

Influence de l'Effet de Site sur le Comportement Dynamique des Ponts

R. DERBAL^a, N.BENMANSOUR^b, M.DJAFOUR^b

a. Département de Génie Civil, Centre Universitaire de Ain Témouchent, BP 284, 46000, Algérie. Email : r.derbal@yahoo.fr

b. Département de Génie Civil, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.

Résumé :

Lors d'un séisme, le mouvement du sol est variable dans l'espace, à la fois en amplitude et en phase. La variabilité spatiale de mouvements sismiques a un effet important sur la réponse des grandes structures telles que des ponts et des barrages. Cette variabilité du mouvement sismique est caractérisée par l'effet de l'incohérence, l'effet de passage d'onde et l'effet de site. L'objectif principal de ce travail est l'évaluation de l'effet de site sur le comportement dynamique des structures étendues en particulier les ponts. Le chargement sismique considéré prend en compte la variabilité spatiale du mouvement sismique avec tous ses paramètres. La première étape consiste à générer des signaux sismiques artificiels variables dans l'espace en adoptant un modèle de simulation. Ensuite, les résultats de cette génération sont appliqués à un pont afin d'étudier l'influence de l'effet de site sur le comportement dynamique de cette structure.

Abstract :

When an earthquake occurs, the ground motion is variable in space, both in amplitude and in phase. The spatial variability of seismic ground motion has an important effect on the response of large structures such as bridges and dams. This spatial variability of seismic ground motion is characterized by the effect of the loss-coherency, the wave-passage effect and the site effect. The main objective of this work is the evaluation of the site effect on the dynamic behavior of extended structures, in particular bridges. The seismic loading considered takes into account the spatial variability of ground motion with all its effects. Firstly, artificial seismic ground motions are generated using a simulation model. Then, the results of this generation are applied to a bridge in order to study the influence of the site effect on the dynamic behavior of this structure.

Mots clefs : variabilité spatiale – effet de site – ponts – génération des signaux sismiques – comportement dynamique.

1 Introduction

La complexité des événements sismiques donne que les sollicitations correspondantes présentent une grande variabilité spatiale et temporelle. Cela est dû essentiellement aux effets d'incohérence, de propagation des ondes sismiques et aux conditions locales du site.

Les méthodes classiques de calcul dynamique des structures étendues, tel que les ponts, considèrent que l'ouvrage étudié est excité par un chargement sismique uniforme. Par conséquent, une analyse sismique rigoureuse de ce type de structures devrait considérer cet effet de variabilité spatiale du mouvement sismique. Contrairement au cas d'un calcul dynamique sous chargement uniforme, un chargement sismique différentiel (en tenant en compte l'effet de variabilité spatiale du mouvement sismique) engendre des forces pseudo-statiques additionnelles en plus des forces d'inertie.

En effet, de nombreux chercheurs ont étudié la variabilité spatiale du mouvement sismique. La plupart de ces études ont conduit à des modèles empiriques ou analytiques. L'ensemble de ces études considèrent que le site, où l'ouvrage est implanté, est uniforme et homogène c.à.d. que seuls les effets de l'incohérence et de passage d'onde, dû à la propagation des ondes sismiques, sont adoptés.

Cependant, pour un site où le sol de fondation présente des propriétés différentes, la propagation des ondes sismiques et le contenu fréquentiel sont affectée de tel façon que l'intensité du séisme est directement liée à ces deux paramètres. A cet effet, cette hypothèse peut entraîner une représentation inexacte du chargement sismique adopté. Notons qu'un chargement différentiel tenant en compte de l'effet de variabilité spatiale du mouvement sismique est modélisé en se basant sur la théorie des champs stochastiques.

Kaiming et al [17], ont proposé une approche où les signaux sismique différentiels sont modélisés en deux étapes. Premièrement, les signaux au niveau du substratum rocheux, supposés avoir la même intensité, sont modélisés avec une fonction de densité spectrale de puissance Tajimi-Kanai filtrée et une fonction de cohérence. Ensuite, La fonction de densité spectrale de puissance des signaux sismiques au niveau de la surface du site est dérivée en fonction des facteurs d'amplification correspondants. Ces facteurs sont calculés en se basant sur la théorie de propagation d'onde sismique unidimensionnelle. Une discussion sur l'effet de la variabilité spatiale du signal sismique et l'effet du site sur la réponse dynamique est réalisé. Ils concluent que, le fait de négliger l'effet du site (effet d'amplifications) dans l'analyse dynamique des structures, cas de la plupart des études sur l'effet de variabilité spatiale du mouvement du sol, conduit à des résultats incertains.

Konakiet Der Kiureghian[16][21] ont présenté une simulation des signaux sismiques par deux approches : L'approche conditionnelle où le mouvement simulé est conditionné par un accélérogramme observé à un site et l'approche inconditionnelle où le mouvement de sol est compatible avec une fonction de densité spectrale estimée.

Les travaux de Benmansour et al[1][3][5] consistent à évaluer la méthode proposée par le RPOA en la comparant avec des approches plus raffinées et avec les dispositions de EC8. Ils ont développé une méthode de génération de signaux sismique très poussée dans le sens où les signaux en déplacement peuvent être obtenus directement sans passé par la double intégration. En se basant sur l'étude de plusieurs ponts, les résultats obtenus montrent que la méthode simplifiée du RPOA surestime la demande sismique. Ils ont proposé de modifier quelques dispositions pour obtenir des résultats semblables aux autres méthodes.

