

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade** de **DOCTEUR EN SCIENCES**

En : Génie Civil

Spécialité : Génie Civil

Par : DERBAL Rachid

Sujet

**Simulation des mouvements sismiques variables dans l'espace :
Effet de site et réponse dynamique**

Soutenue publiquement, le / / 2021, devant le jury composé de :

M ZENDAGUI Djawed	Professeur	Université de Tlemcen	Président
M MATALLAH Mohammed	Professeur	Université de Tlemcen	Directeur de thèse
M IVORRA Salvador	Professeur	Université d'Alicante, Espagne	Co- Directeur de thèse
M DERRAS Boumediène	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
Mme BENADLA Zahira	Professeur	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mme BENMANSOUR Nassima	MCB	Université de Tlemcen	Invitée

ملخص

يتطلب تقييم الاستجابة الزلزالية للمنشآت الممتدة التنبؤ بالحركة الزلزالية على سطح الأرض والتي تختلف في المكان والزمان. هذا التباين هو نتيجة الجمع بين عمل المصدر الزلزالي، الذي يولد موجات زلزالية، وانتقال هذه الموجات بين المصدر والموقع، وخاصة تأثير الموقع. هذا الأخير يرجع الى التباين المكاني للخصائص المحلية لنمط التربة، والذي يمكن أن يؤثر على قيمة ومحتوى التردد للحركة الزلزالية.

الهدف من هذا العمل هو تقييم، من ناحية، تأثير التباين المكاني على الحركة الزلزالية التفاضلية، ومن ناحية أخرى، حساسية الاستجابة الديناميكية للجسور مع مراعاة هذا التأثير.

في هذا الصدد، تم تطوير تقنية لمحاكاة الحركات الزلزالية المتغيرة مكانيًا في هذه الأطروحة. حيث تم أخذ جميع عوامل التباين المكاني للحركة الزلزالية في الاعتبار. نحن نهتم بشكل خاص بتأثير الموقع الذي ينتج عنه تقدير الاستجابة الزلزالية للأرض. بناءً على نظرية انتشار الموجات أحادية البعد، يتم الحصول على هذه الاستجابة الزلزالية مبدئيًا عن طريق نمذجة الموقع بواسطة تربة أحادية الطبقة. بعد ذلك، تم توسيع نطاق هذا النموذج ليأخذ في الاعتبار الطبيعة متعددة الطبقات للتربة

تم التيقن من صحة تقنية المحاكاة المطورة من خلال سلسلة من محاكاة الحركة الزلزالية المتغيرة مكانيًا مع الأخذ في الاعتبار النموذجين لتأثير الموقع. تم إجراء العديد من التحليلات الديناميكية للجسور تحت الأحمال الزلزالية التفاضلية. حيث تمت مناقشة مقارنات مختلفة للقوى الداخلية الناتجة عن حالات مختلفة من التحميل الزلزالي.

أظهرت نتائج محاكاة الحركات الزلزالية أن تضخيم الموقع يتوقف على عمق طبقات التربة ونوع الموقع المعتمد. بالإضافة إلى ذلك، وجد أن الحركات الزلزالية المحاكاة جد مشروطة بتأثير الموقع. لذلك، فإن الاستجابة الديناميكية للجسور حساسة أيضًا لهذا التأثير. يؤدي إهمال الظروف المحلية للموقع في التحليل الديناميكي للمنشآت الممتدة إلى قلة تقدير كبيرة في تقدير الاستجابة الزلزالية.

الكلمات المفتاحية: الحركة الزلزالية المتغيرة - تأثير الموقع - التضخيم - التحليل الديناميكي - الجسر.

Résumé

L'évaluation de la réponse sismique des structures étendues nécessite la prédiction du mouvement sismique à la surface du sol, qui est variable dans l'espace et dans le temps. Cette variabilité est le résultat de la combinaison de l'action de la source sismique qui génère des ondes sismiques, de la propagation de ces ondes entre la source et le site, et particulièrement de l'effet de site. Ce dernier est dû à la variation spatiale des caractéristiques locales du profil du sol, il peut affecter l'amplitude et le contenu fréquentiel du mouvement sismique.

Le but de ce travail vise à évaluer, d'une part, l'impact de l'effet de site sur le mouvement sismique différentiel et d'autre part, la sensibilité de la réponse dynamique des ponts en tenant en compte cet effet.

A cet égard, une technique de simulation des mouvements sismiques spatialement variables a été développée dans cette thèse. Où l'ensemble des facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique ont été pris en considération. On s'intéresse notamment à l'effet de site qui se traduit par l'estimation de la réponse sismique du sol. En se basant alors sur la théorie de propagation unidimensionnelle des ondes, cette réponse sismique est obtenue initialement en modélisant le site par un sol monocouche. Ensuite, ce modèle a été étendu pour tenir en compte la nature multicouche du sol.

La technique de simulation développée a été validée à travers une série de simulations des mouvements sismiques spatialement variables en considérant les deux modèles de l'effet de site. Plusieurs analyses dynamiques de ponts sous des cas de chargements sismiques différentiels sont effectuées. Où, diverses comparaisons des efforts internes issus de différents cas de chargement sismique ont été discutées.

Les résultats de simulations des mouvements sismiques ont montré que l'amplification de site dépend de la profondeur des couches de sol et du type du site adopté. De plus, il a été constaté que les mouvements sismiques simulés sont fortement conditionnés par l'effet de site. Par conséquent, la réponse dynamique des ponts est également sensible à cet effet. Le fait de négliger les conditions locales de site dans l'analyse dynamique des structures étendues donne lieu à une sous-estimation significative de la réponse sismique.

Mots clés : mouvement sismique variable – effet de site – amplification – analyse dynamique – pont.

Abstract

The evaluation of the seismic response of extended structures requires the prediction of the seismic ground motion on the surface, which is variable in space and time. This variability is the result of the combination of the action of the seismic source, which generates seismic waves, of the propagation of these waves between the source and the site, and particularly of the local site effect. This latter is due to the spatial variation of the local characteristics of soil profile, it can affect the amplitude and the frequency content of the seismic ground motion.

The aim of this work is to evaluate, on the one hand, the impact of the site effect on the differential seismic ground motion and on the other hand, the sensitivity of the dynamic response of bridges considering this effect.

In this regard, a simulation technique of spatially variable seismic ground motions has been developed in this thesis. Where all factors of spatial variability of seismic ground motion are taken into account. We are particularly interested to the local site effect, which results of the seismic ground response estimation. Based on one-dimensional wave propagation theory, this seismic response is obtained initially by a single-layer soil model of site. Then, this model was extended to take into account the multi-layered nature of the soil.

The simulation technique developed was validated through a simulations series of spatially variable seismic ground motions by considering the two site effect models. Several dynamic analyzes of bridges under differential seismic loadings are carried out. Where, various comparisons of the internal forces resulting from different cases of seismic loading were discussed.

The results of seismic ground motions simulations have shown that the site amplification depends on the depth of soil layers and the ground type of adopted site. In addition, it was found that the simulated seismic ground motions are strongly conditioned by the site effect. Therefore, the dynamic response of bridges is also sensitive to this effect. Neglecting local site conditions in the dynamic analysis of extended structures leads to a significant underestimation of the seismic response.

Keywords : spatial seismic ground motion – site effect – amplification – dynamic analysis – bridge.

À la mémoire du Professeur Mustpha DJAFOUR,

Paix à son âme.

Remerciements

J'exprime d'abord mes remerciements à mes directeurs de thèse, Professeur Mohammed MATALLAH, directeur du laboratoire RISAM à l'université Aboubakr Belkaid de Tlemcen, pour avoir accepté de diriger cette thèse et Professeur Salvador IVORRA, vice-recteur à l'université d'Alicante, Espagne, qui m'a transmis sa passion de recherche scientifique et m'a toujours motivé durant ce travail. Merci donc pour votre accueil, votre disponibilité, votre exigence, vos conseils précieux et pour l'intérêt que vous avez porté à mon travail. Veuillez trouver ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie vivement, Djawad ZENDAGUI vice-recteur à l'université Aboubak Belkaid de Tlemcen, pour l'honneur qu'il me fait en présidant mon jury de thèse.

J'adresse mes plus sincères remerciements aux examinateurs, M. Boumediène DERRAS, Professeur à l'université Dr. Moulay Tahar de Saida, Mme Zahira BENADLA, Professeur à l'université Aboubakr Belkaid de Tlemcen, pour avoir bien voulu participer au jury. Leurs commentaires et regard critiques ont contribué à améliorer et enrichir de manière significative ce travail.

Je remercie également Dr. Nassima BENMANSOUR qui a accompagné cette thèse depuis plusieurs années. Qu'elle trouve en ce travail ma sincère considération.

Je suis également reconnaissant envers l'équipe du département de génie civil de l'université d'Alicante, Espagne pour toutes les facilités qui m'ont été accordées dans la période de stage et je profite l'occasion de remercier Prof. Salvador Ivorra et Dr. Antonio Abril Tanza.

Mes remerciements les plus chaleureux vont également à mes très chers parents, ma femme Ahlem et mes adorables enfants Hayfaa Iness et Mohamed Imad Eddine, qui m'ont soutenu tout au long de ces années de travail. Qu'ils trouvent en ces quelques mots, ma profonde reconnaissance.

Table des matières

ملخص.....	i
Résumé.....	ii
Abstract	iii
Remerciements	v
Table des matières	vi
Notations utilisées.....	xii
Liste des Tableaux	xvi
Liste des Figures.....	xviii
Introduction Générale	1
1. Problématique	2
2. Objectifs et méthodologie.....	6
3. Organisation de la thèse.....	8
Chapitre 1.....	10
Variabilité spatiale du mouvement sismique	10
1. Introduction.....	11
2. Notions générales sur la variabilité spatiale du champ sismique.....	11
3. Mesure de la variabilité spatiale du mouvement sismique	12
3.1. Fonction de cohérence.....	14
3.2. Types des fonctions de cohérence.....	15
3.2.1. La cohérence différée	16
3.2.2. La cohérence non différée	16
3.2.3. La cohérence d'onde plane	17
4. Modélisation de la variabilité spatiale du mouvement sismique basée sur l'incohérence des ondes sismique	18
4.1. Modèles Analytiques.....	18
4.2. Modèles empiriques	28
4.3. Modèles semi-empiriques.....	37
5. Effet de passage d'onde.....	42
6. Effet de site	42

7. Conclusion	43
Chapitre 2	45
Simulation des mouvements sismiques variables dans l'espace et analyse de leurs effets sur les ponts : État de l'art	45
1. Introduction.....	46
2. Aperçu sur les travaux antérieurs sur l'effet de la variabilité spatiale du mouvement sismique sur les structures	46
3. Conclusion	87
Chapitre 3	89
Analyse de la réponse sismique des sites	89
1. Introduction.....	90
2. Caractérisation de l'effet de site sismique	91
2.1. Origine des effets de site	91
2.2. Type des effets de site	92
2.2.1. Les effets de site topographiques	93
2.2.2. Les effets de site lithologiques	93
3. Modélisation de la réponse sismique des sols	95
3.1. Modèles unidimensionnels	96
3.1.1. Réponse sismique d'un sol monocouche	98
3.1.2. Propagation des ondes <i>SH</i>	98
3.1.3. La combinaison des ondes <i>P</i> et <i>SV</i>	102
3.2. Analyse unidimensionnelle linéaire équivalente	105
3.3. Analyse unidimensionnelle non linéaire	105
3.4. Modèles bidimensionnels	106
3.5. Modèles tridimensionnels.....	106
3.6. Modèles vibratoires.....	107
4. Formulation analytique du modèle unidimensionnel	107
4.1. Cas d'un site monocouche	107
4.2. Cas d'un sol multicouche	108
5. Conclusion	111
Chapitre 4	113
Simulation du champ du mouvement sismique tenant en considération les conditions locales du site	113
1. Introduction.....	114

2.	Aperçu sur les méthodes de simulation des mouvements sismiques spatialement variables.....	116
3.	Approches de simulation des mouvements sismiques	118
3.1.	Approche inconditionnelle	119
3.2.	Approche conditionnelle	119
3.3.	Approches de simulation inconditionnelle et conditionnelle : Discussion... ..	120
4.	Notions générales sur le traitement probabiliste d'un processus stochastique	121
4.1.	Processus Aléatoire	121
4.2.	Fonction d'Auto-Corrélation	121
4.3.	Fonction d'Inter-Corrélation.....	121
4.4.	Fonction de Densité Spectrale de Puissance.....	122
5.	Simulation du champ du mouvement sismique spatialement variable	122
5.1.	Simulation d'un champ de mouvement sismique différentiel stationnaire ..	122
5.1.1.	Evaluation de la fonction de densité spectrale de puissance.....	123
5.1.2.	Evaluation de la fonction d'inter-densité spectrale	124
5.1.3.	Simulation des processus aléatoires stationnaires par la méthode de représentation spectrale.....	125
5.2.	Prise en compte de la non-stationnarité du mouvement sismique	127
5.2.1.	Méthode de segmentation	127
5.2.2.	Méthode de modulation temporelle.....	128
5.2.3.	Discussion sur le choix adéquat pour introduire la non-stationnarité .	130
5.3.	Prise en compte de la variabilité spatiale et temporelle du mouvement sismique	131
5.3.1.	Densité spectrale de puissance	131
5.3.2.	L'effet d'incohérence.....	134
5.3.3.	L'effet de passage d'onde	135
5.3.4.	L'effet de site	135
5.4.	Synthèse de la technique de simulation de mouvements sismiques spatialement variables.....	137
6.	Vérification de la technique de simulation des mouvements sismiques spatialement variables	138
7.	Conclusion	149

Chapitre 5	151
Analyse de la variabilité spatiale des mouvements sismiques avec prise en compte de l'effet de site : Simulations et réponses dynamiques	151
1. Introduction.....	152
2. Choix de l'approche de simulation et définition des cas de simulation des mouvements sismiques.....	153
3. Modélisation de l'effet de site par un sol monocouche.....	155
3.1. Simulation du chargement sismique d'un portique de pont supporté par deux piles	156
3.1.1. Caractéristiques géométriques de l'exemple.....	156
3.1.2. Densité spectrale de puissance de cible	157
3.1.3. Caractéristiques des sites	157
3.1.4. Choix du modèle de Cohérence.....	159
3.1.5. Etude paramétrique en fonction de l'épaisseur de la couche de sol et du type du site	159
3.1.6. Choix de sites adoptés pour la simulation des mouvements sismiques	163
3.2. Simulation du chargement sismique d'un portique de pont supporté par trois piles	168
3.2.1. Présentation du modèle	168
3.2.2. Densité spectrale de puissance de cible	168
3.2.3. Caractéristiques des sites	169
3.2.4. Amplification des sites.....	169
3.2.5. Choix du modèle de Cohérence.....	170
3.2.6. Résultats et interprétations	171
3.3. Cas d'étude d'un viaduc ferroviaire de 160 m de longueur	178
3.3.1. Géométrie du viaduc ferroviaire.....	178
3.3.2. Modèle du viaduc en éléments finis	179
3.3.3. Analyse modale du viaduc	180
3.3.4. Modèle de configuration du site	181
3.3.5. Densité spectrale de puissance du mouvement sismique de référence	182
3.3.6. Modèle de Cohérence adopté	183
3.3.7. Amplification des sites.....	184
3.3.8. Simulation des chargements sismiques différentiels	184
3.3.9. Analyse dynamique du viaduc	187
3.4. Cas d'étude du pont à haubans de Mila.....	190

3.4.1.	Géométrie du pont à haubans	190
3.4.2.	Modèle du pont en éléments finis.....	191
3.4.3.	Analyse modale du pont à haubans	191
3.4.4.	Modèle de configuration du site	193
3.4.5.	Densité spectrale de puissance du mouvement sismique de référence	194
3.4.6.	Choix du modèle de Cohérence.....	194
3.4.7.	Amplification des sites.....	194
3.4.8.	Simulation des chargements sismiques différentiels	194
3.4.9.	Analyse dynamique du pont à haubans.....	196
3.5.	Cas d'étude d'un pont ferroviaire de 140 m de longueur.....	198
3.5.1.	Géométrie du pont ferroviaire	199
3.5.2.	Modèle de configuration du site	199
3.5.3.	Densité spectrale de puissance du mouvement sismique de référence	201
3.5.4.	Choix du modèle de Cohérence.....	201
3.5.5.	Amplification des sites.....	201
3.5.6.	Simulation des chargements sismiques différentiels	204
3.5.7.	Modèle du pont en éléments finis.....	209
3.5.8.	Analyse dynamique du pont.....	209
3.6.	Synthèse et conclusions.....	215
4.	Modélisation de l'effet de site par un sol multicouche	217
4.1.	Simulation du chargement sismique d'un portique de pont supporté par trois piles	218
4.1.1.	Caractéristiques géométriques de l'exemple.....	218
4.1.2.	Comparaison de modèles de l'effet de site	219
4.1.3.	Densité spectrale de puissance de cible	222
4.1.4.	Caractéristiques des sites	222
4.1.5.	Modèle de Cohérence	222
4.1.6.	Simulation des mouvements sismiques	223
4.2.	Simulation du chargement sismique d'un portique de pont supporté par quatre piles	228
4.2.1.	Caractéristiques géométriques de l'exemple.....	228
4.2.2.	Densité spectrale de puissance de cible	229
4.2.3.	Caractéristiques des sites	229
4.2.4.	Amplification des sites.....	229
4.2.5.	Choix du modèle de Cohérence.....	230

4.2.6. Simulation des mouvements sismiques	230
4.3. Synthèse et conclusions	236
5. Conclusion	237
Conclusions Générales	239
1. Eléments de synthèse.....	240
2. Perspectives	242
Références Bibliographiques	245
Annexe A.	254
Modèles de cohérence	254
1. Modèles Analytiques.....	255
2. Modèles empiriques	256
Annexe B.	263
Classification des sites	263
Annexe C.	266
Exemples de simulation des mouvements sismiques	266

