

## **Importance de la Variabilité Spatiale du Mouvement Sismique Sur L'Infrastructure de Ponts de Grandes Portées**

M. Naimi

SNC-LAVALIN Inc., 455 boul. René Lévesque, Montréal, Québec, Canada

### **Résumé**

L'effet de la variabilité spatiale du mouvement de sol durant un séisme est principalement attribuable au passage de l'onde sismique, la perte de la cohérence et des conditions locales du sol. Cette présentation introduit l'importance relative de ces effets sur la réponse sismique des ponts de plusieurs travées incluant les ponts de longues portées. En outre, les effets de site, qui sont à même de modifier considérablement le signal du mouvement sismique, constituent une sorte de vulnérabilité naturelle que l'on commence à considérer dans les réglementations. Les supports subissent des effets multiples différents. Cependant, sa réponse dynamique est influencée d'une manière significative par l'effet du passage de l'onde et les conditions de site. En présence de conditions géologiques avec des configurations irrégulières des couches du profil de sol, l'incohérence du mouvement sismique combinée avec les effets de site locaux amplifient les effets sismiques sur les fondations du pont. Étant donné que les fondations sont des éléments à capacité protégée, les normes en vigueur ne donnent pas de recommandations pour ces phénomènes complexes. Cette présentation inclut des cas de structures de pont endommagés, obtenus de la bibliographie, par ces effets et démontre par un exemple d'un modèle à 2-D l'effet de site d'un profil de sol soumis à une onde sismique agissant suivant un angle.

Mots clé : sismique; interaction sol-structure; effet de site, conception.

## Introduction

La réponse sismique des ponts de longues portées et des ponts à plusieurs travées dépend de leurs dimensions en plan et en élévation, du type de structure, du type de fondation et du profil de sol. Selon les normes sismiques, ces ponts sont classés comme ponts irréguliers. En présence de conditions géotechniques défavorables, la réponse dynamique du pont est affectée considérablement. En effet, lorsque le profil de sol est composé de multicouches ayant des caractéristiques variables et particulièrement en présence de couches liquéfiables, la réponse dynamique de ce système est affectée d'une manière significative. En outre, la présence d'irrégularités du profil géologique favorise l'amplification des effets sismiques. Quand le profil de sol est soumis à un mouvement sismique, en présence de structure, la réponse du système composé de sol-fondation-structure est très complexe à évaluer. Cette complexité est due au phénomène de propagation d'ondes sismiques et des multiples réflexions et réfractions qui se manifestent dans la masse de sol et au niveau de la fondation de la structure. Il n'existe pas de solution exacte pour ce type de problème. La solution peut être obtenue en considérant un modèle simplifié en interaction sol-structure tenant compte de la présence de sol, de la fondation et de la superstructure. En effet, ce modèle est simplement obtenu en modélisant le sol au voisinage de la fondation par des ressorts.

Lorsqu'un pont de grandes portées ou à plusieurs travées est soumis à un mouvement sismique, ses supports subissent des effets multiples différents. Cependant, sa réponse dynamique est influencée d'une manière significative par l'effet du passage de l'onde et les conditions de site. En présence de conditions géologiques avec des configurations irrégulières des couches du profil de sol, l'incohérence du mouvement sismique combinée avec les effets de site locaux amplifient les effets sismiques sur les fondations du pont.

La détermination du chargement sismique sur le système sol-structure représente une étape importante pour l'évaluation de la réponse sismique des ponts de grandes portées. En effet, pour ce type de structures, le mouvement sismique ne sera pas forcément le même d'un appui à autre. Cette différence, connue sous le nom de variabilité, est due au temps d'arrivée ou au décalage de l'onde sismique au niveau des fondations du pont. L'effet de la variabilité spatiale du mouvement de sol durant un séisme est principalement attribuable au passage de l'onde sismique, la perte de la cohérence et des conditions locales du sol.

Cette présentation introduit l'importance relative de ces effets sur la réponse sismique des ponts de plusieurs travées et des ponts de longues portées. En outre, les effets de site, qui sont à même de modifier considérablement le signal du mouvement sismique, constituent une sorte de vulnérabilité naturelle que l'on commence à considérer dans les réglementations. Étant donné que les fondations sont des éléments à capacité protégée, les normes en vigueur ne donnent pas de recommandations pour ces phénomènes complexes. Cette présentation inclut des cas de structures de pont endommagés, obtenus de la bibliographie, par ces effets et démontre, par un

exemple d'un modèle à 2-D, l'effet de site d'un profil de sol soumis à une onde sismique agissant suivant un angle.