Kaiming et Hao[15][13] ont développé une méthode de génération des signaux sismique tenant en compte les effets locaux de site. Cette méthode se base sur la théorie de propagation des ondes, est présenté par WOLF 1985. Comme hypothèse, le mouvement à la base rocheuse est composé d'onde SH (hors plan) ou la combinaison d'onde P et SV avec un angle incident donné. Les mouvements simulés sont compatibles avec la fonction de densité spectrale le spectre de réponse cible. Ils ont conclu que la méthode proposée conduit à une modélisation plus réaliste des mouvements différentiels dans des sites de caractéristiques variables par rapport à l'hypothèse d'intensité identique des mouvements.

Dans cette étude, le modèle de génération des signaux sismiques décrit par Benmansour et al[2] [4] [5] est développé. Plusieurs études récentes ont montré que les conditions locales du site sont loin d'être négligées lors de l'interprétation de la variabilité spatiale du signal sismique. De ce fait, le modèle

proposé dans cette étude prend en considération l'ensemble des effets de la variabilité spatiale des signaux sismiques, en particulier l'effet de site. L'objectif de ce travail est d'évaluer l'influence de l'effet de site sur la réponse dynamique des ponts.

2 Modèle du pont

L'ouvrage étudié, implanté à Mila en Algérie, est un pont à haubans. Il comprend trois travées de 111 m, 280 m et 111 m pour une longueur totale de 502 m (Figure 1). Le tablier, composé de deux voies est en béton précontraint avec une largeur totale de 13.30 m. Il est constitué d'une dalle de 20 cm d'épaisseur, raidi par trois nervures de 2 m de haut et 0.22 m de large. Il est porté par deux pylônes de 110 m et 140 m de hauteur. Les mâts des pylônes ont une hauteur d'environ 60 m au-dessus du tablier.



Figure. 1 Vue d'ensemble du pont à haubans.

Les pylônes sont en forme de H, constitués chacun de deux fûts verticaux cylindriques en partie basseau-dessous du tablier, surmontés de fûts verticaux rectangulaires appelés mâts au-dessus du tablier. Ces fûts sont entretoisés à la fois au voisinage du sommet des mâts et sous le tablier.

Le haubanage du tablier est en demi- éventail et latéral, avec un total de 88 câbles, 44 soutenant la travée centrale et 22 pour chaque travée de rive. Trois paires de haubans de retenue relie chaque tête de pylône aux culées voisines. Les câbles des haubans sont constitués avec des barres en acier de 7 mm de diamètre et ont des sections variant entre 22.5 et 55.5 cm²[18].

Le modèle du pont étudié est illustré par la figure 2, où A, P1, P2, P3 et B sont les points des supports à la surface du sol. Tandis que les points correspondants au substratum rocheux sont A', P1', P2', P3' et B' respectivement.

ρ_i, v_i, ξ_i, h_i sont la densité, la vitesse de propagation des ondes de cisaillement, l'amortissement et la profondeur du sous les supports, respectivement ; où i représente the A, P1, P2, P3 et B. les paramètres correspondants au substratum rocheux sont ρ_R, v_R and ξ_R .

Sol1				Sol 2				Sol 3				Sol 4			
ρ_1	v_1	ξ_1	h_1	ρ_2	v_2	ξ_2	h_2	ρ_3	v_3	ξ_3	h_3	ρ_4	v_4	ξ_4	h_4
2000	450	0.5	51	1500	250	0.5	38	1500	300	0.5	29	1800	350	0.5	48

Tableau 1. Paramètres du sol de fondation

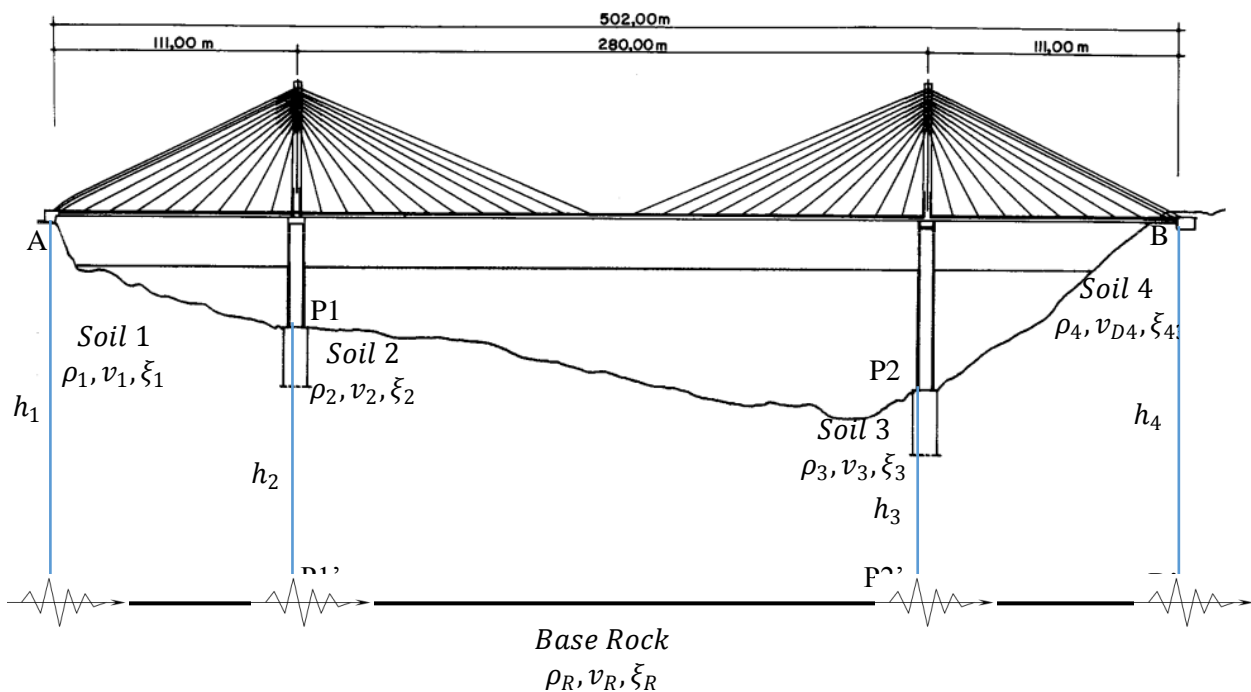


Figure. 2. Vue longitudinale du pont et du sol de fondation.