Notations utilisées

$\gamma_{jk}(\omega)$	Fonction de cohérence d'un mouvement sismique entre deux points j et k .
$S_{jk}(\omega)$	Fonction d'inter-densité spectrale de puissance de l'excitation sismique entre deux points j et k .
$S_j(\omega)$	Fonction de densité spectrale de l'excitation sismique au point j .
d	Distance séparant mes points j et k .
ω	Fréquence angulaire.
N, M	Nombres de modes utilisés dans l'analyse
H_k^j	Fonction de transfert du mode K au niveau de la station j , elle est définie comme la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle.
K_T^{-1}	Paramètre indiquant que le mouvement à la source est corrélé seulement pour un décalage de temps inférieur à K_T^{-1} .
$S_{vv}(\omega)$	Densité spectrale de puissance des vitesses à la source.
$S_{u_j u_n}(u, \omega)$	Densité spectrale de puissance des mouvements sismiques des points
φ_{jk}	Facteur de participation du mode i à la station j .
ξ_{jk}	Amortissement du mode k à la station j .
ω_{jk}	Fréquence naturelle du mode k à la station j .
H_{jk}^*	Fonction de transfert du mode k de la source jusqu'à la station j
$S_{vv}(\omega)$	Densité spectrale de puissance des vitesses relatives obtenue à partir de la fonction de corrélation développée par Aki (1967).
β	Coefficient de participation des colonnes du sol.
ω_0	Moyenne de la fréquence prédominante.
ζ_0	Moyenne du coefficient d'amortissement.
σ_{ww}	Ecart type de la fréquence prédominante.
$R_{ww}(u)$	Fonction d'autocorrélation de la fréquence prédominante
$S_\theta(\omega)$	Densité spectrale de chaque onde.
$E_\theta(\omega, y)$	Sténographies de deux termes complexes
$F_\theta(\omega, y)$	Sténographies de deux termes complexes.
C_p^2	Vitesse des ondes de compression dans le profil du sol.
$S_0(\Omega)$	Densité spectrale de puissance de Kanai et Tajimi.
σ_ε	Écart type du facteur de randomisation ε ; appelé paramètre de dispersion.
u_0	Distance de corrélation
ω_g	Fréquence prédominante du sol local

ζ_g	Coefficient d'amortissement du sol local
c	Vitesse de propagation apparente à la surface du sol
$X_{(i)l_1l_2\dots l_R}(\zeta, t)$	Processus aléatoires de taille $n \times 1$.
$\{H_{l_j}(b_j)\}_{l_i}^{N_s}$	Polynômes orthogonaux correspondant à chaque variable aléatoire.
ζ	Variabiles aléatoires temporelles
$A_\theta, B_\theta, C_\theta$	Amplitudes des ondes P incidentes et réfléchies,
D_θ	Amplitudes des ondes SV incidentes et réfléchies,
g	Terme qui décrit la fonction de distribution de l'amplitude d'onde.
C_P^1	Vitesses des ondes de compression dans le profil du sol
C_S^1	Vitesses des ondes de cisaillement dans le profil du sol
V_s	Vitesse des ondes de cisaillement.
v	Constante.
d_{ij}	Distance de séparation entre deux stations
ω	Pulsation du mouvement sismique respectivement.
$a(\omega)$	Fonction de la fréquence ω dont les paramètres sont évalués à partir des données sismiques de l'événement 5 enregistré par SMART-1.
A, α, K, b et ω_0	Coefficients évalués à partir des enregistrements sismiques par une analyse de régression.
\vec{V}	Vecteur de la vitesse apparente de propagation de l'onde sismique suivant la direction épacentrale
u^l	Distances de séparation entre les stations dans les directions longitudinales
u^t	Distances de séparation entre les stations dans les directions transversales de la propagation des ondes,
β_1 et β_2	Constantes.
V_{app}	Vitesse de propagation apparente des ondes.
a_1, a_2, b_1, b_2, c, m et s	Constantes déterminées par régression non linéaire.
k	Coefficient qui exprime l'effet du bruit présent dans les données et qui peut être estimé à partir des valeurs médianes de la fonction de cohérence au niveau des hautes fréquences ($f > 50Hz$).
u_r	Distance de séparation entre deux stations projetée sur la direction de propagation des ondes.
η	Terme de phase aléatoire.
β	Coefficient qui désigne le niveau d'incohérence.
α	L'angle d'incidence des ondes arrivant au site.
v_{app}	Vitesse apparente au substratum rocheux.
$a_1, a_2, a_3, n_1,$ n_2 et f_c	Correspondent au mouvement horizontal ou vertical.
a, c, d, α, β et δ	Constantes et sont données pour chaque réseau et pour chaque composante horizontale et verticale.
h	Distance entre le i^{ieme} et k^{ieme} point de profondeurs différentes.

R	Distance épacentrale.
ω_1	Fonction représentant la variation de la fréquence en fonction de la distance épacentrale et la distance entre deux points d'enregistrement.
H	Distance traversée par les ondes.
r_0	Mesure des hétérogénéités susceptibles d'exister le long du trajet des ondes.
β	Estimation de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement à travers le milieu.
u^2	Mesure de la variation relative des propriétés élastiques du milieu.
$\bar{\alpha}$	Paramètre qui contrôle la diminution exponentielle de la fonction de cohérence,
u^l	Distance projetée le long de la direction de propagation des ondes entre les deux stations
V_{app}	Vitesse apparente de propagation de l'onde prédominante.
u^L	Distance de séparation projetée le long la direction de propagation des ondes.
$V_{app}(\omega)$	Vitesse apparente de propagation de l'onde prédominante en fonction de la fréquence ω .
$\theta_{wp}(u^L, \omega)$	Angle du déphasage.
V_{app}	Constante déterminée en moyenne à partir d'enregistrement sismique ou en étudiant les caractéristiques de site.
\Im	Indiquent la partie réelle
\Re	Indiquent la partie imaginaire
θ_{kl}	Angle de déphasage
k e t l	Désignent deux points de la surface du sol.
$H(\omega)$	Fonction de transfert de la colonne du sol sous le point considéré.
μ	Facteur de pic.
G	Module de cisaillement du sous-sol
ζ_s	Amortissement correspondant.
$U_j(i\omega)$ et $U_{j'}(i\omega)$	Transformées de Fourier du mouvement sismique
$u_j(t)$ et $u_{j'}(t)$	A la surface et au substratum rocheux
ξ_j	Coefficient d'amortissement calculé à partir de la dissipation d'énergie due à la propagation des ondes sismiques.
Q	Facteur de qualité.
τ_j	Temps de propagation que fait l'onde du point j' au j .
r_j	Coefficient de réflexion
$G_j(\omega)$	Transformé de Fourier du processus $g_j(t)$.
$ G_j(\omega) $	Module de la fonction $G_j(\Omega)$.
$G_j(\omega)$	Transformés de Fourier des processus $g_j(t)$
$G_k(\omega)$	Transformés de Fourier des processus $g_k(t)$.

a	Accélération du sol.
λ_{ji}	Distance de chaque point j .
V	Vitesse de propagation d'ondes sismique.
$H_j(i\omega)$	Fonctions de transfert au point j
$H_k(i\omega)$	Fonctions de transfert au point k
$S_g(\omega)$	Fonction de densité spectrale de puissance à la base rocheuse.
$S_{j'k'}(i\omega)$	Fonction d'inter-densité spectrale à la base rocheuse.

Liste des Tableaux

Tableau 1. 1. Distances caractéristiques entre stations de réseaux denses de sismographes.....	13
Tableau 1. 2. Paramètres du modèle de Abrahamson (2007) pour tous les types de sol (Svay 2017).....	36
Tableau 2. 1. Paramètres du substratum rocheux et les différents types de sol (Bi et al. 2010). 56	
Tableau 2. 2. Cas d’analyses (Benmansour et al. 2012).....	66
Tableau 2. 3. Classification des sites conformément aux prévisions de NEHRP (FEMA P-749 2010).....	75
Tableau 2. 4. Enregistrements sismiques adoptés (base de données PEER-2003 cité par Fontara et al. 2015).....	79
Tableau 2. 5. Cas de chargements différentiels (Shiravand and Parvanehro 2019).....	84
Tableau 4. 1. Paramètres de la fonction de densité spectrale de puissance Kanai-Tajimi filtrée selon Ellingwood and Batts, (1982) (cité par Deodatis (1996)).	133
Tableau 4. 2. Paramètres de la fonction de densité spectrale de puissance Kanai-Tajimi filtrée selon Kiureghian and Neuenhofer (1992) et Dumanogluid and Soyluk (2003).	133
Tableau 4. 3. Paramètres les plus utilisés de la fonction de densité spectrale de puissance Kanai-Tajimi filtrée.....	134
Tableau 4. 4. Fréquences prédominantes et amplifications des sites étudiés.	141
Tableau 4. 5. Paramètres des sites et du substratum rocheux adoptés.	141
Tableau 5. 1. Cas de simulation des signaux sismiques.	155
Tableau 5. 2. Paramètres du substratum rocheux et des sites adoptés.	158
Tableau 5. 3. Fréquences prédominantes en considérant un sol compact.	159
Tableau 5. 4. Fréquences prédominantes en considérant un site meuble.	160
Tableau 5. 5. Fréquences prédominantes en considérant un site très meuble.	161
Tableau 5. 6. Fréquences prédominantes	162
Tableau 5. 7. Fréquences prédominantes	163
Tableau 5. 8. Paramètres des sites adoptés pour l’exemple étudié.	163
Tableau 5. 9. Paramètres des sites adoptés.....	170
Tableau 5. 10. Charges permanentes appliquées au tablier.	179
Tableau 5. 11. Périodes des quatre premiers modes de vibration.....	181
Tableau 5. 12. Paramètres des sols de fondation du viaduc.	182

Tableau 5. 13. Paramètres adoptés des sites.	193
Tableau 5. 14. Paramètres adoptés des types des sites (basé sur le RPOA).	200
Tableau 5. 15. Configurations adoptées des sites.	201
Tableau 5. 16. Fréquence prédominantes des sites en utilisant les trois méthodes.	221
Tableau 5. 17. Amplitudes d'amplification des sites en utilisant les trois méthodes.	221
Tableau 5. 18. Caractéristiques des sols adoptés dans l'exemple étudié.	222
Tableau 5. 19. PGA, PGV et PGD calculés à partir des deux modèles de l'effet de site pour des mouvements sismiques différentiel (avec tous les facteurs).	227
Tableau 5. 20. Paramètres des sols adoptés.	229
Tableau 5. 21. Fréquences prédominantes et amplifications des sites étudiés.	230

Liste des Figures

Figure 1. 1. Le réseau SMART-1 (Lotung, Taiwan) (Zerva et al. 1986; Harichandran 1999).....	13
Figure 1. 2. Contours de temps d'arrivée relatif de SMART-1 : Evènement 20 (Harichandran 1999).....	14
Figure 1. 3. Principaux facteurs influant la propagation des ondes sismiques : source, trajectoire et caractéristiques du site.	15
Figure 1. 4. Comparaison entre la cohérence différée et la cohérence d'onde plane pour le modèle de cohérence d'Abrahamson (Abrahamson et al. 1991).	17
Figure 2. 1. Fonctions de transfert pour différents sites (Der Kiureghian 1996).	49
Figure 2. 2. Méthodologie générale d'analyse dynamique des ponts sous l'effet combiné des conditions locales du site, la variabilité spatiale et l'interaction sol-structure (Sextos et al. 2003a, b).....	51
Figure 2. 3. Schéma du portique du pont à travers un canyon (Bi et al. 2010).....	53
Figure 2. 4. Fonction de densité spectrale de puissance adoptée au substratum rocheux (Bi et al. 2010).	54
Figure 2. 5. Fonctions de transfert des sites pour des profondeurs différentes.....	55
Figure 2. 6. Fonction de densité spectrale de puissance à la surface pour des profondeurs différentes.	55
Figure 2. 7. Réponses dynamiques normalisées pour différentes profondeurs de sol...	56
Figure 2. 8. Fonctions de transfert des différents types de sol.....	57
Figure 2. 9. Réponses dynamiques normalisées des différents types de sol.....	57
Figure 2. 10. Evolution de cohérence en fonction de l'intensité (Bi et al. 2010).	58
Figure 2. 11. Réponses dynamiques normalisées des différentes intensités d'incohérence.	58
Figure 2. 12. Profils des sols le long du pont de Caruthersville (Mwafy et al. 2011). .	60
Figure 2. 13. Implantation du pont à Caruthersville, Missouri (USA) (Mwafy et al. 2011).	60
Figure 2. 14. Fonction de cohérence de Harichandran et Vanmarcke (1986).	62
Figure 2. 15. Spectre de réponse pseudo-accélération des quatre types de sites S1, S2, S3 et S4 (MTP 2010).....	63
Figure 2. 16. Section transversal du pont (FHWA 1996).	63
Figure 2. 17. Vue en plan et en long du pont 1 (FHWA 1996).....	64

Figure 2. 18. Comparaison entre les spectres de réponse simulés et celui cible : (a) S1, (b) S2, (c) S3 et (d) S4.....	65
Figure 2. 19. Configuration des sites composés de plusieurs couches de sol (Bi et Hao 2012).....	68
Figure 2. 20. Amplification des sites en fonction des types d’ondes et la direction considérés.	68
Figure 2. 21. Comparaison des signaux sismiques simulés avec le spectre de réponse cible.	69
Figure 2. 22. Segmentation d'un enregistrement basée sur l’intégrale de l’énergie cumulée, la fréquence prédominante et la largeur de bande (Konakli et Der Kiureghian 2012).....	70
Figure 2. 23. Comparaison de l'enregistrement original en déplacement avec les déplacements simulés (séisme d’Izmit 1999) à une distance nulle (Konakli et Der Kiureghian 2012).	71
Figure 2. 24. Application numérique : modèle du pont Penstock (Konakli et Der Kiureghian 2012).	71
Figure 2. 25. Spectre de réponse pseudo-accélération de 20 simulations en modélisant le profil de sol par 1DDL.	72
Figure 2. 26. Spectre de réponse pseudo-accélération de 20 simulations en modélisant le profil de sol par la théorie de propagation des ondes.	73
Figure 2. 27. Vue schématique de la structure du pont à travers un canyon.	74
Figure 2. 28. Amplification des sites conditions différentes des sites.....	75
Figure 2. 29. Mouvements sismiques spatialement variables générés à la surface.....	75
Figure 2. 30. Compatibilité des spectres de réponses des mouvements simulés au substratum rocheux (a) et à la surface(b).....	76
Figure 2. 31. Compatibilité des fonctions de cohérence des mouvements simulés au substratum rocheux.....	76
Figure 2. 32. Géométrie du problème traité par la méthode des éléments de frontière (MEFr) (Fontara et al. 2015).....	78
Figure 2. 33. Les quatre profils géologiques adoptés (Fontara et al. 2015).....	79
Figure 2. 34. Données géométrie du pont étudié. (1) les culées ; (2) appareil d’appuis ; (3) section transversale du tablier ; (4) vue en plan des piles et leur fondation.....	80
Figure 2. 35. Représentation schématique avec dimensions (dimensions en m).	81
Figure 2. 36. Modèle bidimensionnel en MEF du pont suspendu de Bosphorus sous des mouvements sismiques spatialement variables dans la direction verticale pour le cas de conditions de site MMFF (Adanur et al. 2016).....	81
Figure 2. 37. Fonctions de densité spectrale de puissance du modèle du bruit blanc filtrée pour différents types de site.	82

Figure 2. 38. Spectre de réponse en déplacement pour les des conditions de sites ferme et meuble.....	83
Figure 2. 39. Moments fléchissant maximaux au niveau du tablier.....	83
Figure 2. 40. Configuration géométrique des trois ponts à haubans (Shiravand et Parvanehro 2019).....	85
Figure 2. 41. Comparaison des spectres de réponse cible et celui des accélérations générées : (a) pont de longueur 1200 m, cas 1111 ; (b) pont de longueur 1200 m, cas 1441.	85
Figure 2. 42. Déplacement vertical maximum de la travée centrale.	86
Figure 3. 1. Phénomènes d’amplification et d’atténuation causés par les effets de site (Bonilla et al. 2008).	91
Figure 3. 2. Type des effets de site.....	92
Figure 3. 3. Effets de site lithologique à Mexico : enregistrements réalisés lors du séisme de Mexico 1985 (Wikipédia, ajoutée par Semblat en 2014).	94
Figure 3. 4. Amplification du mouvement du sol lors du séisme de Mexico 1985 (Guéguen 2009).....	94
Figure 3. 5. Effet de site dans la vallée de Tagliamento (Italie) (Bard 2002).....	95
Figure 3. 6. Modèle simplifié de sol tubulaire (Kham 2004).....	97
Figure 3. 7. Amplification en fonction de la fréquence pour un modèle unidimensionnel d’une couche de sol sur un demi-espace (Bonilla et al. 2008).	97
Figure 3. 8. Représentation schématique d’un sol monocouche sur un substratum rocheux (Wolf 1985).....	99
Figure 3. 9. Terminologie utilisée dans l’analyse de la réponse de sites et amplitudes des ondes de cisaillement à plusieurs endroits (Wolf 1985).....	101
Figure 3. 10. Nomenclature dans le cas d’un mouvement dans le plan pour un sol monocouche reposant sur le substratum rocheux (Wolf 1985).	102
Figure 4. 1. Fonction de densité spectrale de puissance (Harichandran 1999).	122
Figure 4. 2. Fonction de modulation Gamma pour $t_{ini} = 0.5$ s, $T_{SM} = 10$ s et $I_a = 0.5$ (Zentner 2016).....	129
Figure 4. 3. Exemple de fonction de modulation temporelle de Jennings et al. (1968) pour $T = 10$ s (Zentner 2016).....	129
Figure 4. 4. Fonction de modulation temporelle de Bogdanoff-Goldberg-Bernard pour $a_1 = 0.906$ et $a_2 = 1/3$ (Deodatis 1996).	129
Figure 4. 5. Fonction de densité spectrale de puissance Kanai-Tajimi filtrée correspondante aux paramètres de DSP1 (Tableau 4. 3).....	134
Figure 4. 6. Technique développée de simulation des mouvements sismiques spatialement variables.	139
Figure 4. 7. Schéma de l’exemple de vérification.....	140