### Cas de structures de ponts endommagés par les séismes

Les dommages causés par les tremblements de terre aux structures de ponts sont généralement associés aux conditions géotechniques défavorables. Plusieurs structures de ponts ont subies dans le passé des dommages importants. La plus part de ces dommages sont associés à l'ampleur des déformations au niveau du sol de fondation ou du sol aux alentours des fondations. Lorsque le sol est vulnérable aux effets sismiques tels que le cas des sols sablonneux lâches avec un potentiel de liquéfaction, la perte de résistance associée à ce phénomène peut être la cause principale des dommages à la structure et à l'infrastructure du pont. Comme exemple, le pont de Nishinomiya-ko qui a subit des dommages à la travée d'approche durant le séisme Hyogo-Ken Nanbu à Kobe en 1995 (Figure 1a). Les dommages peuvent être causés par la liquéfaction du sol conduisant à la perte de support d'assise (Moehle and Eberhard, 2000) (Figure 1b). En outre, la liquéfaction peut être associée à l'étalement latéral (Figures 1b et 1c).

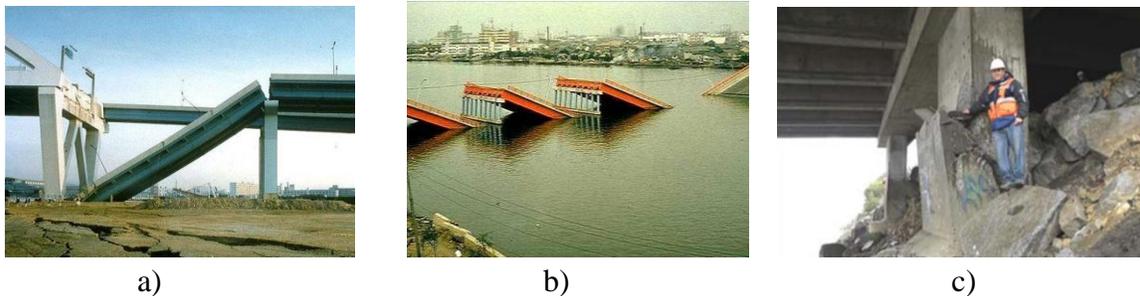


Figure 1 : Dommages dus à la liquéfaction. a) Perte de support. b) Perte de support. c) Colonne cisailée.

### Accélération spectrale

La norme canadienne CAN/CSA-S6-06 inclut la classification des sols pour les effets de site qui se basent sur les valeurs de l'onde de cisaillement moyenne correspondant au 30 premiers mètres ( $V_{s30}$ ). Le Tableau 1 montre les classes de sol de fondation utilisées dans les normes. Ce tableau montre que pour certains types de sols la norme S6-06 n'est pas applicable. Cette limitation requiert le développement de nouvelles données de la demande sismique en se basant sur la caractérisation des sols et ainsi déterminer les effets de site proprement dits. Donc, la présence de profil de sol avec des propriétés mécaniques variables favorise la modification du mouvement sismique avec amplification des ondes sismiques (Naimi, 2013).

La sélection des données des signaux sismiques représente l'un des principaux enjeux pour l'évaluation de la réponse sismique d'une structure. Dans certains cas, les signaux des mouvements sismiques sont sélectionnés pour avoir des spectres de réponse qui se rapprochent du spectre de l'aléa sismique donné par la norme. En général, il est raisonnable de choisir les

accélérations sismiques dont l'amplitude, la distance, les conditions du site et les failles soient représentatifs de l'aléa sismique du site de la structure considérée. En outre, ce choix dépend des données géologiques et géotechniques du site à l'étude.

Tableau 1 : Classes de sol de fondation

		Propriété des 30 1 <sup>er</sup> mètres	
Type de sol	Profil de sol	Vitesse moyenne des ondes de cisaillement $V_s$ (m/s)	
A	Roche Dure	$V_s > 1500$	
B	Roche	$760 < V_s < 1500$	
C	Sol très dense et roche tendre	$360 < V_s < 760$	
D	Sol consistant	$180 < V_s < 360$	
E	Sol meuble	$V_s < 180$	Résistance de sol non drainée au cisaillement $S_u < 25$ kPa
F	Autres sols	Une évaluation spécifique est exigée	

Le spectre de la région de Montréal correspondant, par exemple, à un pont de secours peut être construit à partir des données de la norme CAN/CSA-S6-06 tel que le ratio de l'accélération zonale  $A = 0.2$ , le coefficient de vitesse zonale  $Z_v = 4$ , le coefficient d'accélération zonale  $Z_a = 2$ , le facteur d'importance  $I = 3$  et le coefficient de site.