3 Simulation du mouvement sismique différentiel

3.1 Modèle de cohérence

Les mouvements sismiques différentiels sont généralement modélisés d'une manière probabiliste par des champs stochastiques spatio-temporels. La mesure de la SVGM s'effectue souvent dans le domaine fréquentiel [6][20]. La fonction de cohérence est définie par (Der Kiureghian, 1996)[9][14] [19] :

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

Où :

ω est la fréquence angulaire.

$S_j(\omega)$ et $S_k(\omega)$ sont les fonctions de densité spectrale de puissance d'un vecteur de temps $g_j(t)$ et $g_k(t)$, respectivement.

$S_{jk}(\omega)$ est la fonction d'inter-densité spectrale de puissance entre deux mouvements correspondant à un intervalle de temps considéré.

La fonction de cohérence a la forme suivante:

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

Avec :

d_{jk} est la distance horizontale projetée le long de la direction de propagation des ondes (de la station j à la station k).

v est la vitesse apparente des ondes, considérée constante sur l'intervalle de fréquences de l'onde.

3.2 Mouvement sismique au substratum rocheux

Le mouvement sismique au niveau du substratum rocheux est supposé de même intensité. D'où, la fonction de densité spectrale de puissance identique pour tous les positions. Elle est donnée par la fonction de densité spectrale de puissance Tajimi-Kanai filtrée [17] :

$$S_g(\omega) = |H_P(\omega)|^2 S_0(\omega) = \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + (2\omega_f \omega \xi_f)^2} \cdot \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \Gamma \quad (3)$$

Où :

$|H_P(\omega)|^2$ 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.

Les paramètres de la fonction de densité spectrale de puissance Tajimi-Kanai filtrée sont donnés par le tableau 1. Ces valeurs correspondent à une accélération maximale (PGA) de 0.2g avec un temps $T=20s$ [17]. L'allure de cette fonction de densité spectrale est donnée par la figure 3.

ω_g (Hz)	ξ_g	ω_f (Hz)	ξ_f	Γ (m ² /s ³)
6π	0.6	0.5π	0.6	0.00565

Tableau 1. Paramètres de la fonction de densité spectrale de puissance Tajimi-Kanai filtrée.

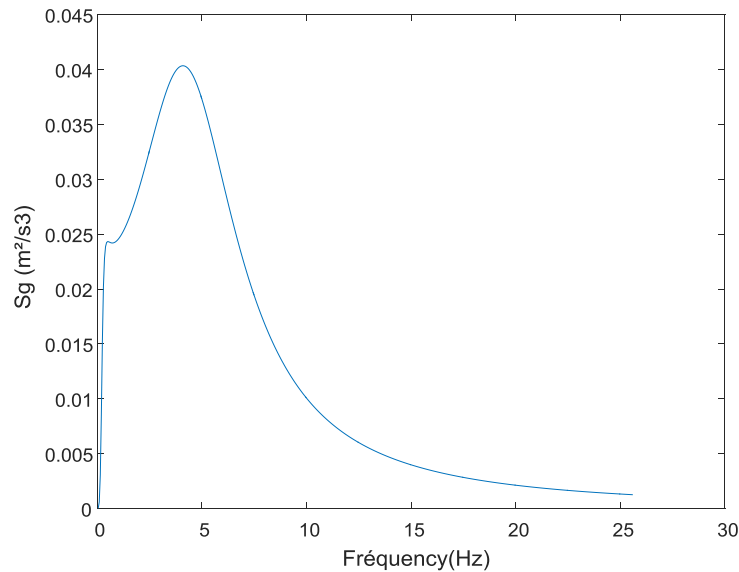


Figure 3. Fonction de densité spectrale de puissance Tajimi-Kanai filtrée au substratum rocheux.

Le modèle de cohérence utilisé pour simuler les signaux sismiques au niveau du substratum rocheux est celui de Sobczyk 1991 [15][17] et il est donné par l'équation suivante :

$$\gamma_{A'B'}(i\omega) = |\gamma_{A'B'}(i\omega)| e^{i\omega d/V_{app}} = e^{-\beta d} e^{-\alpha(\omega)\sqrt{d}\left(\frac{\omega}{2\pi}\right)^2} e^{i\omega d/V_{app}} \quad (4)$$

Où :

$$\alpha(\omega) = \begin{cases} (2\pi a/\omega) + (b\omega/2\pi) + c & 0.314 \text{ rad/s} \leq \omega \leq 62.83 \text{ rad/s} \\ 0.1a + 10b + c\omega & \omega > 62.83 \text{ rad/s} \end{cases} \quad (5)$$

Avec :

a , b , c et β sont des constants.

d est la distance entre deux points situés au substratum rocheux.

V_{app} est la vitesse apparente de propagation des ondes sismiques.