Figure 4. 8. Fonction de densité spectrale de puissance Kanai-Tajimi filtrée adoptée.	140
Figure 4. 9. Amplification des sites étudiés.	142
Figure 4. 10. Mouvements sismiques uniformes simulés en accélération.	143
Figure 4. 11. Mouvements sismiques uniformes simulés en vitesse.	143
Figure 4. 12. Mouvements sismiques uniformes simulés en déplacement.	143
Figure 4. 13. Comparaison des densités spectrale des mouvements sismiques non-stationnaires simulés avec le modèle de densité spectrale.	144
Figure 4. 14. Comparaison des densités spectrale des mouvements sismiques stationnaires simulés avec le modèle de densité spectrale.	144
Figure 4. 15. Mouvements sismiques spatialement variables simulés en accélération au substratum rocheux.	145
Figure 4. 16. Mouvements sismiques spatialement variables simulés en vitesse au substratum rocheux.	145
Figure 4. 17. Mouvements sismiques spatialement variables simulés en déplacement au substratum rocheux.	145
Figure 4. 18. Comparaison des densités spectrale des mouvements sismiques non-stationnaires simulés au substratum rocheux avec le modèle de densité spectrale.	146
Figure 4. 19. Comparaison des densités spectrale des mouvements sismiques stationnaires simulés au substratum rocheux avec le modèle de densité spectrale.	146
Figure 4. 20. Mouvements sismiques spatialement variables simulés en accélération à la surface.	147
Figure 4. 21. Mouvements sismiques spatialement variables simulés en vitesse à la surface.	147
Figure 4. 22. Mouvements sismiques spatialement variables simulés en déplacement à la surface.	148
Figure 4. 23. Comparaison des densités spectrale des mouvements sismiques non-stationnaires simulés à la surface avec le modèle de densité spectrale.	148
Figure 4. 24. Comparaison des densités spectrale des mouvements sismiques stationnaires simulés à la surface avec le modèle de densité spectrale.	149
Figure 5. 1. Vue schématique du portique de pont implanté sur un site monocouche.	157
Figure 5. 2. Densité spectrale de puissance des mouvements sismiques au substratum rocheux.	158
Figure 5. 3. Fonctions de transfert pour un site compact en fonction de l'épaisseur de la couche de sol.	160
Figure 5. 4. Fonctions de transfert pour un site meuble en fonction de l'épaisseur de la couche de sol.	160
Figure 5. 5. Fonctions de transfert pour un site très meuble en fonction de l'épaisseur de la couche de sol.	161

Figure 5. 6. Fonctions de transfert pour un site très meuble au point j avec une épaisseur : $h=10$ m et un site meuble au point k avec une épaisseur : $h=20$ m.	162
Figure 5. 7. Fonctions de transfert pour un site très meuble au point j avec une épaisseur : $h=10$ m et un site compact au point k avec une épaisseur : $h=30$ m.	162
Figure 5. 8. Fonctions de transfert de l'exemple étudié.	164
Figure 5. 9. Mouvements sismiques uniformes simulés en accélération.	164
Figure 5. 10. Mouvements sismiques uniformes simulés en déplacement.	165
Figure 5. 11. Mouvements sismiques simulés en accélération au substratum rocheux.	165
Figure 5. 12. Mouvements sismiques simulés en déplacement au substratum rocheux.	166
Figure 5. 13. Comparaison de la densité spectrale de puissance des accélérations simulées au substratum rocheux et le modèle de Kanai-Tajimi.	166
Figure 5. 14. Mouvements sismiques simulés en accélération à la surface.	167
Figure 5. 15. Mouvements sismiques simulés en déplacement à la surface.	167
Figure 5. 16. Comparaison de la densité spectrale de puissance des accélérations simulées à la surface avec le modèle de Kanai-Tajimi.	168
Figure 5. 17. Schéma d'un pont implanté à différents sites monocouches.	169
Figure 5. 18. Fonctions de transfert au niveau des points à la surface.	170
Figure 5. 19. Accélérations simulées dans le cas uniforme.	171
Figure 5. 20. Déplacements simulés dans le cas uniforme.	172
Figure 5. 21. Comparaison de densités spectrale de puissance (signaux sismiques stationnaires).	172
Figure 5. 22. Comparaison de densités spectrale de puissance (signaux sismiques non-stationnaires).	173
Figure 5. 23. Accélérations simulées dans le cas négligeant l'effet de site.	173
Figure 5. 24. Déplacements simulés dans le cas négligeant l'effet de site.	174
Figure 5. 25. Comparaison de densités spectrale de puissance dans le cas négligeant l'effet de site (signaux sismiques non-stationnaires).	174
Figure 5. 26. Accélérations simulées en n'adoptant que l'effet de site.	175
Figure 5. 27. Déplacements simulés en n'adoptant que l'effet de site.	175
Figure 5. 28. Comparaison de densités spectrale de puissance en adoptant que l'effet de site (signaux sismiques non-stationnaires).	176
Figure 5. 29. Accélérations simulées dans le cas considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique.	176
Figure 5. 30. Déplacements simulés dans le cas considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique.	177

Figure 5. 31. Comparaison de densités spectrale de puissance dans le cas négligeant l'effet de site (signaux sismiques non-stationnaires).	177
Figure 5. 32. Vue en plan du viaduc.....	178
Figure 5. 33. Sections des éléments structuraux (en cm)	179
Figure 5. 34. Modèle tridimensionnel en éléments finis du viaduc.	180
Figure 5. 35. Déformées des quatre premiers modes de vibration.	180
Figure 5. 36. Vue longitudinale du viaduc implanté sur des sites monocouches.....	181
Figure 5. 37. Fonction de densité spectrale de puissance de mouvement sismique de référence au substratum rocheux (en accélération).	183
Figure 5. 38. Fonction de densité spectrale de puissance de mouvement sismique de référence au substratum rocheux (en déplacement).	183
Figure 5. 39. Amplification des sites aux points i, j, k, l et m situés à la surface.....	184
Figure 5. 40. Chargement sismique simulé en termes de déplacements en considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale sismique.....	185
Figure 5. 41. Chargement sismique simulé en termes de déplacements en négligeant l'effet de site.	185
Figure 5. 42. Chargement sismique simulé en termes de déplacements en ne considérant que l'effet de site.	186
Figure 5. 43. Chargement sismique uniforme simulé en termes de déplacements.	186
Figure 5. 44. Comparaison de la réponse dynamique maximale des piles sous un chargement sismique différentiel en négligeant l'effet de site et un chargement sismique uniforme. i) Moments fléchissants, ii) Efforts tranchants.	188
Figure 5. 45. Comparaison de la réponse dynamique maximale des piles sous un chargement sismique différentiel tenant en compte de l'effet de site et un chargement sismique uniforme. i) Moments fléchissants, ii) Efforts tranchants.....	188
Figure 5. 46. Comparaison de la réponse dynamique maximale des piles sous les chargements sismiques différentiel en négligeant et en considérant l'effet de site. i) Moments fléchissants, ii) Efforts tranchants.....	188
Figure 5. 47. Comparaison de la réponse dynamique maximale des piles sous les chargements sismiques différentiel en négligeant l'effet de site et celui en ne considérant que l'effet de site. i) Moments fléchissants, ii) Efforts tranchants.....	189
Figure 5. 48. Vue d'ensemble du pont à haubans.	191
Figure 5. 49. Modèle en éléments finis du pont à haubans de Mila.	192
Figure 5. 50. Déformées des quatre premiers modes de vibration du pont à haubans.	192
Figure 5. 51. Vue longitudinale du pont et du sol de fondation.....	193
Figure 5. 52. Fonctions de transfert au niveau des supports.....	194
Figure 5. 53. Déplacements générés pour le cas différentiel (les effets d'incohérence, de passage d'onde et de site sont pris en compte).	195

Figure 5. 54. Déplacements générés pour le cas différentiel (effet de site négligé). ...	195
Figure 5. 55. Réponse dynamique des piles sous un chargement sismique (modèle de cohérence et effet de site) : a. Moments fléchissants maximum. b. Efforts tranchants maximum.	196
Figure 5. 56. Réponse dynamique des piles sous un chargement sismique (effet de site négligé) : a. Moments fléchissants maximum. b. Efforts tranchants maximum.....	197
Figure 5. 57. Comparaison des moments fléchissants et efforts tranchants dus à des chargements sismiques différentiels.....	198
Figure 5. 58. Vue longitudinale du pont et du sol de fondation.....	200
Figure 5. 59. Fonctions de transfert relatives à la configuration du site FMSMF.	202
Figure 5. 60. Fonctions de transfert relatives à la configuration du site FSMSF.....	202
Figure 5. 61. Fonctions de transfert relatives à la configuration du site FFSMM.	203
Figure 5. 62. Fonctions de transfert relatives à la configuration du site FSSSF.....	203
Figure 5. 63. Mouvement sismique du sol généré en déplacement pour la configuration du site FMSMF. i) en tenant compte de tous les facteurs du mouvement spatial du sol; ii) en ne tenant compte que des effets locaux du site; iii) sans tenir compte des effets locaux du site; iv) uniforme.	205
Figure 5. 64. Mouvement sismique du sol généré en déplacement pour la configuration du site FSMSF. i) en tenant compte de tous les facteurs du mouvement spatial du sol ; ii) en ne tenant compte que des effets locaux du site ; iii) sans tenir compte des effets locaux du site ; iv) uniforme.	206
Figure 5. 65. Mouvement sismique du sol généré en déplacement pour la configuration du site FFSMM. i) en tenant compte de tous les facteurs du mouvement spatial du sol ; ii) en ne tenant compte que des effets locaux du site ; iii) sans tenir compte des effets locaux du site ; iv) uniforme.	207
Figure 5. 66. Mouvement sismique du sol généré en déplacement pour la configuration du site FSSSF. i) en tenant compte de tous les facteurs du mouvement spatial du sol ; ii) en ne tenant compte que des effets locaux du site ; iii) sans tenir compte des effets locaux du site ; iv) uniforme.	208
Figure 5. 67. Modèle tridimensionnel en éléments finis du pont ferroviaire.....	209
Figure 5. 68. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WOSE et UNIF pour toutes les configurations de site,.....	210
Figure 5. 69. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WSE et UNIF pour la configuration de site FMSMF,	210
Figure 5. 70. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WSE et SVGM-WOSE pour la configuration de site FMSMF, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.	210
Figure 5. 71. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WOSE et UNIF-SE pour la configuration de site FMSMF,.....	211

Figure 5. 72. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WSE et UNIF pour la configuration de site FSMSF,.....	211
Figure 5. 73. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WSE et SVGM-WOSE pour la configuration de site FSMSF, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.	212
Figure 5. 74. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WOSE et UNIF-SE pour la configuration de site FSMSF, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.	212
Figure 5. 75. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WSE et UNIF pour la configuration de site FFSMM, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.	213
Figure 5. 76. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WSE et SVGM-WOSE pour la configuration de site FFSMM, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.	213
Figure 5. 77. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WOSE et UNIF-SE pour la configuration de site FFSMM, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.	213
Figure 5. 78. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WSE et UNIF pour la configuration de site FSSSF, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.	214
Figure 5. 79. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WSE et SVGM-WOSE pour la configuration de site FSSSF, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.	214
Figure 5. 80. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WOSE et UNIF-SE pour la configuration de site FSSSF, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.	215
Figure 5. 81. Schéma de d'un pont implanté sur un site multicouche.	218
Figure 5. 82. Fonctions de transfert au niveau des points situés à la surface en utilisant le modèle multicouche avec le nombre de couche réel.	220
Figure 5. 83. Fonctions de transfert au niveau des points situés à la surface en utilisant le modèle multicouche avec une seule couche.	220
Figure 5. 84. Fonctions de transfert au niveau des points situés à la surface en utilisant le modèle monocouche.	221
Figure 5. 85. Accélérations simulées dans le cas uniforme.	223
Figure 5. 86. Vitesses simulées dans le cas uniforme.	223
Figure 5. 87. Déplacements simulés dans le cas uniforme.	224
Figure 5. 88. Comparaison de densités spectrale de puissance des accélérations stationnaires uniformes simulées.	224
Figure 5. 89. Comparaison de densités spectrale de puissance des accélérations non-stationnaires uniformes simulées.	224

Figure 5. 90. Accélérations différentielles simulées en négligeant l'effet de site.....	225
Figure 5. 91. Vitesses différentielles simulées en négligeant l'effet de site.....	225
Figure 5. 92. Déplacements différentielles simulées en négligeant l'effet de site.	225
Figure 5. 93. Comparaison de densités spectrale de puissance des accélérations non-stationnaires différentielles simulées en négligeant l'effet de site.....	226
Figure 5. 94. Accélérations simulées en considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale sismique.	226
Figure 5. 95. Vitesses simulées en considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale sismique.	226
Figure 5. 96. Déplacements simulées en considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale sismique.	227
Figure 5. 97. Comparaison de densités spectrale de puissance des accélérations non-stationnaires différentielles simulées.....	227
Figure 5. 98. Schéma de d'un pont supporté par quatre piles implanté sur un site multicouche.....	228
Figure 5. 99. Fonctions de transfert au niveau des points situés à la surface en utilisant le modèle multicouche.	230
Figure 5. 100. Accélérations simulées dans le cas uniforme.	231
Figure 5. 101. Vitesses simulées dans le cas uniforme.	231
Figure 5. 102. Déplacements simulés dans le cas uniforme.	232
Figure 5. 103. Comparaison de densités spectrale de puissance des accélérations stationnaires uniformes simulées.	232
Figure 5. 104. Comparaison de densités spectrale de puissance des accélérations non-stationnaires uniformes simulées.	232
Figure 5. 105. Accélérations différentielles simulées en négligeant l'effet de site.....	233
Figure 5. 106. Vitesses différentielles simulées en négligeant l'effet de site.	233
Figure 5. 107. Déplacements différentielles simulées en négligeant l'effet de site.	233
Figure 5. 108. Comparaison de densités spectrale de puissance des accélérations non-stationnaires différentielles simulées en négligeant l'effet de site.....	234
Figure 5. 109. Accélérations simulées en considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale sismique.	234
Figure 5. 110. Vitesses simulées en considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale sismique.	234
Figure 5. 111. Déplacements simulées en considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale sismique.	235
Figure 5. 112. Comparaison de densités spectrale de puissance des accélérations non-stationnaires différentielles simulées.....	235

Introduction Générale

1. Problématique

La dynamique globale de la lithosphère terrestre est caractérisée par un perpétuel mouvement des plaques tectoniques. Ces mouvements sont relatifs et variés. Il se génère entre ces plaques tectoniques différents types de frontières où se produisent des séismes.

A l'ère actuelle, ces phénomènes naturels demeurent imprévisibles et parfois incompréhensibles pour les experts. Lors de d'un séisme, l'énergie, accumulée par les contraintes exercées sur les roches, se libèrent sous formes d'ondes sismiques. La propagation de ces ondes du foyer jusqu'au site considéré, se produit à travers un milieu fortement hétérogène.

Vers la fin du siècle dernier, des réseaux de sismographes, tels que SMART-1 et LSST-Lotung à Taiwan, CHIBA à Tokyo, USGS-PARKFIELD et IMPERIAL VALLEY en Californie et EUROSEIS-TEST en Grèce, ont été installés pour but d'observer de près les événements sismiques. Ces réseaux ont fourni une plate-forme importante pour l'étude et la compréhension de la variabilité spatiale du mouvement sismique. Suite aux observations de ces enregistrements sismiques, les chercheurs ont conclu, que le mouvement sismique du sol est spatialement variable. Ainsi, l'hypothèse de considérer, pour les structures étendues, une excitation sismique uniforme c.à.d. identique pour l'ensemble des supports n'est plus justifiée.

La variabilité spatiale du mouvement sismique résulte de la combinaison de l'action de la source qui génère des ondes sismiques, de la propagation de ces ondes la source et le site, et des conditions géologiques locales du site. En général, les effets de cette variabilité spatiale ont été regroupés en trois effets distincts. A savoir, l'effet d'incohérence des ondes sismiques, l'effet de passage d'onde appelé aussi décalage temporel et l'effet du site traduit par les conditions locales du sol. Plusieurs travaux ont été entrepris dans ce sens où la variabilité spatiale du mouvement sismique est définie principalement par l'effet résultant de la propagation des ondes sismique à travers un massif de sol. A savoir, l'effet d'incohérence et l'effet de passage d'onde.

Des modèles de variabilité spatiale ont été établis se basant sur une formulation théorique ou empirique. D'autres modèles semi-empiriques ont été aussi préparés. Parmi les modèles les plus utilisés, on peut citer ceux de Loh (1985); Luco and Wong (1986),

Harichandran and Vanmarcke (1986), Hao et al. (1989), Abrahamson et al. (1991), Sobczyk (1991) et Der Kiureghian (1996).

De nombreuses méthodes ont été développées pour simuler des signaux sismiques en considérant les modèles de la variabilité spatiale du mouvement sismique. Il paraît très complexe de simuler des mouvements sismiques variables dans l'espace en utilisant l'approche sismologique théorique. L'approche stochastique s'avère la plus utile pour les applications pratiques en raison de sa formation simple et le nombre réduit de variables d'input.

Plusieurs méthodes stochastiques sont proposées pour simuler des signaux sismiques variables dans l'espace. Ces méthodes peuvent être regroupées en deux grandes catégories. La première se base sur l'approche conditionnelle où le signal sismique simulé est conditionné par un accélérogramme enregistré en un site donné (Vanmarcke et al. 1993; Jankowski et Wilde 2000; Liao et Zerva 2006; Shama 2007; Konakli et Der Kiureghian 2012). Une autre catégorie de méthodes de simulation des mouvements sismiques variables se base sur l'approche inconditionnelle. Dans cette approche, les signaux sismiques simulés sont compatibles avec une fonction de densité spectrale de puissance estimée (Hao et al. 1989; Ramadan et Novak 1993; Deodatis 1996; Shrikhande et Gupta 1998; Derbal 2005; Djafour et al. 2006; Derbal et al. 2007; Shinozuka et Deodatis 2009; Cacciola et Deodatis 2011; Wu et al. 2011; Bi et Hao 2012).

Il est nécessaire de noter que la méthode de représentation spectrale décrite par Shinozuka (1971) (notée par MRS) est l'outil le plus utilisé pour l'élaboration de signaux sismiques variables dans l'espace. Les travaux de Shinozuka (1971) et Shinozuka et Jan (1972) ont porté sur l'application de cette méthode à la simulation de processus stochastiques homogènes ou non homogènes. Depuis, la méthode de représentation spectrale a été largement utilisée. Shinozuka et Deodatis (1996) ont fourni des détails sur les caractéristiques de la méthode de représentation spectrale dans la simulation de processus stochastiques. Cette méthode (MRS) repose principalement sur la décomposition de la matrice d'inter densité spectrale de puissance. Trois outils de décomposition de la matrice d'inter densité spectrale de puissance sont utilisés: i) la décomposition de Cholesky (Hao

et al. 1989), ii) la décomposition orthogonale appropriée (Di Paola et Zingales 2000) iii) et la décomposition des racines (Wu et al. 2011).