Le coefficient de site  $S$  dépend du profil de sol et de sa géométrie. Si les conditions de sol ne sont pas uniformes, le coefficient de site peut être variable pour le cas de ponts de longues portées. Pour un tel cas, chaque pile du pont est affectée par la variabilité des conditions géotechniques du site ce qui contribue forcément à la variabilité spatiale du mouvement sismique le long des appuis du pont.

### Caractéristiques des signaux sismiques

Les séismes peuvent être classés, par rapport au site, comme proches ou lointain (Krawinkler *et al.*, 2003; Alavi and Krawinkler, 2004). La plupart des séismes proches ont causés des dommages destructifs aux structures. Ces dommages sont liés directement à la nature de la rupture de la faille et son orientation par rapport au site endommagé. Le site, pour le champ proche, est

généralement supposé être à une distance inférieure à 50 km de la faille. Au voisinage de la faille, les mouvements du sol ont des caractéristiques différentes des séismes qui sont générés à une distance plus éloignée et ils sont influencés par le mécanisme de rupture connu sous le nom de directivité. Au moment de la rupture de la faille, les ondes générées se propagent suivant une direction donnée avec une vitesse proche de la vitesse de l'onde de cisaillement. Donc, l'énergie nécessaire pour arriver à un site dans un délai très court est plus importante comparée avec celle des séismes en champ lointain. Les figures 2 et 3 montrent quelques exemples de spectres (amortissement à 5%) et de signaux sismiques, provenant de la littérature (Naimi et Galal, 2008).

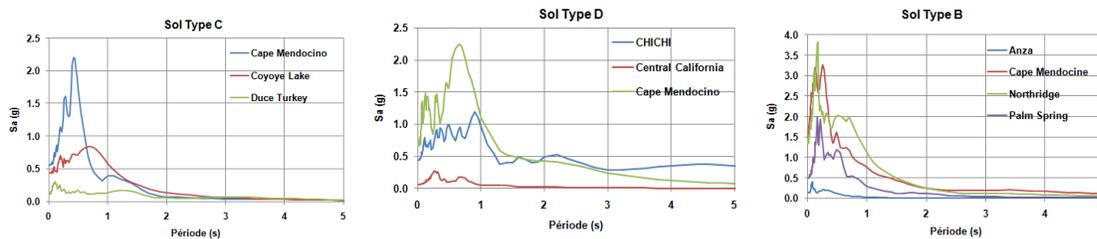


Figure 2 : Spectres de signaux sismiques.

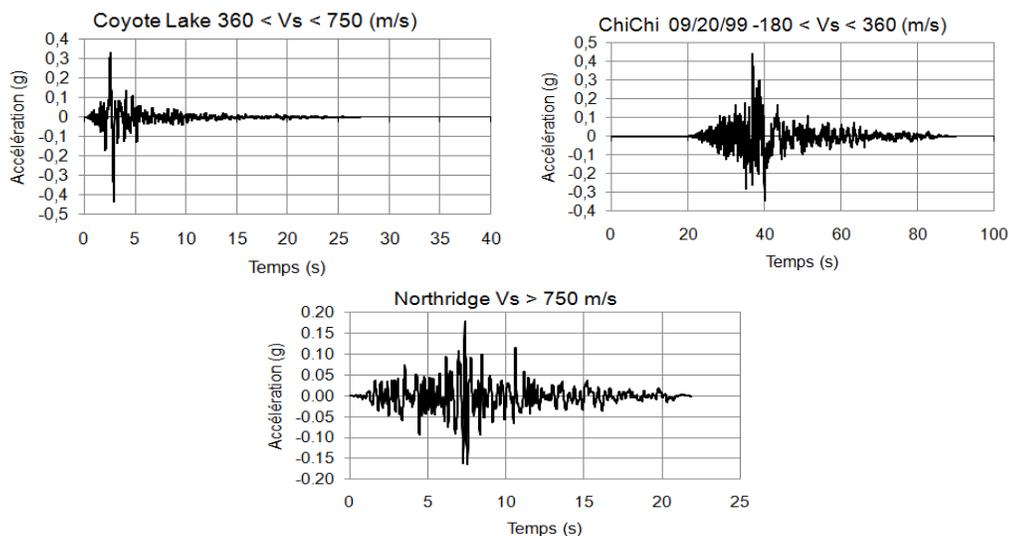


Figure 3 : Signaux sismiques.