3.3 Effet de site :

En utilisant la théorie de propagation d'onde sismique présentée par Aki et Richards, cité par Kaiming [17], la fonction de transfert pour la propagation d'onde de cisaillement dans une couche horizontale de sol est donnée par :

$$H_{jk}(\omega) = \frac{(1+r_j-i\xi_j)\exp(-i\omega\tau_j(1-2i\xi_j))}{1+(r_j-i\xi_j)\exp(-2i\omega\tau_j(1-2i\xi_j))} j = A, P1, P2 \text{ ou } B \quad (6)$$

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 .

r_j est le coefficient de réflexion donné par l'équation suivante :

$$r_j = \frac{\rho_R v_R - \rho_j v_j}{\rho_R v_R + \rho_j v_j} j = A, P1, P2 \text{ ou } B \quad (7)$$

La fonction d'inter-densité spectrale de puissance au point j et entre les points A et B a la forme suivante :

$$S_j(\omega) = |H_j(i\omega)|^2 S_g(\omega) j = A, P1, P2 \text{ ou } B \quad (8)$$

$$S_{jk}(\omega) = H_j(i\omega)H_k^*(i\omega)S_{j'k'}(i\omega) j, k = A, P1, P2 \text{ ou } B \text{ et } j \neq k ; \quad (9)$$

$$j', k' = A', P1', P2' \text{ ou } B' \text{ et } j' \neq k'$$

L'indice « * » représente le conjugué complexe.

Les fonctions de transfert des quatre supports du pont sont illustrées dans la figure 4.

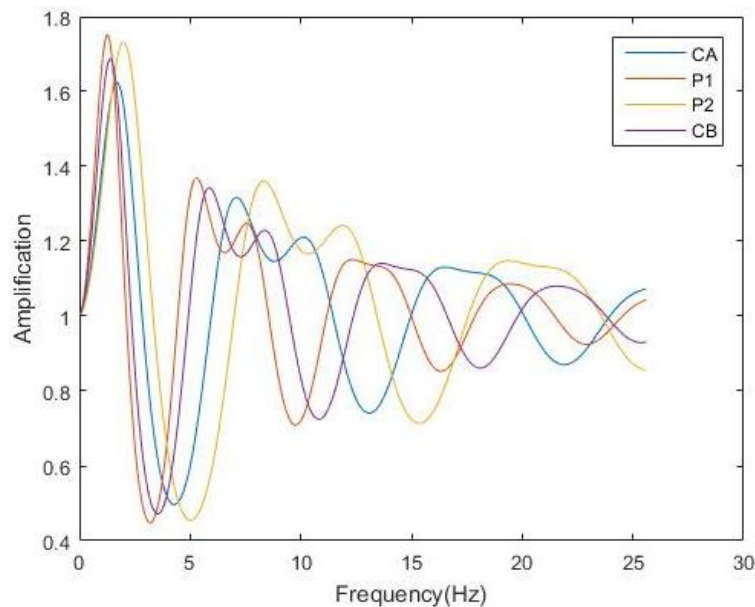


Figure 4. Fonctions de transfert au niveau des supports.

Il convient de noter que la fonction de transfert exprimée dans l'équation (6) est dérivée pour le cas avec une seule couche de sol. Si plusieurs couches de sol sont envisagées, elle peut être étendue directement en se basant de la théorie de la propagation des ondes sismiques (Wolf1988 cité par Kaiming 2011 [17]).

3.4 Modèle de la variabilité spatiale du mouvement sismique

Les signaux sismiques stationnaires, dans le domaine temporel, sont simulés selon la méthode décrite par Deodatis (1997)[8].

A partir de l'équation (9), la matrice d'inter-densité spectrale $S_{jk}(\omega)$, pour le processus stationnaire $g_j(t)$; $j = 1, 2, \dots, n$. est donné par [7] [10] [11][12] :

$$S_{jk}(\omega) = [S_j(\omega)S_k(\omega)\gamma_{jk}(\omega)]; j, k = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

Dans le but de simuler des échantillons du processus stochastique stationnaire $g_j(t)$; $j = 1, 2, \dots, n$. Sa matrice d'inter-densité spectrale $S_{jk}(\omega)$ donnée dans l'équation (10) est décomposée selon le produit et en utilisant la méthode de décomposition de Cholesky [19][17][5]:

$$S_{jk}(\omega) = L(\omega)L^T(\omega) \quad (11)$$

Les éléments de $L(\omega)$ peuvent être écrits dans la forme polaire suivante :

$$L(\omega) = |L_{jk}(\omega)| \exp(i\theta_{jk}(\omega)) ; j > k \quad (12)$$

Où :

$$\theta_{jk}(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[L_{jk}(\omega)]}{\text{Re}[L_{jk}(\omega)]} \right) \quad (13)$$

En utilisant les équations (11) et (12), les processus stochastiques stationnaires $g_j(t)$; $j, k = 1, 2, \dots, n$. Peuvent être simulés par la série suivante lorsque $N \rightarrow \infty$:

$$g_j(t) = 2 \sum_{m=1}^n \sum_{l=1}^N |L_{jm}(\omega)| \sqrt{\Delta\omega} \cos(\omega_l t - \theta_{jm}(\omega_l) + \phi_{ml}) \quad (14)$$

Avec :

$$\omega_l = l\Delta\omega ; l = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

$$\Delta\omega = \omega_u / N \quad (16)$$

N est le nombre totale de pas de fréquence angulaire $\Delta\omega$ pour atteindre la fréquence de coupure ω_u .

Les $\{\phi_{ml}\}$; $m = 1, 2, \dots, n$; $l = 1, 2, \dots, N$: utilisées dans l'équation (14) sont des phases aléatoires indépendantes uniformément distribuées sur l'intervalle $[0, 2\pi]$.

4 Résultats et discussion

Afin d'effectuer une analyse dynamique linéaire, un modèle en élément finis en 3D a été réalisé en utilisant un code de calcul d'éléments finis. Le tablier est supporté par les piles par l'intermédiaire des appareils d'appuis. Ces derniers ont été modélisés par des éléments link où la rigidité est fixée. Le tablier et les piles sont supposés avoir un comportement élastique.

Un coefficient d'amortissement égal à 5% est retenu pour cette modélisation.