Le séisme de Michoacán qui a secoué la ville de Mexico en 1985 a spectaculairement illustré la nature et l'impact de l'effet de site sur cette région. Ce séisme, enregistré à environ 400 Km de la capitale, a traversé le territoire mexicain en subissant les effets d'atténuation dus à la distance parcourue. Mais, à leur entrée dans le bassin argileux qui forme la ville de Mexico, les ondes ont été piégées et sont entrées en résonance avec le site. En effet, les caractéristiques locales du bassin argileux ont considérablement amplifié les ondes sismiques. Les dégâts des bâtiments situés dans le bassin sédimentaire de la ville de Mexico étaient considérablement plus graves que ceux situés des bâtiments sur le rocher. Dans la zone située sur le bassin sédimentaire, les structures élancées ont subi les plus lourds dommages (Pacheco et Singh 1995). Depuis, les études montrent que les conditions géologiques locales des sites ont participé considérablement à augmenter les dégâts pour certains des grands séismes destructeurs tel que (Peru, Mai 2019, magnitude 8), (Mexico, Septembre 2017, magnitude 8.2), (Chili, Février 2010, magnitude 8.8), (Japon, Mars 2011, magnitude 9.1), (Indonésie, Mars 2005, magnitude 8.6), (Boumerdes, Algérie en 2003, magnitude 6.8). D'où, la nécessité de tenir en compte l'effet de site dans les méthodes d'estimation des mouvements sismiques. Dans la littérature, l'effet de site peut être également connu par la réponse du site ou encore la fonction de transfert du site.

Dans ce contexte, de nombreux chercheurs se sont intéressés à l'effet de site et à l'incorporation de ce facteur dans l'évaluation des mouvements de sol variables dans l'espace. En effet, les méthodes proposées de simulation des signaux sismiques se basent sur la modélisation du massif de sol par une seule couche qui repose sur le substratum rocheux. Cette couche de sol est, généralement définie par sa masse volumique, sa hauteur, son amortissement et particulièrement par sa vitesse de propagation des ondes de cisaillement. Cette représentation de l'effet de site par une seule couche est appuyée par les recommandations des codes parasismiques. En fait, le sol multicouche de fondation sous une structure donnée est converti en un sol d'une seule couche avec des caractéristiques prédéfinies, en particulier, la vitesse de propagation des ondes de cisaillement. A titre d'exemple, le code parasismique Algérien des ouvrages RPOA (MTP

2010) d'art donne une classification des sites de S1 à S4, du plus rigide au plus meuble. Tandis, que le code parasismique Eurocode 8 (CEN 2005) donne une classification plus étendue des sites de A à D plus deux classes S1 et S2 pour les dépôts sédimentaires. Ensuite, cette représentation de l'effet de site par une seule couche de sol a été développée en se basant sur la théorie de propagation des ondes sismiques unidirectionnelle (Wolf 1985). Quelques méthodes ont été proposées dans ce sens (Bi and Hao 2012, a; Zhang et al. 2013).

L'impact des conditions locales des sites sur la réponse sismique des structures étendues a été déjà étudié (Konakli et Der Kiureghian 2012; Derbal 2017; Derbal et al. 2019; Benmansour et al. 2021). Dans ce contexte, des comparaisons entre la réponse sismique des structures étendues tel que les ponts sous différents chargements sismiques spatialement variables ont été réalisées. Le chargement sismique témoin tient compte de l'ensemble des facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique. Tandis que l'autre chargement sismique variable néglige l'effet de site. Il s'est avéré que l'influence de ce dernier sur la réponse dynamique du pont est conséquente. En effet, le fait de négliger les conditions locales de site dans la représentation du chargement sismique variable dans l'espace appliqué aux structures étendues, tels qu'il est adopté dans la plupart des études, conduit à une sous-estimation de la demande sismique (Konakli et Der Kiureghian 2012; Derbal 2017; Derbal et al. 2018, 2019; Benmansour et al. 2021)

Il faut signaler qu'un intérêt particulier doit être porté à l'impact de cet effet sur le comportement sismique des structures étendues tel que les ponts. La recherche d'une formulation appropriée et simple pour incorporer les conditions locales du site dans la définition du chargement sismique spatialement variable est plus que nécessaire. La réponse dynamique de ces structures est directement liée à la bonne représentation de l'input sismique.

Actuellement, certains codes parasismiques prévoient la considération de la variabilité spatiale des mouvements sismiques dans la définition du chargement sismique appliqué aux structures étendues. Le code parasismique algérien des ouvrages d'arts (RPOA) (MTP 2010) est parmi les rares codes qui fournissent des procédures simplifiées et détaillées pour tenir en compte de l'effet de la variabilité spatiale du signal sismique dans

la conception des ponts. Au niveau de cette formulation simplifiée, le déplacement différentiel entre les appuis de la structure est incorporé et même majoré dans certaines conditions. D'autres prescriptions s'ajoutent à cette formulation pour prévenir le comportement des ouvrages étendus sous un chargement différentiel tels que les ponts. Ces prescriptions consistent à combiner les composantes pseudo-statique et dynamique pour simuler l'effet de la variabilité spatiale du mouvement sismique. La composante dynamique est obtenue à partir d'une analyse spectrale ou temporelle sous chargement uniforme. Tandis que la composante pseudo-statique est calculée en imposant statiquement un modèle de déplacements différentiels. Il en ressort une définition un peu ambiguë de la variabilité spatiale du signal sismique et son incorporation dans la représentation des changements sismiques appliqués aux ouvrages longs. En particulier, la considération de l'effet de site pour estimer les inputs sismiques différentiels appliqués à ces structures doit être revue.

2. Objectifs et méthodologie

Le présent travail a pour objectif d'évaluer l'impact de la variabilité spatiale du mouvement sismique sur la réponse des structures étendues (les ponts en particulier).

Le défi principal sera de développer une technique de simulation des signaux sismiques spatialement variables. La détermination de ces signaux doit prendre en considération l'ensemble des facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique ; à savoir, l'effet d'incohérence des ondes sismiques, l'effet de passage d'onde et particulièrement les conditions géologiques locales des sites, connues par l'effet de site.

Un intérêt particulier est porté à l'influence de l'effet d'amplification de site sur la représentation des chargements sismiques différentiel appliqués aux structures étendues.

La conception de l'amplification de site sera minutieusement investie. En premier lieu, la représentation de types des sites définissant le sol de fondation, donnée par la plupart des règlements parasismiques, sera examinée. Particulièrement dans le cas où les caractéristiques locales du sol se diffèrent entre les supports d'un ouvrage très long. Ce cas de figure n'est pas pris en considération par ces codes parasismiques. En effet, l'effet d'amplification est introduit d'une manière identique pour tous les appuis d'une structure

étendue. Tandis que l'effet de site décrit par la variabilité spatiale du mouvement sismique donne lieu à des signaux sismiques différents d'un appui à autre. Cette différence est constatée en amplitude et en phase. En effet, cette représentation consiste à convertir un profil de sol constitué de plusieurs couches de différentes caractéristiques à un site de classe prédéfinie. Cette considération est basée sur la classification des sites, donnée par les règlements parasismiques. Néanmoins, le travail proposé tient compte des différences des caractéristiques des sols de fondation d'un appui à un autre. Le cas d'une structure, traversant une discontinuité topographique est également traité.

Ensuite, un autre défi consiste à développer un modèle de l'effet de site qui représente le plus fidèlement possible le cas réel. En effet, le site est généralement stratifié et constitué de plusieurs couches de caractéristiques différentes et de hauteurs variables.

Le site de fondation sous chaque appui d'un ouvrage enterré sera approché par une structure tubulaire de sol. Plus précisément, les couches des sols sont superposées parallèlement à la surface du substratum rocheux avec des hauteurs qui peuvent être variables. En fait, ce modèle de l'effet de site a la capacité de traiter des sites constitués de plusieurs couches de sol. Ensuite, Ce modèle de l'effet de site sera étendu à un cas plus réaliste. En effet, les couches de sol ne sont jamais parfaitement parallèles. Par conséquent, les sites constitués de couches hétérogènes non parallèles avec une forme arbitraire de la surface libre seront considérés.

Il convient de noter que le modèle étendu de l'effet de site où plusieurs couches de sol sont envisagées (milieu stratifié), a été développé en se basant sur la théorie de propagation des ondes sismiques (Wolf 1985; Sobczyk 1991).

Il faut signaler également que le but principal de ces modèles de l'effet de site du cas simple qui considère le site comme une seule couche consiste en la détermination de la fonction de transfert estimée à la surface.

La seconde phase consiste à évaluer l'impact de ces signaux sismiques simulés sur des ouvrages longs. Les ponts seront choisis pour des applications pratiques, vu la disponibilité des données. Une série d'analyses dynamiques des modèles tridimensionnels de quelques ouvrages étendus sera réalisée. Différents chargements sismiques seront simulés en considérant l'effet de la variabilité spatiale des mouvements

sismiques. Une attention particulière sera donnée aux chargements sismiques différentiels qui tiennent compte de l'effet de site. Le chargement sismique uniforme sera également appliqué aux structures et utilisé à des fins de comparaison.

Finalement, une dernière tentation nous amène à évaluer la sensibilité des ouvrages courts vis-à-vis la variabilité spatiale du mouvement sismique et particulièrement l'effet de site.

3. Organisation de la thèse

Le contenu de cette thèse est réparti en cinq chapitres :

L'introduction générale présente le contexte général de la thèse, les motivations et les objectifs du présent travail.

Le premier chapitre donne un aperçu sur les travaux antérieurs traitent la variabilité spatiale du mouvement sismique et son influence sur le comportement dynamique des structures étendues. L'objectif visé dans ce chapitre est, en premier lieu ; de dégager les principales idées sur cet axe et par la suite de fixer les orientations à suivre et les points importants à mettre en évidence pour la suite du travail.

Le deuxième chapitre présente l'origine et les causes de la variabilité spatiale du champ sismique. Les moyens et les outils mis en œuvre sont également présentés. La modélisation de cette variabilité spatiale du mouvement sismique est détaillée. Dans ce chapitre, les modèles présentés sont basés sur la notion de cohérence des ondes sismiques qui domine souvent le phénomène de la variabilité spatiale du mouvement sismique. Trois approches de modélisation sont présentées : l'approche théoriques, l'approche empirique et l'approche semi-empirique. Le volet empirique donne lieu à un large panel des modèles de variabilité spatiale du champ sismique.

Le troisième chapitre détaille un facteur important de la variabilité spatiale du mouvement sismique : L'effet de site était souvent ignoré lors des analyses dynamiques des structures étendues. Par conséquent, les conditions locales du site peuvent influencer fortement le mouvement sismique et par la suite le comportement dynamique des structures étendues. L'analyse de la réponse sismique des sols sous l'effet de site est abordée en exposant les outils mathématiques et les formulations adéquates. Le sol est considéré comme une

structure qui va subir un chargement sismique. Le comportement dynamique de la structure sol est conditionné par les propriétés du mouvement sismique qui la traverse. Par conséquent, sa réaction peut amplifier l'intensité de ce champ sismique. La modélisation de cet effet de site est également abordée en détail. Deux cas majeurs de composition du sol de fondation sont traités. Un premier cas où le sol se compose d'un massif de sol homogène avec une seule couche. Le cas suivant, plus général, est celui d'un sol composé de plusieurs couches. Ce cas est plus réaliste puisqu'on traite le sol tel qu'il est dans la réalité. Néanmoins pour des raisons simplificatrices, le premier cas est beaucoup plus apprécié par les codes parasismiques pour sa simplicité. Notons également que la classification des sols au niveau de ces codes parasismiques est basée sur un sol homogène. L'amplification des mouvements sismiques est directement liée aux propriétés et caractéristiques des sols de fondation.

Le quatrième chapitre aborde la technique de simulation des mouvements sismiques spatialement variables. Cette technique sera détaillée en présentant les formulations adéquates et les différentes étapes à suivre, ainsi que les outils nécessaires afin d'obtenir des mouvements sismiques simulés. Tous les facteurs induisant la variabilité spatiale du champ sismique sont pris en considération dans cette technique de simulation. Un intérêt particulier est porté aux conditions géologiques locales du site. A la fin du chapitre, un exemple de vérification est présenté.

Au niveau du cinquième chapitre, plusieurs applications numériques seront réalisées afin de valider la technique de simulation des mouvements sismiques. Un effort particulier est dédié à l'influence des conditions locales des sites sur le comportement dynamique des structures étendues. En effet, cette variabilité des conditions locales d'un même site touchera en premier lieu le champ sismique et engendra des mouvements sismiques variables en intensité et en phase. Par conséquent, la réponse sismique sera obligatoirement influencée par ces variations des conditions géologiques locales du site.

Finalement, des conclusions sur l'intérêt de ce travail et les résultats obtenus sont établies. Quelques perspectives sont dressées pour les futurs travaux dans ce domaine.

Chapitre 1.

Variabilité spatiale du mouvement sismique

1. Introduction

La connaissance des caractéristiques probabilistes des tremblements de terre a été sensiblement améliorée grâce à la mise en place de plusieurs réseaux d'accélérographes sur des sites donnés, tels que le réseau différentiel d'El Centro aux USA, SMART1 et LSST à Lotung, Taiwan ou encore EURO-SEISTEST en Grèce.

Notons que l'installation de tels réseaux nécessite une connaissance parfaite de la nature et propriétés du sous-sol du site instrumenté. Les différents enregistrements de ces réseaux ont attiré de nombreux chercheurs dans ce domaine. Ainsi, des modèles de variabilité spatiale du mouvement sismique, caractérisé en général, par la fonction de cohérence, ont été développés.

Il y a lieu de signaler que le traitement numérique et statistique des enregistrements disponibles a posé de nombreuses difficultés d'ordre théorique et pratique vu le caractère fortement non stationnaire des séismes, ainsi que la relative rareté des données disponibles. Les modèles établis sont directement liés à la méthodologie retenue par l'analyse des données ce qui explique par exemple le domaine de validité limité d'un modèle donné. Les difficultés rencontrées dans la formulation de ces modèles ne remettent en aucun cas leurs valeurs, par contre, elles caractérisent le grand défi scientifique encore persistant dans ce nouveau domaine.

Ainsi, nous présentons les modèles de la variabilité spatiale du mouvement sismique les plus utilisés. Ces modèles se basent principalement sur la fonction de cohérence. Au niveau de l'annexe A, d'autres modèles de fonction de cohérence sont également exposés.

2. Notions générales sur la variabilité spatiale du champ sismique

Il est reconnu que les causes, également nommés facteurs, de la variabilité spatiale du champ sismique sont présentées ci-dessous (Der Kiureghian 1996):

- **Effet d'incohérence** pure : celui-ci englobe les effets des nombreuses diffractions, réflexions, interférences que l'onde sismique subit depuis la source jusqu'au site étudié.
- **Effet de passage d'onde** : cet effet est directement lié aux différences des temps d'arrivée de l'onde sismique aux différentes stations de mesure. Il est purement déterministe dès lors que l'on connaît parfaitement la phase du signal sismique.

- **Effet de site** : il est lié à la variabilité locale (géologie et stratigraphie) du profil du sol pour le site considéré.
- **Effet d'atténuation** : correspondant à la dissipation en amplitude des ondes en fonction de la distance par amortissements géométrique et énergétique, à la diffusion et à la dispersion lorsque la vitesse de phase dépend de la fréquence.

Il convient de noter que l'effet d'atténuation n'a pas de conséquences sur les structures car son impact ne prend effet que sur des distances très grandes.

3. Mesure de la variabilité spatiale du mouvement sismique

De nombreuses tentatives de procédés de mesures ont été mené à l'aide des réseaux denses d'accélérographes, afin d'avoir une base de données qui sert à établir des modèles représentatifs de la variabilité spatiale du mouvement sismique.

Le réseau d'El Centro est le premier réseau dense d'accélérographe qui a été déployé, ses inter-distances varient d'une façon unidirectionnelle sur sept points de mesure de 7.6 m à 316.5 m.

La rareté des événements sismiques ainsi que d'autres considérations ont conduit à l'installation en 1980 d'un autre réseau dense SMART-1 (Strong, Motion, Array, Taiwan1), qui se situe au nord-est de Taiwan (Lotung) (Figure 1. 1). Le site où ce réseau était déployé est susceptible d'avoir des séismes majeurs ainsi que les distances recouvertes sont similaires à celles des structures étendues.

Ce réseau est constitué de 37 sismographes (12 dans chaque cercles I, M, O et un dans le centre de ces cercles). Ce réseau a énormément servi beaucoup de chercheurs pour établir des modèles expérimentaux de la variabilité spatiale du mouvement sismique. La Figure 1. 2 montre les contours de temps d'arrivée relatif lors du passage des ondes sismiques à chaque station.

Ce réseau couvre des distances allant de 200 m à 4000 m avec une distribution radiale. Ce qui a nécessité en 1985 l'extension de ce réseau de façon à minimiser l'inter-distance entre les sismographes (réseau LSST).

Tableau 1. 1. Distances caractéristiques entre stations de réseaux denses de sismographes.

Nom du réseau	$ x - x' _{Min}$ (m)	$ x - x' _{Max}$ (m)
EL CENTRO	7.6	312.5
SMART-1	200	4000
LSST	0	200
EURO-SEISTEST	8-100	100-5500

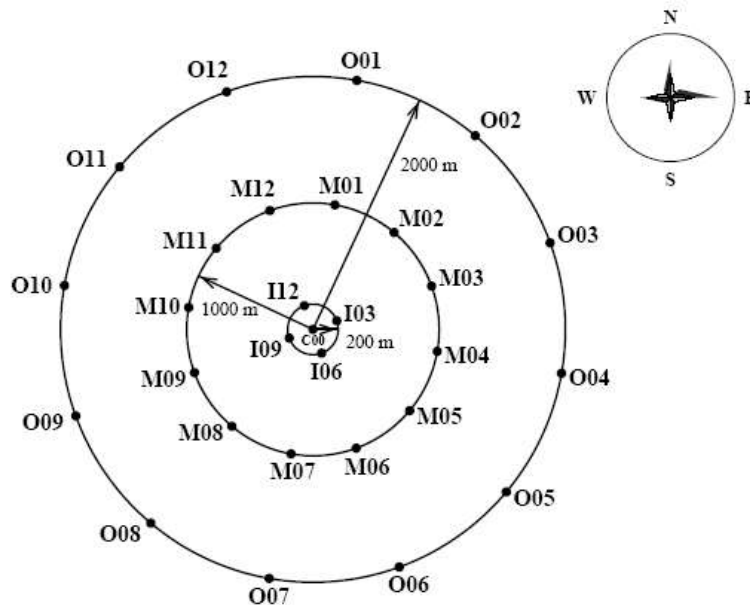


Figure 1. 1. Le réseau SMART-1 (Lotung, Taiwan) (Zerva et al. 1986; Harichandran 1999).

Afin d'enrichir la connaissance des caractéristiques probabilistes des séismes en Europe, un autre réseau dense dénommé EURO-SEISTEST a été installé en Grèce, les inter-distances de ce réseau varient de 8 à 5500 m.