### Forme du mouvement sismique

Il est communément admis que l'excitation sismique soit représentée par une onde de cisaillement se propageant verticalement vers le haut. Cette hypothèse est vraie pour le cas d'un multicouche parfaitement horizontal ou d'un monocouche supporté par un substratum rigide de forme géométrique régulière et horizontale. Pour des configurations géométriques complexes, cas d'irrégularités de couches ou de substratum, exemple la présence de bassin, l'hypothèse d'horizontalité n'est pas toujours vraie. En effet, l'onde sismique de cisaillement agit, en général, dans une direction inclinée (Naimi et al., 2001, Naimi, 2004). Cette hypothèse représente alors le cas des ondes volumiques qui se propagent dans toutes les directions suivant un angle

d'inclinaison par rapport à l'horizontale. Cet article considère un cas plus général représenté par un mouvement appliqué comme une onde de cisaillement inclinée à  $30^\circ$  par rapport à la verticale. Le profil de sol inclut des irrégularités de forme pour les couches de sol et leurs caractéristiques mécaniques pour les effets de site (Figure 4).

### Modélisation par éléments finis de l'espace semi-infini

Le modèle utilisé est composé d'un maillage par éléments finis du profil de sol tronqué par des frontières absorbantes fictives (Naimi et al., 2001). Le modèle est soumis à une onde sismique inclinée. La structure de pont de la référence (Quan et al., 2008) est prise comme exemple. La structure est un pont à haubans symétrique à trois travées et deux pylônes. Chaque travée de rive a une longueur de 134 m et la travée centrale a une longueur de 274 m pour un total de 542 m (Figure 4). La structure n'est pas incluse dans le modèle éléments finis mais les résultats des analyses de site sont effectués pour estimer les accélérations au niveau de la localisation de chaque fondation de deux piles du pont.

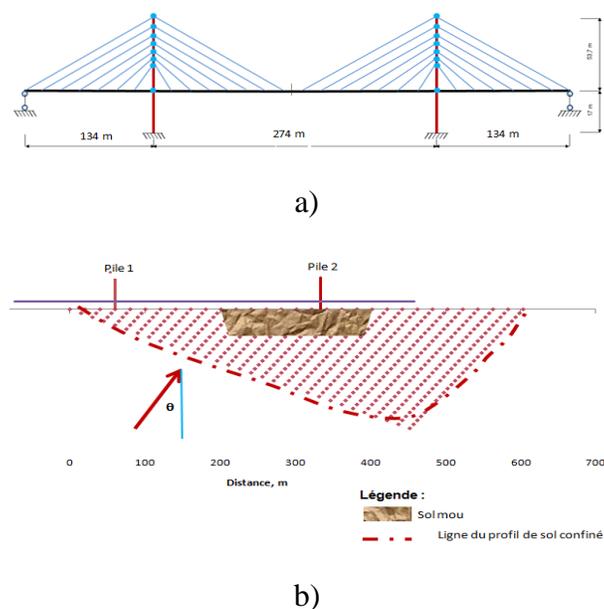


Figure 4 : Pont à haubans (Quan et al., 2008). a) pont. b) Modèle du profil de sol montrant l'onde sismique inclinée et la localisation des piles.

### Formulation

Les équations d'équilibre dynamique du mouvement sont obtenues par le principe de Hamilton. La formulation utilise la méthode des éléments finis conventionnelle pour le champ proche et la méthode des différences finies pour le champ lointain. Les équations d'équilibre sont

$$M\ddot{d} + C\dot{d} + Kd = f$$

avec  $M$ ,  $C$ ,  $K$  et  $f$  sont respectivement la matrice des masses, la matrice d'amortissement, la matrice de rigidité et le vecteur des forces nodales. Ou encore,

$$\begin{bmatrix} M_{nf-nf} & M_{nf-ff} \\ M_{ff-nf} & M_{ff-ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{d}_{nf} \\ \ddot{d}_{ff} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{nf-nf} & C_{nf-ff} \\ C_{ff-nf} & C_{ff-ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{d}_{nf} \\ \dot{d}_{ff} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{nf-nf} & K_{nf-ff} \\ K_{ff-nf} & K_{ff-ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{nf} \\ d_{ff} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ f_{ff} \end{Bmatrix}$$

Le vecteur  $\begin{Bmatrix} 0 \\ f_{ff} \end{Bmatrix}$ , représentant le mouvement sismique effectif, inclut les effets de propagation des ondes.