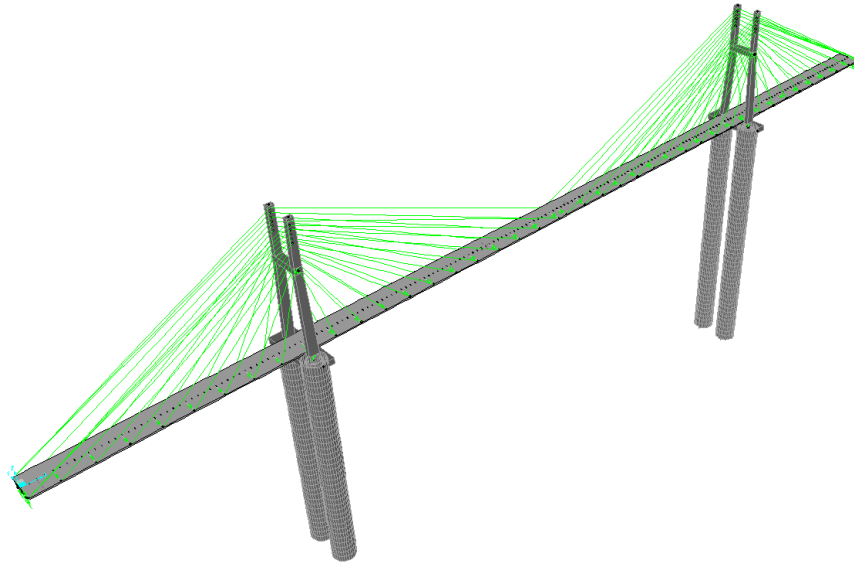
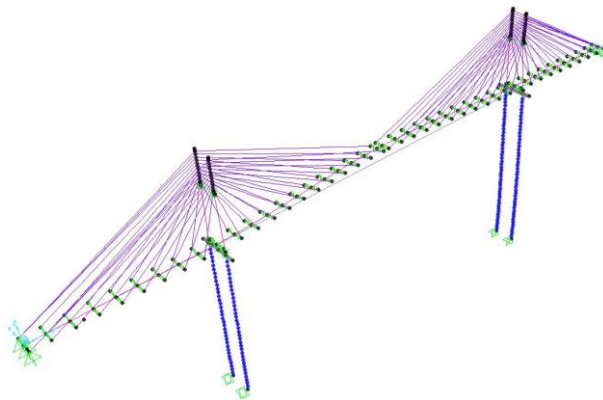
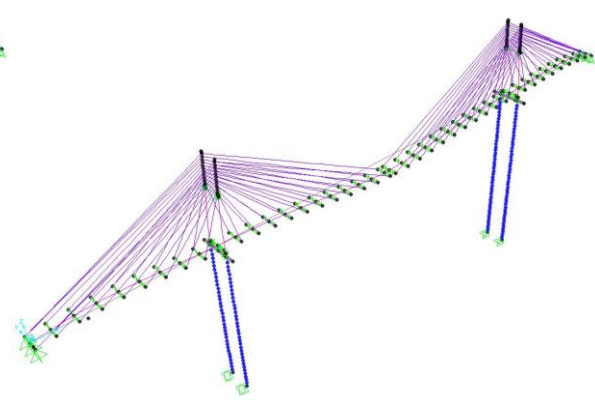
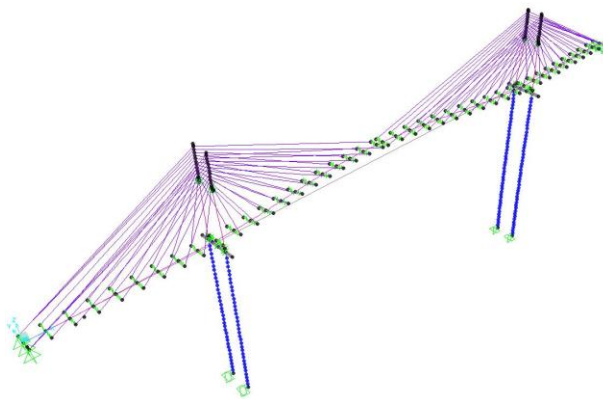
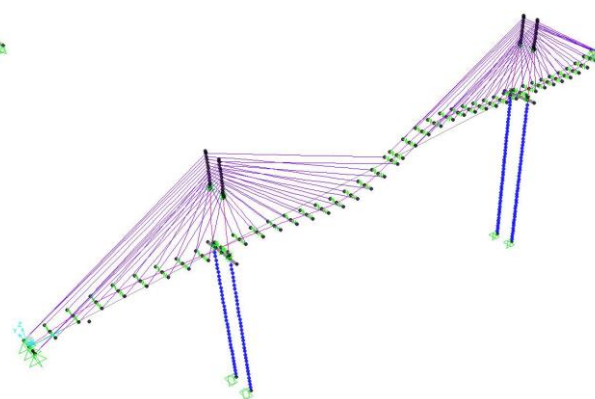


Figure 5. Modèle en éléments finis du Pont

4.1 Analyse Modale

Les quatre premiers modes propres de vibration sont illustrés par les figures 5, 6, 7 et 8. Les périodes correspondants à ces modes sont 2.459 s, 2.248 s, 1.958 s et 1.536s, respectivement.

Figure 6. Mode 1 : $T=2.459$ sFigure 7. Mode 2 : $T=2.248$ sFigure 8. Mode 3 : $T=1.958$ sFigure 9. Mode 4 : $T=1.536$ s

4.2 Chargements sismiques générés

Il y a lieu de noter que les chargements sismiques sont appliqués sous forme de séries temporelles de déplacements au niveau de la liaison sol-piles. Ces déplacements ont été générés en utilisant l'approche de simulation décrite ci-dessus.