Les données d'enregistrements de ces réseaux constituent une bibliothèque riche pour les chercheurs dans ce domaine. L'ensemble des modèles empiriques se basent sur le traitement de ces enregistrements. Le tableau 1. 1 décrit les distances caractéristiques des quatre principaux réseaux cités ci-dessus.

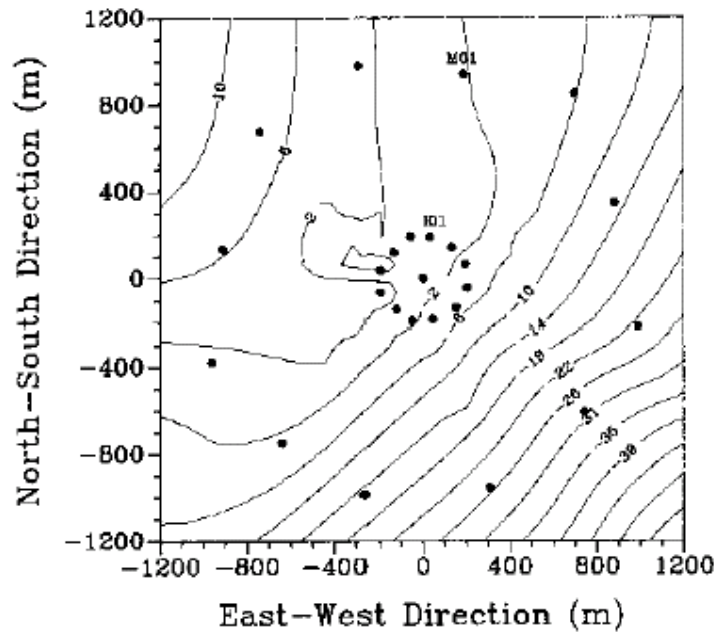


Figure 1. 2. Contours de temps d'arrivée relatif de SMART-1 : Evènement 20 (Harichandran 1999).

3.1. Fonction de cohérence

L'élaboration des modèles qui traduit le plus fidèlement possible le phénomène de variabilité spatiale du champ incident sismique est généralement basée sur la fonction de cohérence $\gamma(\omega, d)$, décroissante en fonction de la fréquence. Celle-ci permet de décrire quantitativement le phénomène de variabilité spatiale, aussi bien en termes d'amplitude qu'en termes de phase. Physiquement, la variabilité spatiale du mouvement sismique se traduit tout simplement par l'observation de déplacements différentiels non nuls en deux points plus en moins éloignés lors d'un séisme. De nombreuses études se concentraient sur les aspects les plus difficiles à caractériser, en particulier celles qui sont liés à la propagation des ondes sismiques depuis la source jusqu'à la surface dans des régimes aussi bien linéaires (diffractions multiples) que non-linéaires (amortissement et dissipation) (Figure 1. 3).

La fonction de cohérence est définie uniquement dans le domaine fréquentiel. Elle se présente sous la forme suivante (Harichandran et Vanmarcke 1986):

$$\gamma(\omega, d) = \gamma_{jk}(\omega) = \frac{S_{jk}(\omega)}{\sqrt{S_j(\omega) \cdot S_k(\omega)}} \quad (1. 1)$$

Avec :

$\gamma_{jk}(\omega)$ est la fonction de cohérence d'un mouvement sismique entre deux points j et k .

$S_{jk}(\omega)$ est la fonction d'inter-densité spectrale de puissance de l'excitation sismique entre deux points j et k .

$S_j(\omega)$ est la fonction de densité spectrale de l'excitation sismique au point j .

d : distance séparant mes points j et k .

ω : fréquence angulaire.

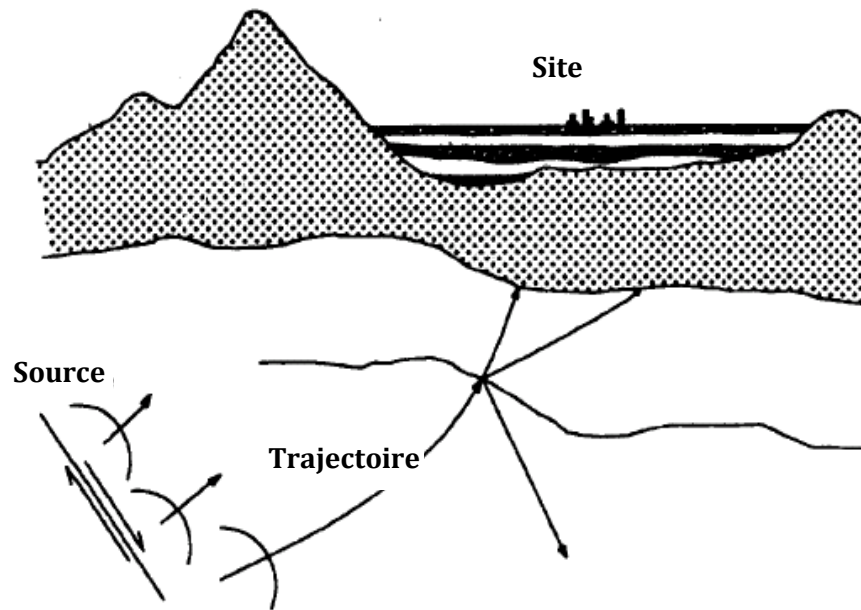


Figure 1. 3. Principaux facteurs influant la propagation des ondes sismiques : source, trajectoire et caractéristiques du site.

3.2. Types des fonctions de cohérence

Dans la littérature, la fonction de cohérence complexe présentée dans l'équation (1. 1) est décrite en plusieurs définitions de cohérence. En effet, on peut trouver : la cohérence différée notée $\gamma_{jk}(\omega)$ ou $\gamma_{jk}(\omega, d_{jk})$, la cohérence non différée, notée par $\gamma_{jk}^U(\omega)$ ou $\gamma_{jk}^U(d_{jk}, \omega)$ et la cohérence d'onde plane notée $\gamma_{jk}^{UW}(d_{jk}, \omega)$ ou $\gamma_{jk}^{UW}(d_{jk}, \omega)$. Ces types de fonctions de cohérence sont détaillées ci-dessous (Svay 2017).

3.2.1. La cohérence différée

La fonction de cohérence complexe a une amplitude et une phase pour chaque bande de fréquence. La cohérence différée est tout simplement le terme de module (amplitude) de la fonction de cohérence complexe (Abrahamson et al. 1991; Zerva 2009; Svay 2017):

$$|\gamma(d_{jk}, \omega)| = \left| \frac{\bar{S}_{jk}^M(\omega)}{\sqrt{\bar{S}_{jj}^M(\omega) \cdot \bar{S}_{kk}^M(\omega)}} \right| \quad (1.2)$$

La cohérence différée est une mesure de similitude dans les mouvements sismiques et donne une indication sur le degré auquel les données enregistrées de deux stations sont liées. La cohérence différée reflète, à chaque fréquence, la corrélation des mouvements.

Théoriquement, la cohérence différée tendra à l'unité lorsque la fréquence ou la distance de séparation des stations tend vers zéro. Par conséquent, dans le cas des basses fréquences et de courtes distances de séparation, les mouvements sismiques sont presque similaires.

En revanche, pour les processus non corrélés, la cohérence différée devient nulle. Ainsi, pour de grandes fréquences et de longues distances de séparation des stations, dont les mouvements sismiques deviennent non corrélés, la cohérence différée deviendra nulle (Zerva 2009; Svay 2017).

3.2.2. La cohérence non différée

La cohérence non différée $\gamma^U(d_{jk}, \omega)$ consiste à calculer la partie réelle de la fonction de cohérence complexe (Svay, 2017) :

$$\gamma^U(d_{jk}, \omega) = \Re(\gamma(d_{jk}, \omega)) \quad (1.3)$$

Cette cohérence mesure la cohérence en négligeant le décalage entre les stations (Abrahamson et al. 1991). Ceci correspond uniquement à l'hypothèse de propagation verticale des ondes où il n'existe pas d'effet de passage des ondes sur la variabilité spatiale des mouvements sismiques.

3.2.3. La cohérence d'onde plane

La cohérence différée ne décrit que les écarts des mouvements sismiques par rapport à la propagation des ondes planes à chaque fréquence et ne prend pas en compte l'écart des mouvements par rapport à une seule onde plane à toutes les fréquences. Plus précisément, la cohérence différée permet à différentes fréquences d'avoir leur propre vitesse d'onde et leur direction de propagation d'onde.

Puisque les applications d'interaction sol-structure considèrent toujours une seule vitesse d'onde plane et une seule direction à toutes les fréquences, la cohérence différée n'est pas adaptée à ces applications (Abrahamson et al. 1991; Svay 2017) ;

A cet effet, un autre type de cohérence appelé cohérence d'onde plane qui peut mesurer la cohérence par rapport à une seule vitesse d'onde plane est plus approprié (Abrahamson et al. 1991). La cohérence d'onde plane peut être estimée en prenant la partie réelle du spectre croisé après avoir aligné les mouvements sismiques en fonction de la meilleure vitesse des ondes planes (Svay 2017):

$$\gamma^{PW}(d_{jk}, \omega) = \Re \left[\frac{\bar{S}_{jk}^M(\omega)}{\sqrt{\bar{S}_{jj}^M(\omega) \bar{S}_{kk}^M(\omega)}} \right]_{plane_wave_direction} \quad (1.4)$$

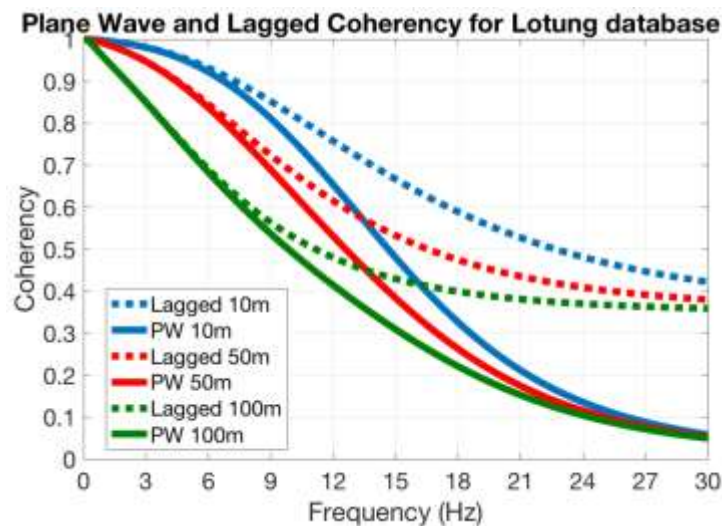


Figure 1. 4. Comparaison entre la cohérence différée et la cohérence d'onde plane pour le modèle de cohérence d'Abrahamson (Abrahamson et al. 1991).

La Figure 1. 4 montre la différence entre la cohérence différée et la cohérence des ondes planes pour le modèle de cohérence d'Abrahamson et al. (1991) construit en utilisant les enregistrements sismiques de SMART-1 (Lotung, Taiwan). Une nette différence est observée entre ces deux cohérences. En effet, pour les basses fréquences, les valeurs sont identiques pour les deux types de cohérence. Alors qu'aux hautes fréquences, la cohérence différée reste constante tandis que la cohérence des ondes planes continue de décroître vers zéro (Rezaeian and Kiureghian 2010; Svay 2017).

4. Modélisation de la variabilité spatiale du mouvement sismique basée sur l'incohérence des ondes sismique

On distingue trois catégories de modèles de variabilité spatiale du mouvement sismique ; à savoir, les modèles analytiques, les modèles empiriques établis sur la base des données d'enregistrements sismiques des réseaux installés dans le monde, principalement, le réseau de SMART-1 à Lotung, Taiwan et les modèles semi empiriques. Nous allons exposer les modèles les plus utilisés. D'autres modèles sont cités dans l'annexe A.

4.1. Modèles Analytiques

Les champs sismiques incidents, exprimés soit en déplacements ou en accélérations, sont modélisés par des champs aléatoires ou stochastiques (variables aléatoires x et t). La caractéristique principale de ces champs stochastiques est :

Moyenne d'ensemble nulle : $E[U(x,t)] = 0$.

Un champ stochastique est entièrement défini par sa fonction d'auto-corrélation à valeurs matricielles dans le cas général à trois composantes.

Une hypothèse souvent utilisée est celle de la stationnarité vis-à-vis de la variable temps qui a pour but de minimiser largement le volume des développements théoriques et cela malgré les infirmations des résultats expérimentaux.

Les caractéristiques principales des champs incidents sismiques sont la non stationnarité en variable temps (les propriétés probabilistes à un temps t ne sont plus les mêmes à t') et la non homogénéité en variable espace (les propriétés probabilistes à x varient à celles à x').

En particulier, la non-stationnarité d'un mouvement sismique influe énormément sur sa gamme fréquentielle, et par conséquent, sur la réponse dynamique de la structure à étudier.

- **Modèle de Zerva et al. (1986)**

Zerva et al. (1986) ont présenté un modèle analytique pour l'estimation de la cohérence des mouvements sismiques. Ce modèle de cohérence considère les effets des ondes de compression et de cisaillement (*SV* et *SH*). Il est basé sur l'hypothèse que le séisme a pour origine une rupture de faille et que l'excitation au niveau de la faille peut être approchée par un processus aléatoire stationnaire. La rupture à la source est transmise à la surface du sol au moyen d'une solution analytique de propagation des ondes. Le mouvement résultant à la surface du sol est un processus stationnaire, décrit par la densité spectrale de puissance et l'inter-densité spectrale des accélérations. Il en résulte des variations spatiales et des densités spectrales de puissance des accélérations différentielles.

Ce modèle de cohérence a été comparé aux données sismiques de l'événement 5, enregistrées par le réseau SMART-I à Lotung, Taiwan et une bonne concordance a été constatée bien que le procédé élaboré de propagation d'ondes ne prend pas en considération les effets de site.

Le modèle de Zerva et al. (1986) est donné par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 S_{ij}(u, \omega) &= \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{\phi_k^j \phi_m^l}{\omega^2} \left[4\tau_k^j \tau_m^l \omega_k^j \omega_m^l \omega^2 - 12\tau_k^j \omega_k^j (\omega_m^l)^2 \omega \right. \\
 &\quad \left. + 12\tau_m^l \omega_m^l (\omega_k^j)^2 \omega + (\omega_m^l)^2 (\omega_k^j)^2 \right] H_k^{j*}(\omega) H_m^l(\omega) S_{vv}(\omega)
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

Avec :

$$S_{vv}(\omega) = \frac{K_T^2 X_0}{2\pi(K_T^2 + \omega^2)^2} \left\{ 2\omega^2 + e^{-1} \left[(K_T^2 - \omega^2) \cos\left(\frac{\omega}{K_T}\right) - 2K_T \omega \sin\left(\frac{\omega}{K_T}\right) \right] \right\}
 \tag{1.6}$$

Où :

N et M sont les nombres de modes utilisés dans l'analyse.

H_k^j est la fonction de transfert du mode K au niveau de la station j , elle est définie comme la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle.

K_T^{-1} est un paramètre indiquant que le mouvement à la source est corrélé seulement pour un décalage de temps inférieur à K_T^{-1} .

$S_{vv}(\omega)$ est la densité spectrale de puissance des vitesses à la source.

Ensuite, la fonction de cohérence est estimée en utilisant l'expression suivante :

$$\gamma(u, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Re} [S_{u_j u_n}(\omega)] d\omega / \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{S_{u_j u_j}(\omega) S_{u_n u_n}(\omega)} d\omega \quad (1.7)$$

- **Modèle de Zerva et Shinozuka (1991)**

Zerva et Shinozuka (1991) ont développé un modèle de cohérence, décrit par une variabilité aléatoire des paramètres de la source. En effet, le mécanisme de source est traduit par une densité spectrale de puissance de la vitesse relative entre les deux rives de la faille.

Le modèle analytique de cohérence présenté ne se base pas sur des données d'enregistrement de séisme. Cependant, les données d'entrées de ce modèle sont la magnitude, la vitesse des ondes de volume dans le substratum rocheux et les distances entre la source et la surface du sol. Le mécanisme de source est décrit par la fonction de densité spectrale de puissance de la vitesse relative entre les bornes de la faille. L'excitation à la source est transmise à la surface du sol par une fonction approximative de réponse impulsionnelle.

Les auteurs ont analysé l'effet de la variabilité aléatoire des paramètres de source sur la variabilité spatiale des mouvements sismiques à la surface.

Une comparaison des résultats de ce modèle de cohérence avec les données d'enregistrement du séisme de 29 janvier 1981, enregistré par le réseau SMART-1, a été menée. Les résultats de ce modèle ont abouti à une concordance satisfaisante avec ces enregistrements sismiques.

L'expression de ce modèle est donnée par :

$$\gamma(u, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Re} \left[S_{u_j u_n}(\omega) \right] d\omega / \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{S_{u_j u_j}(\omega) S_{u_n u_n}(\omega)} d\omega \quad (1.8)$$

Où :

$S_{u_j u_n}(u, \omega)$ est la densité spectrale de puissance des mouvements sismiques des points j et n , donnée par :

$$S_{u_j u_n}(u, \omega) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \varphi_k^j \varphi_m^n \left\{ 4 \xi_k^j \xi_m^n \omega_k^j \omega_m^n \omega^2 - 2i\omega \left[\xi_k^j \omega_k^j (\omega_m^n)^2 - \xi_m^n \omega_m^n (\omega_k^j)^2 \right] + (\omega_k^j)^2 (\omega_m^n)^2 \right\} H_k^{j*}(\omega) H_m^n(\omega) S_{vv}(\omega) \quad (1.9)$$

Avec :

φ_{jk} le facteur de participation du mode i à la station j .

ξ_{jk} l'amortissement du mode k à la station j .

ω_{jk} la fréquence naturelle du mode k à la station j .

H_{jk}^* la fonction de transfert du mode k de la source jusqu'à la station j , elle est définie comme la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle.

* indique le complexe conjugué.

$S_{vv}(\omega)$ est la densité spectrale de puissance des vitesses relatives obtenue à partir de la fonction de corrélation développée par Aki (1967). L'unité de la distance de séparation u doit être exprimée en Km .

- **Modèle de Zerva et Harada (1997)**

Le travail de Zerva et Harada (1997) consistait à une évaluation analytique de la variation spatiale des mouvements sismiques. Une analyse de l'effet de la stochasticité des conditions locales du site, qui résulte des mouvements sismiques, sur la réponse sismique du sol a été réalisée. L'approche de ce modèle est caractérisée par la propagation unidimensionnelle d'onde de cisaillement à travers une composition aléatoire de couches de sol. Le modèle de cohérence développé dépend de l'effet d'incohérence au substratum rocheux, supposé comme un demi-espace, de l'effet de

passage d'onde caractérisé par une vitesse constante et des conditions géologiques locales du site.

