issus du cas où tous les facteurs de la SVGM sont considérés.

6 Conclusion

Une étude menée dans cet article consiste à la simulation des signaux sismiques en prenant en compte l'ensemble des facteurs de la SVGM en particulier l'effet du site. Une technique de simulation des mouvements sismiques est présentée. Quatre cas de simulations sont considérés afin de générer les signaux sismiques en accélération et en déplacement.

Les résultats de cas de simulation des signaux sismiques montrent que le cas le plus défavorable est celui qui considère tous les facteurs de la SVGM. Tandis que le cas uniforme est loin de représenter le chargement sismique réel. Notons que l'effet de site seul peut conduire à des chargements sismiques considérables. À cet effet, le fait de négliger les conditions locales du site dans la représentation de la SVGM donne lieu à une sous-estimation de l'input sismique.

Références

- [1] A. Der Kiureghian, A coherency model for spatially varying ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (1996), 25(1), 99-111.
- [2] N. Benmansour, M. Djafour, A. Bekkouche, D. Zendagui, A. Benyacoub, Seismic response evaluation of bridges under differential ground motion: a comparison with the new Algerian provisions. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* (2012), 16(7), 863-881.
- [3] N. Benmansour, M. Djafour, D. Zendagui, A. Bekkouche, Non linear dynamic analysis of bridge to spatially variable multiple support excitations. 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering/ 4th Asia Conference on Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 2012.
- [4] M. Djafour, N. Meddane, R. Derbal, D. Zendagui, A. Bekkouche, Étude du comportement dynamique d'un barrage poids-voûte face au mouvement sismique différentiel. 18ème Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31 août 2007.
- [5] M. Djafour, N. Meddane, R. Derbal, A. Megnounif, D. Zendagui, A. Bekkouche, Response of a gravity arch dam to spatially varying earthquake ground motion. 8th National Conference on Earthquake Engineering. San Francisco, California, 2006.
- [6] R. Derbal, Analyse dynamique de barrages poids-voûtes sous chargement sismique différentiel, Thèse de Magister, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2005.
- [7] K. Bi, H. Hao, W. Ren, Response of a frame structure on a canyon site to spatially varying ground motions, *Structural Engineering and Mechanics* (2010), 36(1), 111-127.
- [8] K. Bi, H. Hao, Modelling and simulation of spatially varying earthquake ground motions at sites with varying conditions, *Probabilistic Engineering Mechanics* (2012), 29, 92-104.
- [9] S. Adanur, A.C. Altunişik, K. Soyluk, A. Bayraktar, A.A. Dumanogluç, Multiple-support seismic response of Bosphorus Suspension Bridge for various random vibration methods, *Case Studies in Structural Engineering* (2016), 5, 54-67.
- [10] M.R. Shiravand, P. Parvanehro, Spatial variation of seismic ground motion effects on nonlinear responses of cable stayed bridges considering different soil types, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (2019), 119, 104-117.
- [11] R. Derbal, N. Benmansour, M. Djafour, Influence de l'effet de site sur le comportement dynamique des ponts, 23^{ème} Congrès Français de Mécanique, Lille, 28 Août au 1er Septembre 2017.
- [12] R. Derbal, N. Benmansour, M. Djafour, Impact of spatial variability of earthquake ground motion on seismic response of a railway bridge, *International journal of computational methods* (2018), 6(5), 910-920.
- [13] D.Y. Zhang, W. Liu, W.C. Xie, M.D. Pandey, Modeling of spatially correlated, site-reflected, and nonstationary ground motions compatible with response spectrum", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (2013), 5, 21-32.
- [14] N. Benmansour, Effet de la variabilité spatiale du mouvement sismique sur le comportement dynamique des ponts, Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2013.
- [15] M. Shinozuka, Simulation of multivariate and multi-dimensional random processes. *Journal of Acoustic Society of America* (1971), 49, 357-367.
- [16] RPOA 2008, Règles parasismiques applicables au domaine des ouvrages d'art, Document Technique Règlementaire (DTR), Ministère des Travaux Publics, Algérie, 2008.
- [17] R. Harichandran, E. Vanmarcke, Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* (1986), 112, 154-174.
- [18] E. Safak, Discrete-time analysis of seismic site amplification, *Journal of Engineering Mechanics* (1995), 121(7), 801-809.
- [19] G. Deodatis, Non-stationary stochastic vector processes: seismic ground motion applications. *Probabilistic Engineering Mechanics* (1996), 11, pp. 149-168.
- [20] P.C. Jennings, G.W. Housner, and N.C. Tsai, Simulated earthquake motions, Report of Earthquake Engineering Research Laboratory, EERL-02, California Institute of Technology, 1968.
- [21] H. Tajimi, A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake", *Proceeding of 2nd World Conference on Earthquake Engineering*, 1960, Tokyo, Japan, 781-796.

[22] H. Hao, Effects of spatial variation of ground motions on large multiply-supported structures. Report No. UCB/EERC-89-06, University of California at Berkeley, Berkeley, 1989. 1995, pp. 3–6