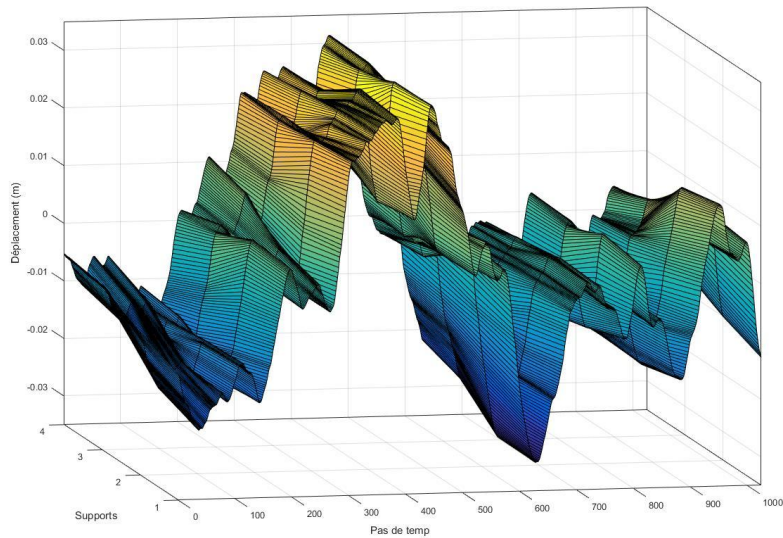


Figure 10. Déplacements générés pour le cas différentiel (Modèle de cohérence et effet de site)

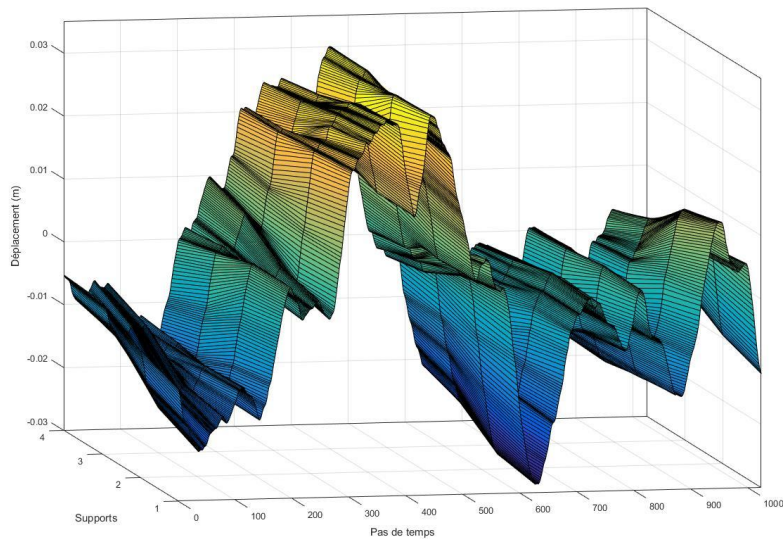


Figure 11. Déplacements générés pour le cas différentiel (sans effet de site)

4.3 Analyse dynamique

Afin d'évaluer l'influence de la variabilité spatiale du chargement sismique en tenant en compte les conditions locales du site, quatre analyses ont été réalisées.

En premier lieu, nous avons considéré que le chargement sismique appliqué est caractérisé par le modèle de cohérence et l'effet de site. Où, deux analyses ont été réalisées. La première considère que

chargement est uniforme (notée UNIF CS) c.à.d. que le chargement sismique généré pour le premier support du pont est appliqué pour tous l'ensemble des supports. Au niveau de la seconde analyse (notée DIFF CS), chaque support a son propre chargement sismique.

Ensuite, deux autres analyses ont été menées en négligeant l'effet de site. Le même principe des deux premières analyses est appliqué. A savoir, un chargement est uniforme (notée UNIF C) et un autres chargement différentiel (notée DIFF C).

Les résultats de ces analyses dynamique, soumis aux quatre cas d'excitations sont comparés en termes de moment fléchissant et effort tranchant. Les valeurs maximums des moments fléchissants obtenus au niveau de chaque pile sont illustrées par les figures 12, 13 et 14.

Une première comparaison est établie entre les résultats des analyses UNIF CS et DIFF CS et entre UNIF C et DIFF C. Ensuite, une autre comparaison s'impose ; celle entre DIFF CS et DIFF C.

Nous remarquons que l'analyse en DIFF CS peut engendrer des demandes sismiques en forces internes supérieurs que celles produites par le cas UNIF CS. Les moments fléchissants augmentent entre 9% pour la pile 2 et 20% pour la pile 1. Tandis que les valeurs des efforts des tranchants restent presque identiques (voir figure 12 a et b).

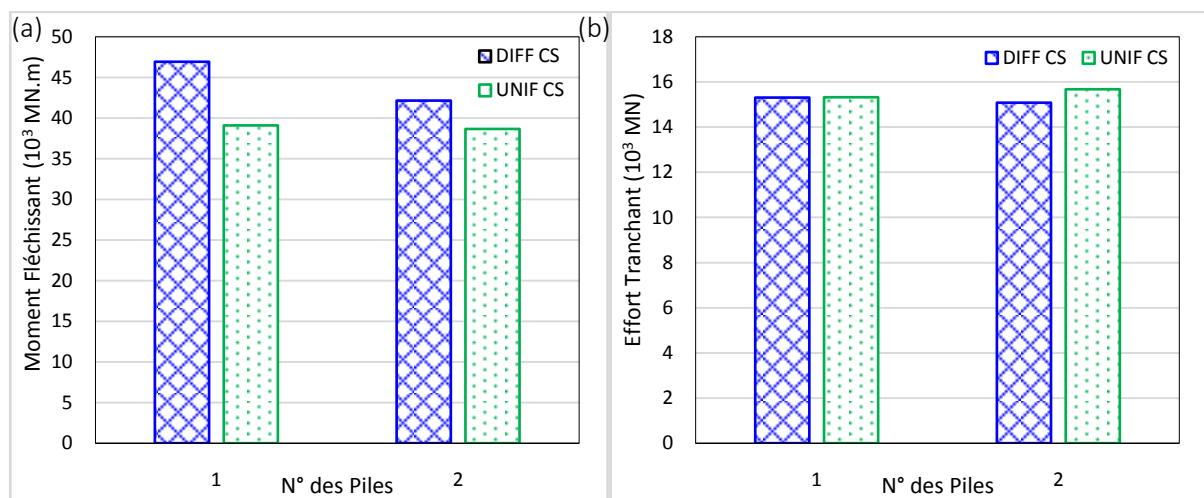


Figure 12. Analyse sous un chargement sismique (modèle de cohérence et effet de site)
a. Moments fléchissants maximums des piles. b. Efforts tranchants maximums des piles.