Zerva et Harada (1997) ont remarqué que la forme générale de la fonction de cohérence est contrôlée par le champ incident. L'impact des conditions locales du site se situe au voisinage de la moyenne de la fréquence prédominante de la couche de sol et provoque un creux sur le graphe de la cohérence.

Par ailleurs, au niveau de ce modèle, plus la rigidité du sol augmente plus l'impact de l'effet de site diminue. Il convient de noter que ce modèle est applicable sur des sites présentant de légères variations dans leurs topographies.

Ce modèle de cohérence est exprimé par l'équation suivante :

$$\gamma(u, \omega) = \gamma_{incoh}^{sub}(u, \omega) \cdot \gamma_{pass}^{sub}(u, \omega) \cdot \gamma_{incoh}^{couche}(u, \omega) \quad (1. 10)$$

Avec :

$\gamma_{incoh}^{sub}(u, \omega)$ définie à partir du modèle de Luco et Wong, donné par :

$$\gamma_{incoh}^{sub}(u, \omega) = \exp\left(\frac{-i\omega u}{c}\right) \quad (1. 11)$$

L'incohérence due à l'effet de site est donnée par :

$$|\gamma_{incoh}^{couche}(u, \omega)| = \frac{[H_1(\beta, \omega_0, \zeta_0, \omega) + R_{ww}(u)H_2(\beta, \omega_0, \zeta_0, \omega)]}{[H_1(\beta, \omega_0, \zeta_0, \omega) + \sigma_{ww}^2 H_2(\beta, \omega_0, \zeta_0, \omega)]} \quad (1. 12)$$

Avec :

$$H_1(\beta, \omega_0, \zeta_0, \omega) = (\omega_0^4 + (2\beta + 4\zeta_0^2 - 2)\omega_0^2\omega^4)|H(\omega_0, \zeta_0, \omega)|^2 \quad (1. 13)$$

$$H_2(\beta, \omega_0, \zeta_0, \omega) = 4\beta^2\omega_0^4\omega^4|H(\omega_0, \zeta_0, \omega)|^4 \quad (1. 14)$$

Avec :

β le coefficient de participation des colonnes des sol.

ω_0 la moyenne de la fréquence prédominante.

ζ_0 la moyenne du coefficient d'amortissement.

σ_{ww} l'écart type de la fréquence prédominante.

$R_{ww}(u)$ la fonction d'autocorrélation de la fréquence prédominante.

Ces coefficients dépendent des propriétés du site et ils sont déterminés à partir d'une analyse probabiliste des caractéristiques variables du sol.

- **Modèle de Zendagui et al. (1999)**

Zendagui et al. (1999) ont développé une approche appelée « Complete Stochastic Deamplification Approach ». Cette approche vise à évaluer les propriétés statistiques du mouvement sismique en tout point de la structure du sol. Un modèle analytique pour estimer les propriétés statistiques des mouvements sismiques en tout point du sol sur la base des propriétés statistiques obtenues à partir d'enregistrements sur la surface. Il se base sur la propagation des ondes stationnaires SH dans un sol multicouche et des ondes P stationnaires dans un demi-espace. Le modèle de déconvolution stochastique est considéré et se base sur une formulation des matrices de fonctions de densité spectrale.

Les résultats obtenus montrent que la réduction de l'intensité de la cohérence est plus prononcée lorsque les ondes SH se propagent dans un sol stratifié que lorsqu'elles se propagent dans un demi-espace homogène. D'autre part, les auteurs ont constaté que les ondes P présentent une plus grande cohérence que les ondes SH, ce qui indique qu'il est indispensable de faire la distinction entre ces types d'ondes lors du développement de modèles de cohérence à partir de données d'enregistrement sismiques.

Par conséquent, les fonctions inter-densités spectrales correspondante des ondes P et SH sont données respectivement (les deux premières concernent les ondes P et la troisième concerne les ondes SH) comme suit :

$$S_{uu}(\lambda, y, \omega) = C_P^2 S(\omega) \int_{-\pi/2}^{\pi/2} g^2(\theta) E_{\theta}(\omega, y) e^{-i\omega(\sin\theta/c_P)\lambda} d\theta \quad (1. 15)$$

$$S_{vv}(\lambda, y, \omega) = C_P^2 S(\omega) \int_{-\pi/2}^{\pi/2} g^2(\theta) F_{\theta}(\omega, y) e^{-i\omega(\sin\theta/c_P)\lambda} d\theta \quad (1. 16)$$

$$S(\lambda, y, \omega) = 4S(\omega) \int_{-\pi/2}^{\pi/2} g^2(\theta) e^{-i\omega S_{x\theta}\lambda} \cos^2(\omega S_{y\theta}y) d\theta \quad (1. 17)$$

Où :

$S_\theta(\omega) = g^2(\theta)S(\omega)$ est la densité spectrale de chaque onde.

$E_\theta(\omega, y)$ et $F_\theta(\omega, y)$ sont des sténographies de deux termes complexes.

g est un terme qui décrit la fonction de distribution de l'amplitude d'onde.

C_p^2 est la vitesse des ondes de compression dans le profil du sol.

- **Modèle de Laouami et Labbe (2001)**

L'étude menée par Laouami et Labbe (2001) traite les petites distances et elle exploite les données du réseau SMART-1 à Lotung, Taiwan. L'incohérence est considérée comme composante aléatoire à moyenne nulle. Tandis que l'effet de passage d'onde, défini comme composante cohérente, est modélisé par la densité spectrale de puissance de Kanai (1957) et Tajimi (1960).

L'influence de ces deux composantes aléatoire et cohérente sur la variabilité spatiale des mouvements sismiques est examinée par une approche stochastique. La fréquence prédominante et l'amortissement du site, définis comme caractéristiques dynamiques sont intégrés dans l'effet de passage d'onde.

Quelques particularités de ce modèle de cohérence ont été constatées. En effet, la cohérence augmente avec la vitesse de propagation apparente et la distance de corrélation. Par contre, elle diminue avec l'augmentation du contenu fréquentiel du mouvement sismique, la distance de séparation et le paramètre de dispersion. À des hautes fréquences, la pente de décroissance de la cohérence est très raide.

La comparaison des résultats de ce modèle de cohérence avec les données d'enregistrement issues du réseau dense LSST à Lotung a été réalisée. Une bonne compatibilité est constatée.

Le modèle analytique de cohérence s'exprime sous la forme suivante :

$$|\gamma(u, \Omega)| = \frac{S_0(\Omega) + A \frac{\pi}{4} \sigma_\xi^2 e^{-U \left(u_0 + \frac{\zeta_g}{\sqrt{1-\zeta_g^2}} \right)}}{S_0(\Omega) + A \frac{\pi}{4} \sigma_\xi^2 (\alpha_s F + \beta_s G)} \left[\frac{(\alpha_s \cos(U) + \beta_s \sin(U))F + (\beta_s \cos(U) - \alpha_s \sin(U))G}{(\alpha_s F + \beta_s G)} \right] \quad (1. 18)$$

Où :

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_g} \quad ; \quad \Omega_0 = \frac{\omega_{g\tau}}{\omega_g} \quad (1.19 \text{ a, b})$$

$$\omega_{g\tau} = \zeta_g \omega_g + \frac{1}{\tau_0} \quad ; \quad \omega_{gd} = \omega_g \sqrt{1 - \zeta_g^2} \quad (1.20 \text{ a, b})$$

$$U = \frac{u}{u_{gd}} \quad ; \quad U_0 = \frac{u_{gd}}{u_0} \quad ; \quad u_{gd} = \frac{c}{\omega_{gd}} \quad (1.21 \text{ a, b, c})$$

Et :

$$\beta_g = \frac{(1-4\zeta_g^2)}{\sqrt{1-\zeta_g^2}} \quad ; \quad \alpha_g = \frac{(1+4\zeta_g^2)}{\zeta_g} \quad (1.22 \text{ a, b})$$

$$F = \frac{\sqrt{\Omega_0^2 + \Omega^2}}{\sqrt{(1-\zeta_g^2 + \Omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\Omega_0^2 \Omega^2}} \quad ; \quad G = \frac{1-\zeta_g^2}{\sqrt{(1-\zeta_g^2 + \Omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\Omega_0^2 \Omega^2}} \quad (1.23 \text{ a, b})$$

Avec :

$S_0(\Omega)$ la densité spectrale de puissance de Kanai et Tajimi.

A la densité spectrale de puissance d'un bruit blanc.

σ_ε l'écart type du facteur de randomisation ε ; appelé paramètre de dispersion.

u_0 , ω_g , ζ_g et c sont la distance de corrélation, la fréquence prédominante du sol local, le coefficient d'amortissement du sol local et la vitesse de propagation apparente à la surface du sol, respectivement.

- **Modèle de Liao et Li (2002)**

Liao et Li (2002) ont développé une nouvelle méthodologie, qui peut évaluer l'effet des conditions complexe du site et de la stochasticité du sol sur la fonction de cohérence du mouvement sismique. Une méthodologie de simulation par éléments finis des ondes, qui est un outil performant pour modéliser l'irrégularité topographique et les milieux hétérogènes, est utilisée pour évaluer l'effet des conditions complexes du site sur les mouvements sismiques. En introduisant la méthode de pseudo-excitation dans l'analyse par éléments finis du mouvement des ondes, la densité spectrale de puissance à la surface d'un site soumis à une excitation aléatoire est obtenue. Une formulation mathématique de la fonction de la cohérence du site est obtenue en se

basant sur la fonction de la densité spectrale de puissance. L'effet de la stochasticité du sol sur la fonction de cohérence sismique est étudié en utilisant la méthode d'expansion polynomiale orthogonale afin de transformer les équations de mouvement d'onde stochastique en équations de mouvement d'onde déterministe.

Au voisinage des fréquences de résonance du site, la stochasticité dans les propriétés du sol et les propriétés déterministes des irrégularités dans la surface du sol, diminue la cohérence.

Le modèle stochastique de la fonction de cohérence est donné par l'expression suivante :

$$S_{ij}(b, \zeta, \omega, t) = \sum_{\substack{0 \leq l_s \leq N_s \\ 1 \leq s \leq R}} X_{(i)l_1 l_2 \dots l_R}(\omega, t) * X_{(i)l_1 l_2 \dots l_R}^T(\omega, t) \quad (1.24)$$

Le vecteur de réponse en déplacement est exprimé par :

$$u(b, \zeta, t) = \sum_{\substack{0 \leq l_s \leq N_s \\ 1 \leq s \leq R}} X_{(i)l_1 l_2 \dots l_R}(\zeta, t) \prod_{j=1}^R H_{l_j}(b_j) \quad (1.25)$$

Où :

$X_{(i)l_1 l_2 \dots l_R}(\zeta, t)$ sont des processus aléatoires de taille $n \times 1$.

R est la somme des variables aléatoires spatiales.

$\{H_{l_j}(b_j)\}_{l_i}^{N_s} = 0$ sont des polynômes orthogonaux correspondant à chaque variable aléatoire.

b et ζ sont des variables aléatoires spatiales et temporelles, respectivement.

- **Modèle de Zendagui et Berrah (2002)**

Sur la base de l'approche CSDA (Complete Stochastic Deamplification Approach), développée par Zendagui et al. (1999), Zendagui et Berrah (2002) ont présenté un modèle de cohérence. Cette approche se base sur l'analyse de la variabilité spatiale des mouvements sismiques qui résulte de la propagation des ondes de volumes. La fonction de cohérence, pour les composantes verticales et horizontales à la surface libre ainsi qu'en profondeur, est évaluée en se basant sur un concept général d'ondes $P-SH-SV$, se propageant à travers un sol stratifié. Le modèle de cohérence proposé

peut servir à identifier le contenu d'onde du mouvement sismique obtenu à partir de distances étroitement espacés.

(Zendagui and Berrah 2002) ont remarqué que la décroissance des fonctions de cohérence à la surface du sol en fonction de la fréquence n'est pas la même que celle en fonction de la distance de séparation pour les cas des ondes P et SV . De plus, les fonctions de cohérence des composantes horizontales présentent des valeurs plus élevées que celles des composantes verticales seulement pour le cas des ondes P . Ils ont signalé aussi que le mouvement sismique est plus cohérent en profondeur qu'à la surface du sol.

Les fonctions de cohérence sont évaluées pour les cas de propagation des ondes SH , SV et P à travers un profil de sol composé de sous-couches horizontales. Les densités spectrales de puissance des ondes P , SV et SH sont données respectivement comme suit :

$$S_{uu}(k, \omega) = S(\omega) \frac{C_P^1}{\omega} g^2 \left(\arcsin \left(\frac{kC_P^1}{\omega} \right) \right) \times \left\{ \begin{array}{l} A_\theta [(1 + \beta_\theta) \sin \theta_{Pj} + D_\theta \cos \theta_{Sj}] + \\ C_\theta [(-1 + D_\theta) \cos \theta_{Pj} + B_\theta \sin \theta_{Pj}] \end{array} \right\}^2 / \sqrt{1 - \left(\frac{kC_P^1}{\omega} \right)^2} \quad (1.26)$$

$$S_{vv}(k, \omega) = S(\omega) \frac{C_P^1}{\omega} g^2 \left(\arcsin \left(\frac{kC_P^1}{\omega} \right) \right) \times \left\{ \begin{array}{l} A_\theta [(1 - \beta_\theta) \cos \theta_{Pj} + D_\theta \sin \theta_{Sj}] + \\ C_\theta [(1 + D_\theta) \sin \theta_{Sj} + B_\theta \cos \theta_{Pj}] \end{array} \right\}^2 / \sqrt{1 - \left(\frac{kC_P^1}{\omega} \right)^2} \quad (1.27)$$

$$S_{ww}(k, \omega) = S(\omega) (E_\theta)^2 C_S^1 g^2 \left(\arcsin \left(\frac{kC_S^1}{\omega} \right) \right) / \omega \sqrt{1 - \left(\frac{kC_S^1}{\omega} \right)^2} \quad (1.28)$$

Où :

A_θ , B_θ , C_θ et D_θ sont les amplitudes des ondes P incidentes et réfléchies, les amplitudes des ondes SV incidentes et réfléchies, respectivement.

g est un terme qui décrit la fonction de distribution de l'amplitude d'onde.

C_p^1 et C_s^1 sont les vitesses des ondes de compression et des ondes de cisaillement dans le profil du sol, respectivement.

4.2. Modèles empiriques

En se servant des enregistrements recueillis des réseaux denses d'accélérographes déployés dans des sites donnés, des modèles empiriques ont été développés. Ces derniers sont entièrement caractérisés par les fonctions de cohérence. Le but de cette approche est d'établir plutôt des modèles de fonctions de cohérence en se basant sur des enregistrements pour un site donné.

Notons que ces modèles sont construits à partir des enregistrements des événements sismiques réels bien définis et pour des distances limitées ce qui explique la grande diversité de ces fonctions de cohérence établies.

Une autre particularité des fonctions de cohérence caractérisant les modèles empiriques est que les effets d'incohérence, d'atténuation et de site sont de nature isotrope, ainsi ces fonctions de cohérence dépendent seulement de la distance.

- **Modèle de Novak et Hindy (1979)**

Hindy et Novak (1979) ont pu introduire la première description mathématique de la cohérence dans le génie parasismique. Une analyse stochastique des structures étendues soumises aux mouvements sismiques présentant une incohérence en se basant sur la théorie des vibrations aléatoires. L'expression simplifiée de ce modèle de cohérence est exprimée comme suit :

$$|\gamma(u, \omega)| = \exp \left[-K \left(\frac{\omega u}{V_s} \right)^v \right] \quad (1. 29)$$

Où :

K est une constante dépendante de la distance épacentrale et la magnitude du séisme.

V_s est la vitesse des ondes de cisaillement.

v est une constante.

u est la distance de séparation entre deux stations

ω est la pulsation du mouvement sismique respectivement.

- **Modèle de Loh (1985)**

Ce modèle (Loh 1985) a été établi sur la base des données d'enregistrements du réseau SMART1. La fonction de cohérence correspondante a la forme suivante :

$$|\gamma(u, \omega)| = \exp[-a(\omega)|u|] \quad (1. 30)$$

Avec :

$a(\omega)$ est une fonction de la fréquence ω dont les paramètres sont évalués à partir des données sismiques de l'événement 5 enregistré par SMART-1.

- **Modèle de Harichandran et Vanmarcke (1986)**

Harichandran et Vanmarcke (1986) ont évalué les fonctions de cohérence non paramétriques des événements enregistrés par SMART-1 dans les directions épacentrale, normale à la direction épacentrale et verticale. Ils ont considéré les enregistrements du réseau comme un processus aléatoire stationnaire et ergodique avec une moyenne nulle. L'hypothèse d'isotropie était valide pour ces données. De plus, ils ont utilisé une procédure d'alignement des accélérogrammes qui leur a permis d'éliminer l'effet de passage d'onde. Les fonctions de cohérence ainsi obtenues ne sont pas complexes. Pour chaque composante du mouvement, les cohérences sont approximativement identiques suivant les deux directions.

Sur la base de leurs analyses, ils ont proposé un modèle empirique de la fonction de cohérence pour les mouvements alignés. Ensuite, ils ont ajouté un terme de phase afin d'obtenir celle des mouvements réels. Le modèle suppose que la densité spectrale des mouvements sismiques soit la même pour tous les emplacements (Harichandran et Vanmarcke 1986; Laib 2018). Ce modèle de cohérence se présente sous la forme suivante :

$$|\gamma(u, \omega)| = A \exp \left[-(1 - A + \alpha A) \cdot \frac{2|u|}{\alpha \theta(\omega)} \right] + (1 - A) \cdot \exp \left[-(1 - A + \alpha A) \cdot \frac{2|u|}{\theta(\omega)} \right] \quad (1. 31)$$

L'échelle de fluctuation :

$$\theta(\omega) = K \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-0.5} \right] \quad (1. 32)$$

Avec :

A , α , K (en mètres), b et ω_0 (en rd/s) sont des coefficients évalués à partir des enregistrements sismiques par une analyse de régression.

Considérant la variation de l'angle de phase dû à l'effet de passage d'onde :

$$\gamma_{pass}(u, \omega) = \exp \left[-i \frac{\omega u \vec{V}}{V^2} \right] \quad (1.33)$$

\vec{V} est le vecteur de la vitesse apparente de propagation de l'onde sismique suivant la direction épacentrale et $V = |\vec{V}|$.