L'intégration de ces équations a été faite par un schéma numérique de type Newmark.

## Résultats et discussion

Pour démontrer l'effet de la variabilité spatiale du mouvement sismique sur la réponse dynamique du profil de sol et en conséquence sur les appuis du pont à haubans, le mouvement sismique tient en compte de l'effet de passage de l'onde, de l'effet de la perte de cohérence et de l'effet de site. Ces effets sont directement incorporés dans le modèle des éléments finis à 2-D du profil de sol considéré.

### Description du profil de sol et les paramètres du sol

Le profil de sol est composé de deux (2) couches de sol et d'un substratum. Le profil de sol, pour l'effet de bassin, est confiné par le milieu du substratum représenté par le roc. Les propriétés des couches de sol ont été choisies à partir des données de la référence (Naimi et Chouinard, 2013). Ces propriétés sont représentées par les vitesses des ondes de cisaillement et de compression, la masse volumique et le coefficient de Poisson. Le tableau 2 montre le profil de sol et les données utilisées.

Tableau 2 : Profil de sol

Site	Onde de cisaillement moyenne (m/s)	Onde de Compression moyenne (m/s)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficient de Poisson	Profondeur (m)
Couche 1	180	360	1600	0,25	15
Couche 2	565	1130	2300	0,25	> 15
Roc	2344	4688	2400	0,25	

La réponse dynamique est obtenue pour différentes fréquences d'excitation de l'onde sismique. L'analyse temporelle correspondant aux points d'emplacement des fondations de deux piles est obtenue pour des fréquences d'excitation variables allant de 14 Hz à 0.4 Hz. L'amplitude maximale des accélérations varie de 0.1 g à 0.55 g. la figure 5 montre la réponse maximale obtenue lorsque la fréquence du mouvement sismique atteint celle du profil du sol soit à 5 Hz. Ce

cas est attribué à la résonance du système pour un amortissement égal à 0%. Les courbes montrent aussi l'effet de la variabilité du mouvement sismique lorsqu'on mesure la réponse sismique à chaque unité de fondation. Le décalage entre les courbes signifie que l'onde sismique arrive en retard à la pile 2 par rapport à la pile 1.

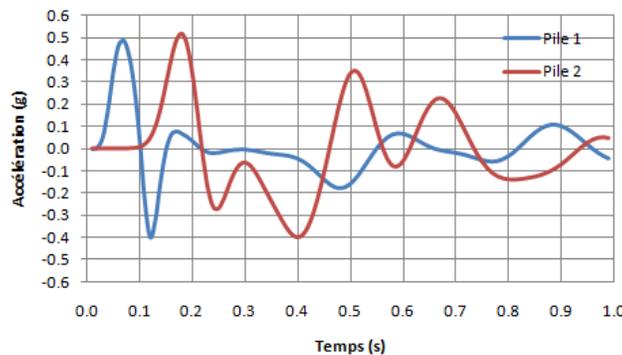


Figure 5 : Accélération réponse au droit des unités de fondations des piles 1 et 2.

Le temps de décalage est estimé à 0.14 s, ce qui correspond à une longueur d'onde de 36 m. ce résultat signifie que l'onde sismique ne couvre pas la distance séparant les 2 piles.

L'effet de site est aussi observé pour le cas de la pile 2 dont la courbe (Figure 5) montre les réflexions générées malgré l'arrêt du chargement après un temps de 0,1 s. Étant donné que la pile 2 se trouve à l'intérieur de la couche de sol molle, sa fondation subit considérablement cet effet.

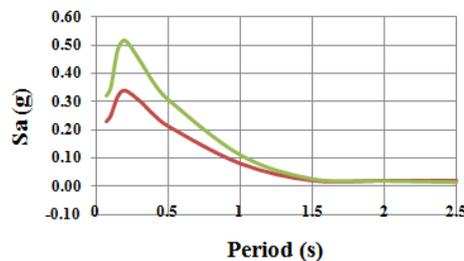


Figure 6 : Effet de site : amplification.

De plus, la variabilité spatiale est attribuable à l'effet de site (Figures 5 et 6), à la présence d'irrégularités du profil de sol et le temps de passage de l'onde sismique d'un appui à un autre. En outre l'amplification de l'onde sismique lorsqu'elle passe d'une couche de sol inférieure à la surface du sol l'amplitude maximale est augmentée (Figure 6). En effet, lorsque la couche de sol est molle, comparée avec les couches sous jacentes, les effets de site locaux sont présents et amplifient les ondes sismiques en modifiant leurs contenus fréquentiels. Ce cas est observé à la Figure 7 qui montre l'influence sur les courbes spectrales des deux appuis avec augmentation de l'amplitude de la réponse maximale.