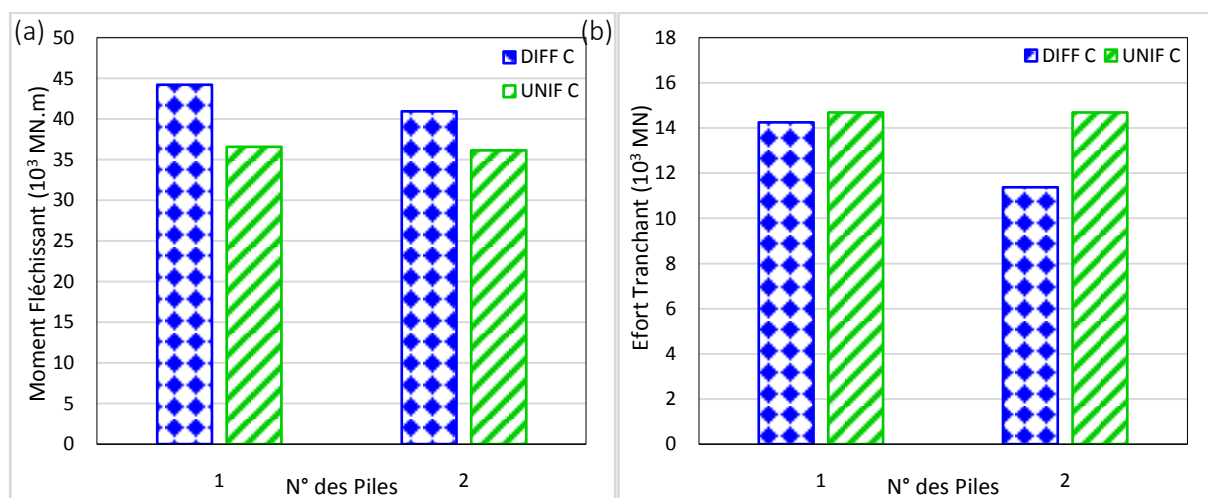


Figure 13. Analyse sous un chargement sismique (sans effet de site)
a. Moments fléchissants maximums des piles. b. Efforts tranchants maximums des piles.

L'analyse dynamique du pont étudié sous un chargement sismique différentiel en négligeant l'effet de site conduit aussi à des efforts internes supérieurs à ceux du cas de chargement sismique uniforme. En effet, les moments fléchissants augmentent entre 13.5% pour la pile 2 et 21% pour la pile 1. Tandis que pour les efforts valeurs des tranchants, on observe une diminution qui varie entre 3% et 20% (voir figure 13a et b).

Les résultats de l'analyse du pont sous un chargement sismique différentiel qui considère un modèle de cohérence et l'effet de site (DIFF CS) sont supérieurs à ceux issus de l'analyse sous un chargement sismique différentiel qui néglige l'effet de site (DIFF C). Les moments fléchissants augmentent entre 3% pour la pile 2 et 6% pour la pile 1. Les valeurs des efforts des tranchants montrent une augmentation qui varie entre 8% pour la pile 1 et 33% pour la pile 2 (voir figure 13 a et b).

Notons que les paramètres locaux du sol de fondation du pont engendrent une amplification du chargement sismique spécialement pour les piles (montrée sur la figure 4). Tandis que le modèle de cohérence donne naissance à des déplacements pseudo-statiques. Une représentation plus réaliste du chargement sismique doit prendre en considération ces deux effets. Le fait de négliger l'effet de site, cas de plusieurs études, peut conduire à une sous-estimation des sollicitations internes développées par l'ouvrage étudié.

Les résultats présentés dans le cas d'un chargement sismique différentiel en tenant en compte l'effet de site sont en fonction des paramètres du sol de fondation fixés ci-dessus. Dans le cas où ces paramètres de sol sont divergents entre les supports du pont, une éventuelle augmentation du facteur d'amplification peut surgir. D'où, l'effet de site peut conduire à une demande sismique bien supérieure.