Ce modèle est probablement le plus utilisé dans la littérature. Les paramètres du modèle sont dérivés de l'évènement 20 dans la direction radiale. Le modèle est partiellement corrélé même pour les basses fréquences. La décroissance en fonction de la distance est plus forte aux basses fréquences et s'atténue en hautes fréquences, tandis que la décroissance en fonction de la fréquence est plus prononcée passé une certaine fréquence et une certaine distance de séparation.

Harichandran (1991) a réanalysé les données de l'évènement 20 et l'évènement 24 dans les deux directions radiale et tangentielle et il a estimé des nouveaux paramètres de la fonction de cohérence. Avec ces paramètres, la cohérence décroît d'une manière plus lente que celle avec les anciens paramètres. Ensuite, il a introduit une seconde expression de la fonction de cohérence pour tenir compte de la différence dans le comportement de la cohérence aux hautes fréquences et grandes distances de séparation. L'expression simplifiée de ce modèle devient alors :

$$|\gamma(u, \omega)| = A \cdot \exp \left[-(1 - A) \frac{2|u|}{\alpha k} \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^b \right]^{0.5} \right] + (1 - A) \quad (1.34)$$

- **Modèle de Hao et al. (1989)**

Hao et al. (1989) ont examiné les évènements 24 et 45 enregistrés par SMART-1 en tenant compte des trois composantes du mouvement sismique et pour différents segments temporels. Cela en se basant sur la description du champ aléatoire. Ils ont proposé un modèle de cohérence qui relie la dépendance de la variabilité spatiale des

mouvements sismiques avec la direction de propagation des ondes (Laib, 2018). Ce modèle est donné par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \gamma(u^l, u^t, \omega) = & \exp[-\beta_1 u^l - \beta_2 u^t] \exp \left[- \left(\alpha_1(\omega) \sqrt{u^l} + \alpha_2(\omega) \sqrt{u^t} \right) \left(\frac{\omega}{2\pi} \right)^2 \right] \\ & \times \exp \left[\left(i \frac{\omega u^l}{V_{app}} \right) \right] \end{aligned} \quad (1.35)$$

Où :

u^l et u^t : sont les distances de séparation entre les stations dans les directions longitudinales et transversales de la propagation des ondes, respectivement.

Pour $\omega \leq 20\pi$:

$$\alpha_1(\omega) = \frac{2\pi a}{\omega} + \frac{b\omega}{2\pi} + c \quad ; \quad \alpha_2(\omega) = \frac{2\pi d}{\omega} + \frac{e\omega}{2\pi} + g \quad (1.36 \text{ a, b})$$

Pour $\omega > 20\pi$: $\alpha_1(\omega)$ et $\alpha_2(\omega)$ deviennent constantes.

Avec :

β_1 et β_2 : sont des constantes.

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

En se basant sur l'évènement 45 enregistré par le réseau dense SMART-1, les paramètres de cette fonction de cohérence sont : $\beta_1 = 1.109$; $\beta_2 = 0.673$; $a = 35.83$; $b = -0.181$; $c = 1.177$; $d = 51.63$; $e = -0.076$; $g = -1.905$ (Hao et al. 1989 ; Chen et Harichandran 2001).

Les auteurs estiment que ce modèle peut être utilisé pour évaluer la densité spectrale de rotation. Ces paramètres sont obtenus par une analyse de régression des enregistrements.

En 1991, Oliveira et al. (1991) ont utilisé tout l'accélérogramme pour proposer une nouvelle forme fonctionnelle de $\alpha_i(\omega)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_i \left(\omega < \pi/10 \frac{rd}{s} \right) = \alpha_i \left(\omega = \pi/10 \frac{rd}{s} \right) \\ \alpha_i(\omega) = a_i/\omega + b_i\omega + c_i \text{ pour } \pi/10 \text{ rd/s} < \omega < 20\pi \text{ rd/s}, i = 1,2 \\ \alpha_i(\omega > 20\pi \text{ rd/s}) = \alpha_i(\omega = 20\pi \text{ rd/s}) \end{array} \right. \quad (1.37)$$

- **Modèle de Abrahamson et al. (1991)**

Abrahamson et al. (1991) ont développé un modèle de cohérence spécifique pour des distances de séparation inférieures à 100 m. en effet, ils ont analysé, par régression non linéaire, 15 événements sismiques enregistrés par LSST à Lotung dont la distance de séparation est comprise entre 0 et 100 m, la magnitude entre 3.0 et 7.8 et la distance source-site entre 5 Km et 113 Km. Ce modèle prend en considération la directivité de la variation spatiale dans les ondes sismiques. Ce modèle est donné par :

$$\gamma(u, u_r, \omega) = \frac{|\gamma(u, \omega)|}{1 + (\omega/m)^4} \{ \exp(i2\pi\omega u_r s) + (\omega/m)^4 \exp(i\eta) \} \quad (1.38)$$

Avec :

a_1, a_2, b_1, b_2, c, m et s sont des constantes déterminées par régression non linéaire.

k est un coefficient qui exprime l'effet du bruit présent dans les données et qui peut être estimé à partir des valeurs médianes de la fonction de cohérence au niveau des hautes fréquences ($f > 50\text{Hz}$).

u_r est la distance de séparation entre deux stations projetée sur la direction de propagation des ondes.

η est un terme de phase aléatoire.

Il est à noter que $\tanh^{-1}|\gamma(u, \omega)|$, donné ci-dessous, suit approximativement une distribution normale.

$$\tanh^{-1}|\gamma(u, \omega)| = (a_1 + a_2 u) \cdot \left\{ \exp[(b_1 + b_2 u) \cdot \omega] + \frac{1}{3} \omega^c \right\} + k \quad (1.39)$$

Abrahamson et al. (1991) ont constaté que pour les fréquences inférieures à 5 Hz, les événements sismiques de faible magnitude admettaient une cohérence relativement faible par rapport à celle des événements sismiques de forte magnitude. Tandis qu'aux fréquences variant de 6 à 10 Hz, le contraire a été constaté. De plus, les valeurs de

cohérence extrapolées aux petites distances de séparation à partir de SMART-1 tendent à surestimer les valeurs réelles de cohérence obtenues à partir de LSST. Les auteurs ont noté que le modèle peut être utilisé pour des distances de séparation supérieures à 100m, mais cette extrapolation peut entraîner une sous-estimation de la cohérence (Laib 2018).

- **Modèle de Sobczyk (1991)**

Au niveau de ce modèle de cohérence (Sobczyk 1991), l'effet de source sur la variabilité spatiale des mouvements sismiques est considéré négligeable. Ainsi, l'origine de l'incohérence du mouvement sismique provient de la dispersion des ondes durant leurs propagations de la source jusqu'au site considéré. Sobczyk (1991) a développé un modèle de cohérence approprié aux sites plans. Ce modèle est exprimé par les équations suivantes :

$$\gamma(u, \omega) = |\gamma(u, \omega)| \exp(-i\omega u \cos(\alpha)/v_{app}) \quad (1.40)$$

$$\gamma(u, \omega) = \exp(-\beta\omega u^2/v_{app}) \exp(-i\omega u \cos(\alpha)/v_{app}) \quad (1.41)$$

Où :

β : est un coefficient qui désigne le niveau d'incohérence.

α : est l'angle d'incidence des ondes arrivant au site.

v_{app} : est la vitesse apparente au substratum rocheux.

- **Modèle de Abrahamson (1993)**

Abrahamson (1993) a analysé les données d'enregistrements sismiques de SMART-1 et LSST et 10 autres réseaux denses. Sur la base cette analyse, un modèle a été développé en tenant compte la cohérence dans les directions horizontale et verticale. Abrahamson (1993) affirme que ce modèle puisse être utilisé pour les petites et longues distances.

Le modèle de cohérence pour des mouvements horizontaux a été estimées pour des petites distances variant entre 6 et 85 m. Ce modèle présente une forte décroissance avec la fréquence et la distance de séparation.

Le modèle de cohérence développé pour les mouvements horizontaux est exprimé par l'équation suivante :

$$\gamma^h(u, \omega) = \tanh \left\{ \frac{c_1^H(u)}{1 + c_2^H(u)(\omega/2\pi) + c_4^H(u)(\omega/2\pi)^2} + (4.8 - c_1^H(u)) \exp(c_3^H(u)(\omega/2\pi)) + 0.35 \right\} \quad (1.42)$$

Avec :

$$c_1^H(u) = \frac{3.95}{1 + 0.0077u + 0.000023u^2} + 0.85 \exp(-0.00013u) \quad (1.43)$$

$$c_2^H(u) = \frac{0.4[1 - (1 + (u/5)^3)^{-1}]}{[1 + (u/190)^8][1 + (u/180)^3]} \quad (1.44)$$

$$c_3^H(u) = 3(\exp(-0.05u) - 1) - 0.0018u \quad (1.45)$$

$$c_4^H(u) = -0.598 + 0.106 \ln(u + 325) - 0.0151 \exp(-0.6u) \quad (1.46)$$

Tandis que pour les mouvements verticaux, le modèle de cohérence est exprimé par l'équation suivante :

$$\gamma^V(u, \omega) = \tanh \left\{ \frac{c_1^V(u)}{1 + c_2^V(u)(\omega/2\pi)} + (4.65 - c_1^V(u)) \exp(c_3^V(u)(\omega/2\pi)) + 0.35 \right\} \quad (1.47)$$

Avec :

$$c_1^V(u) = 3.5 - 0.37 \ln(u + 0.04) \quad (1.48)$$

$$c_2^V(u) = 0.65[1 - (1 + u/4)^{-1}] \quad (1.49)$$

$$c_3^V(u) = 3(\exp(-0.05u) - 1) - 0.0018u \quad (1.50)$$

II

Abrahamson (1993) indique que si le segment du mouvement analysé contient des composantes du mouvement plus une onde plane, comme le cas à hautes fréquences où l'énergie dispersée contribue significativement à l'enregistrement, la corrélation de ces composantes additionnelles se présente dans la cohérence comme si elles faisaient partie de l'onde plane. Pour tenir compte de cette contribution, Abrahamson et al.

$u, ur, \omega = \gamma u, \omega 1 + \omega m 4 \exp i 2 \pi \omega u r s + \omega m 4 \exp i \eta$ (1. 38) soit multipliée par un facteur de correction tel que :

$$\gamma(u, \omega) = \gamma(u, \omega) \cdot h(u, \omega) \quad (1. 51)$$

Le facteur de correction de $\gamma(u, \omega)$ est donné par ses deux composantes horizontale et verticale :

$$h^h(u, \omega) = \left[1 + \left(\frac{\omega / 2 \pi}{c_5^H(u)} \right) \right]^{-1} ; \quad h^v(u, \omega) = \left[1 + \left(\frac{\omega / 2 \pi}{c_5^V(u)} \right) \right]^{-1} \quad (1. 52 \text{ a, b})$$

Avec :

$$c_5^H(u) = \exp(8.54 - 1.07 \ln(u + 200)) + 100 \exp(-u) ;$$

$$c_5^V(u) = \exp(5.2 - 0.634 \ln(u + 0.1)) \quad (1. 53 \text{ a, b})$$

- **Modèle de Abrahamson (2007)**

En exploitant les données sismiques de 78 séismes enregistrés par le réseau PINYON FLAT en Californie, Abrahamson (2007) a développé un modèle de cohérence spécifique aux sites rocheux. Ainsi, la cohérence de l'onde plane a été modélisée par l'équation suivante :

$$\gamma^{pw}(u, f) = \left[1 + \frac{f \tanh(a_3 u)^{n_1}}{f_c a_1} \right]^{-0.5} \left[1 + \frac{f \tanh(a_3 u)^{n_2}}{f_c a_2} \right]^{-0.5} \quad (1. 54)$$

Avec :

a_1, a_2, a_3, n_1, n_2 et f_c correspondent au mouvement horizontal ou vertical.

Abrahamson (2007) a constaté que la décroissance exponentielle de cohérence est plus lente que celles proposées en 1991 et en 1993.

Le Tableau 1. 2 donne les paramètres du modèle de cohérence dans le cas d'un mouvement horizontal et vertical.

Tableau 1. 2. Paramètres du modèle de (Abrahamson 2007) pour tous les types de sol (Svay 2017).

Paramètres	Composante horizontale	Composante verticale
a_1	1.647	3.15
a_2	1.01	1.0
a_3	0.4	0.4
f_c	$-1.886 + 2.221 \ln \left(\frac{4000}{u+1} + 1.5 \right)$	$\exp(2.43 - 0.025 \ln(u+1) - 0.048(\ln(u+1))^2)$
n_1	7.02	4.95
n_2	$5.1 - 0.51 \ln(u+10)$	1.685

- **Modèle de Wang et Wang (2012)**

Une sélection immense de données sismiques a été exploitée, à savoir 114 enregistrements de 6 séismes obtenus par le réseau dense TREASURE en Island, 144 enregistrements de 14 séismes obtenus par le réseau dense LA CIENEGA et 45 enregistrements de 3 séismes obtenus par le réseau dense EUREKA SAMOA. Sur la base de cette sélection de donnée d'enregistrements sismiques, une étude de la variation de la cohérence en fonction de la profondeur a été menée par Wang et Wang (2012). En effet, l'effet des conditions locales de site, la distance épacentrale et la profondeur ont été pris en considération pour l'élaboration du modèle de fonction de cohérence. Wang et Wang (2012) ont constaté une influence très considérable de l'effet des conditions locales de site.

Le modèle de cohérence développé dépend de la profondeur et il est défini par l'équation suivante :

$$\gamma(h, \omega) = \exp[-(a + bR^c h^d (\omega/2\pi - \omega_1)^2)h] \quad (1.55)$$

Avec :

$$\omega_1 = a \exp(\beta R) (1 - \exp(\delta h^2)) \quad (1.56)$$

Où :

$a, b, c, d, \alpha, \beta$ et δ sont des constantes et sont données pour chaque réseau et pour chaque composante horizontale et verticale.

h est la distance entre le i^{ieme} et k^{ieme} point de profondeurs différentes.

R est la distance épacentrale.

ω_1 est une fonction représentant la variation de la fréquence en fonction de la distance épacentrale et la distance entre deux points d'enregistrement.

4.3. Modèles semi-empiriques

De même que les modèles empiriques, les modèles semi-empiriques sont aussi caractérisés par leurs fonctions de cohérence. Dans cette approche, l'effort est principalement fourni dans l'établissement des formulations analytiques de fonctions de cohérence à partir des modèles physiques en introduisant des paramètres caractérisés par des méthodes expérimentales basées sur des données d'enregistrements des réseaux denses d'accélérographes.

- **Modèle de Luco et Wong (1986)**

En se basant sur l'analyse de la propagation d'ondes de cisaillement à travers un milieu aléatoire par Uscinski (1977), Luco et Wong (1986) ont développé un modèle de cohérence où la variabilité spatiale du mouvement sismique du sol est exprimée par une formulation analytique de la fonction de cohérence (Svay 2017). Cette expression est donnée par l'équation suivante :

$$\gamma(u, \omega) = \exp\left[-\left(\frac{\alpha\omega u}{\beta}\right)^2\right] \times \exp\left(i\frac{\omega u^l}{v_{app}}\right) = \exp[-\bar{\alpha}^2\omega^2 u^2] \times \exp\left(i\frac{\omega u^l}{v_{app}}\right) \quad (1.57)$$

Avec :

$$\alpha = \mu \left(\frac{H}{r_0}\right)^{\frac{1}{2}} ; \quad \bar{\alpha} = \frac{\alpha}{\beta} \quad (1.58 \text{ a, b})$$

Où :

H : la distance traversée par les ondes.

r_0 : une mesure des hétérogénéités susceptibles d'exister le long du trajet des ondes.

β : une estimation de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement à travers le milieu.

u^2 : une mesure de la variation relative des propriétés élastiques du milieu.

$\bar{\alpha}$ 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.

u^l : est la distance projetée le long de la direction de propagation des ondes entre les deux stations

V_{app} : est la vitesse apparente de propagation de l'onde prédominante.

Ce modèle a été largement utilisé dans plusieurs travaux de d'analyse dynamique des structures étendues (Luco and Wong 1986 ; Kiureghian and Neuenhofer 1992 ; Zerva 1992 ; Derbal 2005).

- **Modèle de Somerville et al. (1988)**

Dans le modèle proposé par Somerville et al. (1988) la variabilité spatiale du mouvement sismique est caractérisée par l'effet de propagation des ondes, l'effet de source, l'effet de dispersion des ondes sismiques se propageant de la source jusqu'au site et l'effet des conditions locales de site. A des fins simplificatrices, les effets de la variabilité spatiale ont été classés en deux groupes. Le premier, nommé effet de source, regroupe les effets de propagation des ondes et de source. L'effet de dispersion est le second groupe où il rassemble les effets de dispersion des ondes sismiques et des conditions locales de site. Ainsi, le modèle proposé se traduit par l'expression suivante :

$$\gamma_{total}(u, \omega) = \gamma_{source}(u, \omega) \cdot \gamma_{path}(u, \omega) \quad (1. 59)$$

Où :

$$|\gamma_{path}(u, \omega)| = \tanh[(a - b \cdot \ln u) \cdot \exp(-c\omega) + u] \quad (1. 60)$$

$$|\gamma_{source}(u, \omega)| = \tanh[e \cdot \exp(-m\omega - nu) + p] \quad (1. 61)$$

Avec :

a, b, c, m et n sont des constantes.

- **Modèle de Der Kiureghian (1996)**

En se basant sur la théorie du processus aléatoire, Der Kiureghian (1996) a développé un modèle stochastique de la fonction de cohérence dont la variabilité spatiale des mouvements sismiques unidimensionnels résulte de l'effet d'incohérence, passage d'onde et la variation des conditions locales de site. Ainsi, le modèle de cohérence proposé est exprimé par un produit de ces trois effets :

$$\gamma(u, \omega) = \gamma_{incoh}(u, \omega) \cdot \gamma_{pass}(u, \omega) \cdot \gamma_{site}(\omega) \quad (1.62)$$

L'effet d'incohérence dû à l'effet de source et l'effet de dispersion des ondes est exprimé comme suit :

$$|\gamma_{incoh}(u, \omega)| = \cos[\beta(u, \omega)] \exp\left[-\frac{1}{2} \alpha^2(u, \omega)\right] \quad (1.63)$$

C'est une fonction réelle, non négative et décroissante de 1 pour $u = 0$ ou $\omega = 0$ à zéro pour $u \rightarrow \infty$ ou $\omega \rightarrow \infty$.

Avec :

$\beta(u, \omega)$ est une fonction qui caractérise l'effet des variations aléatoires de l'amplitude.

$\alpha(u, \omega)$ est une fonction décroissante qui décrit l'effet de l'altération de la phase.