Ces résultats démontrent que l'effet de la variabilité de l'onde sismique peut être expliqué par la présence de couche de sols mous et par la forme géométrique des couches du profil de sol.

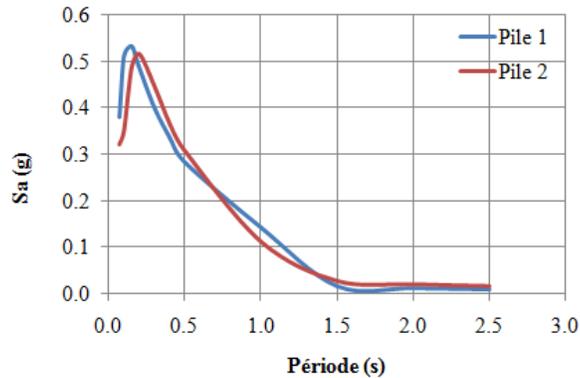


Figure 7 : Accélération spectrale au droit des unités de fondations des piles 1 et 2.

En conséquence, lorsque les appuis du pont subiront des mouvements différents comparés avec le cas où le pont subit un mouvement synchrone, l'effet de l'interaction sol-structure sera beaucoup plus prononcé et les dommages seront plus importants. Pour une analyse adéquate, le modèle doit prendre en compte l'effet de la variabilité du mouvement sismique en fonction des conditions de sites locaux.

## Conclusions

Les effets de la variabilité du mouvement sismique sur la réponse du profil de sol ont été présentés. Ces effets ont une influence sur le comportement dynamique des sols et donc un effet direct sur la réponse sismique des infrastructures (fondations des ponts de grandes portées). L'effet de la variabilité est attribuable à plusieurs facteurs notamment l'effet de site, la présence d'irrégularités du profil de sol et le temps de passage de l'onde sismique d'un appui à un autre. De plus, la variation de la rigidité du sol par rapport au roc joue un rôle important pour la détermination du mouvement sismique du sol. Lorsque la couche de sol est molle, comparée avec les couches sous jacentes, les effets de site locaux sont présents et amplifient les ondes sismiques en modifiant leurs contenus fréquentiels. En conséquence, les appuis du pont subiront des mouvements différents comparés avec le cas où le pont subit un mouvement synchrone.

Cette étude est limitée à un cas de profil de sol et un cas de mouvement sismique. Pour pouvoir généraliser la conclusion, d'autres cas de profil de sol doivent être considérés avec des chargements sismiques variés.

## References

Naimi, M. and Chouinard, L. 2013. 2-D Modelling of Site Effect to Inclined Incident P Wave. *Eastern Section, SSA 2013*, 6-8 Octobre La Malbaie Charlevoix, Québec, Canada.

Quan, W., Li, H.N. and Liu, X.Z. 2013. "Seismic response of large-span cable-stayed bridge under multi-component multi-support earthquake excitation". The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.

Moehle, J.P., Eberhard, M.O. 2008. "Earthquake Damage to Bridges". Bridge Engineering Handbook. Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan. Boca Raton: CRC Press.

<http://2012am.eeri-events.org/wp-content/uploads/2012/05/1-Buckle-Lessons-Learned-Recent-Earthquakes.pdf>

Galal, A. and Naimi, M. 2008. "Effect of Soil Conditions on the response of reinforced concrete tall structures to near fault earthquakes". Article accepté pour publication au journal Structural Design Tall Spec. Build, Wiley Interscience.

Naimi, M. 2004. "Importance of radiating damping on the free field dynamic response of a half space to inclined harmonic SV waves", XXIX General Assembly of the European Seismological commission, Sept. 12-17, GFZ Potsdam, Germany.

Naimi, M. Sarma, S.K. and Séridi, A.. 2001. "New inclined boundary conditions in seismic soil structure interaction problems". Engineering Structures. Elsevier Science Ltd., Vol. 23/8 pp. 966-978.

Alavi B, Krawinkler H. 2004. Behavior of moment resisting frame structures subjected to near-fault ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **33**(6): 687–706.

Krawinkler H, Medina R, Alavi B. 2003. Seismic drift and ductility demands and their dependence on ground motions. *Engineering Structures* **25**(5): 637–653