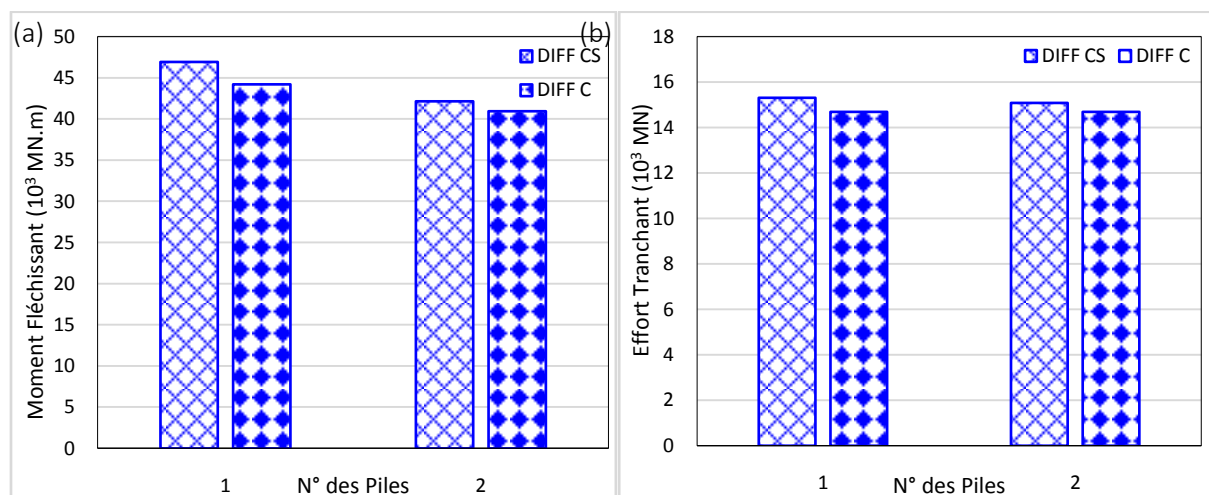


Figure 14. Comparaison entre les résultats maximums des analyses sous un chargement sismique différentiel : a. modèle de cohérence et effet de site. b. sans effet de site.

5 Conclusion

Cette conclusion est évidemment trop générale et vague pour être pratique. Les résultats de la présente étude indiquent que des précautions en ce qui concerne la SVGM devraient être prises en compte même si le pont semble être simple.

Une étude a été menée pour but d'évaluer l'influence d'un chargement sismique différentiel tenant en compte les conditions locales du sol de fondation sur un pont à haubans de longueur de 502 m. Une approche de génération des signaux sismiques a été développée pour prendre en considération les conditions de sol.

Quatre cas de chargement sont considérés dans cette étude. Deux cas de chargement différentiel, le premier considère un modèle de cohérence et l'effet de site. Le second suppose que le chargement

différentielle n'est définie que par une fonction de cohérence. Deux autres analyses sous un chargement sismique uniforme sont menées.

Les chargements ont été appliqués sous forme de séries temporelles de déplacements imposés à la base des piles.

Les résultats de ce travail montrent que l'analyse dynamique sous un chargement différentiel en tenant en compte l'effet de site conduit à une augmentation de la demande sismique.

Une analyse dynamique sous un chargement sismique différentiel qui néglige l'effet de site peut conduire à une sous-estimation de la demande sismique du pont étudié, spécialement si les piles sont élancées.

Les paramètres locaux du site peuvent engendrer une amplification de l'excitation sismique et le modèle de cohérence conduit à des mouvements pseudo-statiques. Ainsi, une représentation plus réaliste du chargement sismique doit prendre en considération ces deux effets.

Références

- [1] 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.
- [2] 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).
- [3] N. Benmansour, M. Djafour, A. Bekkouche, D. Zendagui, Seismic bridge response to differential ground motion and comparison with Algerian seismic design rule. *COMPADYN 2011 III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Corfu, Greece, 2011.
- [4] N. Benmansour, Étude du comportement dynamique des barrages voûtes face au mouvement sismique différentiel, Thèse de Magister, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2004.
- [5] 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.
- [6] M.T Chen, R.S. Harichandran, Response of an earth dam to spatially varying earthquake ground motion, *Journal of Engineering Mechanics ASCE* (2001), 127, pp. 932-939.
- [7] 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.
- [8] G. Deodatis, Non-stationary stochastic vector processes: seismic ground motion applications. *Probabilistic Engineering Mechanics* (1996), 11, pp. 149-168.
- [9] A. Der Kiureghian, A coherency model for spatially varying ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (1996), 25(1): 99-111.
- [10] R. Derbal, Analyse dynamique de barrages poids-voûtes sous chargement sismique différentiel, Thèse de Magister, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2005.
- [11] M. Djafour, N. Meddane, R. Derbal, D. Zendagui, A. Bekkouche, Étude du comportement dynamique d'un barrage poids-voûte face au mouvement sismique différentiel. 18^{ème} Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31 août 2007.
- [12] A.A. Dumanoglu, K. Soyuluk, A stochastic analysis of long span structures subjected to spatially varying ground motions including the site-response effect. *Engineering Structures* (2003), 25(10): 1301-1310.
- [13] H. Hao, N. Chouw, Modeling of earthquake ground motion spatial variation on uneven sites with varying soil conditions, The 9th International Symposium on Structural Engineering for Young Experts, Fuzhou & Xiamen, 2006.
- [14] R. Harichandran, E. Vanmarcke, Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* (1986), 112, pp. 154-174.

- [15] B. Kaiming, H.Hong, Modelling and simulation of spatially varying earthquake ground motions at sites with varying conditions, *Probabilistic Engineering Mechanics* (2012),29;92–104.
- [16] K. Konakli, A. Der Kiureghian, Simulation of spatially varying ground motions including incoherence, wave-passage and differential site-response effects, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* (2012), 41(3), 495-513.
- [17] B.Kaiming, Effects of Ground Motion Spatial Variations,PHD thesis, University of wester Australia, 2011.
- [18] A. KIBBOUA, Analyse dynamique sous vibrations ambiantes d'un pont à haubans sur l'oued dib a Mila, thèse de Magister, Ecole nationale des travaux publics, Algérie, 2006.
- [19] G, Yufeng, W, Yongxin,L.Dayong, L. Hanlong, Z. Ning, An improved approximation for the spectral representation method in the simulation of spatially varying ground motions, *Probabilistic Engineering Mechanics*, (2012) 29; 7–15.
- [20] D. Zendagui, M.K. Berrah, E. Kasusel, Stochastic deamplification of spatially varying seismic, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*,(1999),1, pp. 409-421.
- [21] A.Zerva, Spatial variation of seismic ground motions: modeling and engineering applications. CRC Press,Group, Taylor & Francis2009.