Ces deux fonctions $\beta(u, \omega)$ et $\alpha(u, \omega)$ peuvent être déterminées à l'aide d'enregistrements sismiques.

L'effet de passage d'onde est décrit par le déphasage des composantes d'ondes sismiques y compris la dispersion de ces ondes. Ainsi, le terme définissant cet effet est donné par l'équation suivante :

$$\gamma_{pass}(u, \omega) = \exp\left[-i \frac{\omega u^L}{v_{app}(\omega)}\right] = \exp[i\theta_{wp}(u^L, \omega)] \quad (1.64)$$

Avec :

u^L est la distance de séparation projetée le long la direction de propagation des ondes.

$V_{app}(\omega)$ est la vitesse apparente de propagation de l'onde prédominante en fonction de la fréquence ω .

$\theta_{wp}(u^L, \omega)$ est l'angle du déphasage.

Le terme caractérisant l'effet de propagation d'onde peut être simplifié en adoptant l'hypothèse des ondes planes se propageant dans un milieu élastique infini. Par conséquent, les vitesses d'ondes ne dépendent pas de la fréquence. Ainsi, ce terme sera simplifié comme suit :

$$\gamma_{pass}(u, \omega) = \exp \left[-i \frac{\omega u^L}{V_{app}} \right] \quad (1. 65)$$

Avec :

V_{app} est une constante déterminée en moyenne à partir d'enregistrement sismique ou en étudiant les caractéristiques de site.

En se basant sur la propagation unidimensionnelle des ondes à travers un sol bicouches de propriétés différentes, Der Kiureghian (1996) a étudié la réponse du site. Cette dernière est caractérisée par la variation des caractéristiques des couches de sol qui induisent la variation des mouvements sismiques à la surface.

Der Kiureghian (1996) indique que l'effet de site n'a pas de contribution à la cohérence et son impact est limité à un déphasage. Le terme de l'effet de site est représenté par une fonction indépendante de la distance :

$$\gamma_{site}(\omega) = \exp[i(\theta_l(\omega) - \theta_k(\omega))] = \exp[i\theta_{kl}(\omega)] \quad (1. 66)$$

Où :

$$\theta_{kl}(\omega) = \tan^{-1} \frac{\Im[H_k(\omega)H_l(\omega)]}{\Re[H_k(\omega)H_l(\omega)]} \quad (1. 67)$$

\Im et \Re indiquent la partie réelle et imaginaire respectivement.

θ_{kl} est l'angle de déphasage ; k et l désignent deux points de la surface du sol.

$H(\omega)$ est la fonction de transfert de la colonne du sol sous le point considéré.

Ce terme de fonction de cohérence $\gamma_{site}(\omega)$ devient unitaire quand les deux stations auront des propriétés effectives identiques même si l'hétérogénéité du milieu est

aléatoire. Ce qui démontre que ce terme néglige l'effet d'incohérence résultante de la dispersion des ondes à travers les couches du sol.

Der Kiureghian (1996) compare l'influence des effets de passage d'onde et de site sur la réponse sismique d'une structure étendue : ainsi l'effet de site sera plus important pour des travées relativement courtes correspondant à une fréquence fondamentale de vibration comprise entre 0.5Hz et 1.5Hz alors que l'effet de passage d'onde est plus pénalisant pour des travées plus longues (Laib 2018).

- **Modèle de Riepl et al. (1997)**

Sur la base d'enregistrements sismiques du réseau européen EURO-SEISTEST installé en Grèce, Riepl et al. (1997) ont tenté de caractériser les variations de la fonction de cohérence en fonction du temps, tenant compte de la non-stationnarité effective du champ incident.

L'expression du modèle de Riepl et al. (1997) est une fonction exponentielle décrivant la cohérence sans prendre en compte le terme de passage d'onde est formulée comme suit :

$$|\gamma(u, \omega)| = \exp[-(\alpha \omega r u)^\beta] \quad (1.68)$$

- **Modèle Yang et Chen (2000)**

Yang et Chen (2000) ont exploité 187 enregistrements sismiques afin de développer un modèle pratique de fonction de cohérence en utilisant un facteur de pic.

À partir de ces enregistrements sismiques, les fonctions de cohérence sont calculées statistiquement. Ainsi, la fonction moyenne et la fonction variance des effets d'incohérence est déterminée.

Pour des applications d'ingénierie, Yang et Chen (2000) ont insisté sur l'élaboration de modèle de fonction de cohérence moyenne. Cela est identique à la méthode déterminant la densité spectrale.

Il convient de noter que le modèle proposé par Yang et Chen (2000) est similaire à celui de Der Kiureghian (1996). L'expression de ce modèle est donnée par :

$$\begin{aligned}
|\gamma(u, \omega)| &= |\bar{\gamma}(u, \omega)| \pm \mu \sigma_{\gamma}(u, \omega) \\
&= (1 + (a_1 u^{0.25} + a_2 (u\omega)^{0.5}))^{-0.5} \exp((-0.5(a_3 u^{a_4} \omega^{a_5})^2)) \\
&\quad \pm \mu(0.2 \sin(b_1 \omega + b_2) + b_3 u + b_4 \omega + b_5 / (3\omega + b_6))
\end{aligned}
\tag{1. 69}$$

Où :

μ est un facteur de pic.

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ et b_6 sont des coefficients déterminés à partir des techniques des moindres carrés.

5. Effet de passage d'onde

L'effet de passage d'onde est lié directement à la distance de deux points ou stations et à la vitesse apparente de propagation des ondes sismiques. Il se traduit par un retard en temps d'arrivée de ces ondes à des stations plus éloignées.

En général, lors de l'élaboration d'une procédure de simulation de mouvements sismiques en adoptant l'effet de passage d'onde, il est introduit en post simulation en appliquant un décalage temporel. La valeur de ce décalage dépend de la distance entre deux points d_{jk} et de la vitesse de propagation apparente V_a et elle est égale à (Der Kiureghian, 1996) :

$$D_T = d_{jk}/V_a \tag{1. 70}$$

6. Effet de site

Actuellement, l'étude des effets de site sur la réponse des structures est l'un des objectifs les plus importants du génie parasismique. L'effet de site correspond à une modification du mouvement sismique produite par la géologie locale, selon sa composition physique et sa géométrie.

L'analyse des enregistrements sismiques met en évidence le fait que les conditions locales de site ont une influence forte sur la variation spatiale des mouvements sismiques. En effet, ces conditions locales du site peuvent agir profondément sur plusieurs caractéristiques fondamentales : l'amplitude dépend de la géométrie et des propriétés des

matériaux composant le sol, de la topographie du site, ainsi que des caractéristiques du champ sismique.

L'effet de site est décrit par la fonction de transfert dans le domaine fréquentiel. Dans le domaine temporel, il se traduit généralement, par une augmentation de l'amplitude des signaux sismiques et de leur durée.

Les dégâts matériels et les pertes humaines provoqués par les tremblements de terre sont fréquemment le résultat direct des effets de site locaux. Par conséquent, toute tentative de zonage sismique doit tenir compte des effets de site de manière approfondie.

La nature des effets de site local peut être illustrée de plusieurs façons : par de simples analyses théoriques de la réponse du sol, par des mesures des mouvements de la surface et de sous-sol du même site, et par des mesures de mouvements en surface dans des sites présentant des conditions différentes du sous-sol.

Vu l'importance de cet effet dans la caractérisation des mouvements sismiques spatialement variables, il sera développé et détaillé dans le chapitre 3.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, le phénomène de la variabilité spatiale du mouvement sismique a été présenté. Les facteurs induisant cette variabilité spatiale ont été également exposés.

La modélisation de l'effet d'incohérence est basée sur des modèles de cohérence déterminés par l'approche théorique, empirique ou semi-empirique. En outre, une synthèse de modèles de cohérence a été menée.

Dans la littérature, plusieurs chercheurs ont tenté de modéliser la variabilité spatiale des mouvements sismique en se basant uniquement sur un modèle de cohérence. D'autres ont essayé de combiner un modèle de cohérence avec une approximation simplifiée de l'effet de site. De nombreux cas d'étude ont prouvés que cette approximation n'est pas valide. En effet, la variabilité des conditions géologiques locales dans un même ouvrage peut entraîner des modifications importantes dans les caractéristiques de l'excitation sismique.

Il convient d'admettre que dans certains de structures se contenter d'un choix optimal de modèle de cohérence peut s'avérer suffisant pour approcher le mouvement sismique

spatialement variable réel. Néanmoins, le risque serait évident si les conditions locales du site sont négligées sans une étude géotechnique.

Il est à noter que vu l'importance de cette variabilité des mouvements sismiques, plusieurs règlements parasismiques prennent en considération ce phénomène en introduisant des formulations simplifiées. Nous citons, le cas du code parasismique algérien des ouvrages d'art (RPOA) (MTP 2010) où une formulation simplifiée est présentée. Toutefois, la prise en compte de l'effet de site par le règlement parasismique algérien reste très limité pour diverses raisons (classifications limitées, ...etc.).

Chapitre 2.

Simulation des mouvements sismiques variables dans l'espace et analyse de leurs effets sur les ponts : État de l'art

1. Introduction

Il est certain que le séisme reste l'un des phénomènes naturels que l'ingénieur craint le plus dans sa carrière professionnelle. Cette crainte est directement liée à l'imprévisibilité et la violence extrême des séismes où des régions entières peuvent être ravagées en l'espace de quelques dizaines de secondes.

Il est couramment admis que les structures étendues sont les plus sensibles, affectées par l'effet de la variabilité spatiale des mouvements sismiques. En effet, cette variabilité spatiale découle de plusieurs facteurs, principalement, l'effet de l'incohérence des ondes sismiques, l'effet de passage d'ondes et l'effet de site (Der Kiureghian 1996 ; Konakli et Der Kiureghian 2011).

Il est à noter que lors du tremblement de terre de Michoacán en 1985 de magnitude égale à 8.2, les dégâts les plus importants ont été observés dans la ville de Mexico, pourtant située à environ 400 km de l'épicentre. Cela est principalement dû à l'implantation de cette ville sur un bassin sédimentaire, ce qui a conduit à une dispersion des ondes sismiques et par conséquent à une amplification des oscillations. En fait, l'effet d'amplification des ondes sismiques peut être très significatif dans le cas des sites composés de dépôts sédimentaires (Bard et al. 1988).

Ce phénomène de l'effet de site a poussé plusieurs chercheurs à entreprendre des études sur l'influence de cet effet sur l'estimation des mouvements sismiques (Wang et Hao 2002; Liao et Li 2002; Zembaty et Rutenberg 2002; Rezaeian et Kiureghian 2010; Konakli et Der Kiureghian 2012; Bi et Hao 2012; Zhang et al. 2013; Imtiaz et al. 2018). D'autres travaux de recherche ont abordés l'évaluation de l'impact de l'effet de site sur la réponse dynamique des structures étendues (Lou et Zerva 2005; Bi et al. 2010, 2011; Bai et al. 2011; Adanur et al. 2016; Li et al. 2018; Koufoudi et al. 2018).

2. Aperçu sur les travaux antérieurs sur l'effet de la variabilité spatiale du mouvement sismique sur les structures

Dans la littérature, il existe de nombreuses études sur l'effet de la variabilité spatiale du mouvement sismique sur les structures étendues. Un grand nombre de ces études considère 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. La plupart de ces études ont conduit à des modèles empiriques ou analytiques (Hao et al. 1989; Zerva et Shinozuka 1991; Zerva 1992; Der Kiureghian 1996; Laouami et Labbe 2001; Zendagui et Berrah 2002; Abrahamson 2008).

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. Ainsi, cette hypothèse peut entraîner une représentation inexacte du chargement sismique adopté (Dumanoglu et Soyuk 2003; Zerva et Stephenson 2011; Bi et Hao 2012; Ramadan et al. 2015; Sextos et al. 2015; Zheng et al. 2015; Adanur et al. 2016; Ardila et al. 2018).

Ces dernières années, des études sur la variabilité spatiale du mouvement sismique en considérant l'effet de site ont été entreprises. Au début, l'effet de site était incorporé dans la définition des chargements sismiques différentiels par des approches simples ou des modélisations simplificatrices. Ensuite, des chercheurs ont commencé à entreprendre ce phénomène de l'effet de site en s'engageant avec des modélisation plus réalistes (Bi et Hao 2012; Zhang et al. 2013; Fontara et al. 2015; Shiravand et Parvanehro 2019). En effet, l'analyse de la réponse du site peut s'avérer très complexe, en particulier si un site comporte plusieurs couches de caractéristiques très divergentes. Il y a lieu de noter que les dépôts sédimentaires peuvent engendrer des vraies surprises quant à leur comportement suite à des excitations sismiques. L'exemple le plus représentatif de l'effet de site dans le monde est celui du séisme de Mexico-Michoacan de 1985.

Les récentes recherches en matière de l'influence de la variabilité spatiale du mouvement sismique sur un chargement sismique différentiel ont conduit à des méthodes ou modèles de simulation des mouvements sismiques spatialement variables.

Parmi les contributions les plus pertinentes dans ce volet, on citera les travaux suivants :

- **Der Kiureghian, (1996)**

Les principaux facteurs de cette variabilité spatiale du mouvement sismique ont été résumés par Der Kiureghian (1996). 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 (Figure 2. 1).

Un modèle théorique de la fonction de cohérence pour les mouvements sismiques unidimensionnels, prenant en considération tous les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique, a été développé par l'auteur. Le modèle théorique est dérivé de notions élémentaires de théorie des processus aléatoires stationnaires et d'hypothèses simplificatrices concernant la propagation des ondes sismiques. Ce modèle se présente sous la forme du produit de trois termes représentant les trois effets distincts du mouvement sismique.

La composante définissant l'effet d'incohérence passe par une détermination empirique. En utilisant un modèle simple pour modéliser les profils de sol à deux stations, une étude paramétrique est effectuée afin de déterminer l'influence des effets de passage d'ondes et de réponse locale du site.

Les résultats ont montré que l'effet de site peut être plus significatif dans une gamme de fréquences qui est pertinente pour la réponse des ponts et viaducs de courte et moyenne portée.

Ce travail a montré que l'effet de site peut être plus significatif pour les structures implantées dans des zones où les conditions locales du sol peuvent changer rapidement et qui ont des modes naturels avec des fréquences comprises entre 0.5 et 1.5 Hz. Les structures de ponts et viaducs à travées courtes ou moyennes peuvent être concernées.

Pour les structures souples avec des portées longues, telles que les ponts suspendus, leurs fréquences seront inférieures à 0.5 Hz et l'effet de passage d'ondes pourra être plus conséquent.

L'auteur a conclu également que le modèle de cohérence développé, associé à la méthode du spectre de réponse, peut fournir un cadre rationnel pour l'analyse sismique des structures étendues et cela en tenant en compte de l'effet de la variabilité spatiale du mouvement sismique.

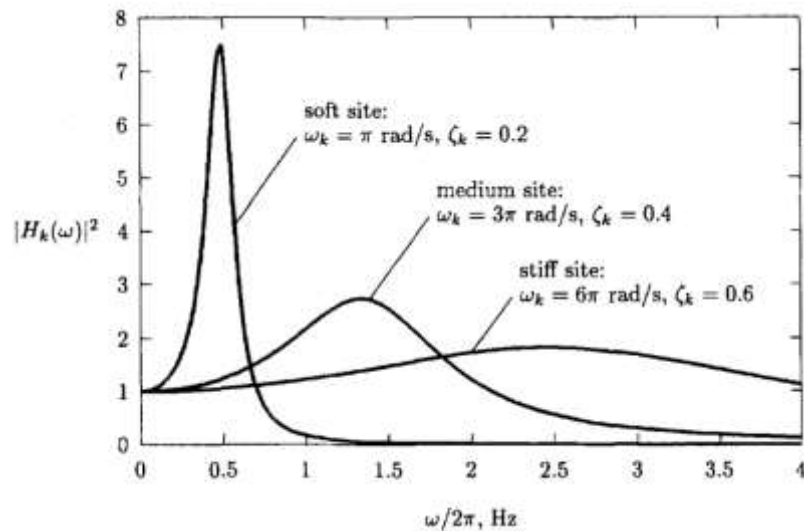


Figure 2. 1. Fonctions de transfert pour différents sites (Der Kiureghian 1996).

L'auteur insiste sur le fait que le modèle développé dans cet article est un modèle purement mathématique et qui peut être considéré comme imparfait.

La caractérisation des mouvements sismiques par des processus stationnaires, l'hypothèse d'ondes planes utilisée pour décrire l'effet de passage d'ondes, la modélisation de la propagation verticale des ondes sismiques à travers les colonnes du sol et l'hypothèse du comportement linéaire du sol sont toutes de simples hypothèses mais s'avèrent très complexes en réalité. Néanmoins, le modèle développé peut fournir un cadre mathématique permettant un meilleur ajustement avec des données enregistrées. L'auteur préconise de vérifier ce modèle avec des données enregistrées.

- **Sextos et al. (2003a, 2003b)**

Les auteurs ont mis en œuvre une méthodologie générale basée sur un code informatique pour dériver des signaux sismiques modifiés et des coefficients relatifs à d'interaction sol-structure à chaque support d'un pont en tenant en considération la variabilité spatiale du mouvement sismique et les conditions locales du site. Les résultats dérivés de cette méthodologie seront utilisés pour l'analyse dynamique inélastique des ponts. En effet, cette méthodologie générale est engagée selon trois étapes ; à savoir, la variabilité spatiale des mouvements sismiques, les effets de site et l'interaction sol-structure. Le schéma de cette méthodologie est décrit dans la figure 2. 2 (Sextos et al. 2003a, b).

Après une validation approfondie de la procédure proposée, les auteurs ont examiné la réponse dynamique de 20 structures de ponts différentes soumises à plusieurs cas de chargements sismiques spatialement variables. Une comparaison est entamée pour divers cas de complexité d'analyse. Ces modèles sont établis à partir d'un modèle de pont considéré comme référence. Ce dernier est composé de quatre travées de 50 m de longueur. Les modèles de ponts sont conçus en variant la rigidité effective des piles, leurs hauteurs, les conditions aux limites des appuis au niveau des culées, le nombre de travées ainsi que leurs longueurs. Deux spectres en accélération sont utilisés pour la simulation des mouvements sismiques spatialement variables. Le premier correspond à l'enregistrement de Kallithea (Athènes, Grèce, 1999) qui était imposé à tous les modèles de ponts étudiés dans le sens transversal, tandis que le deuxième correspond à l'enregistrement de Gilroy de Loma Prieta 1989 ; il a été appliqué à un seul modèle de pont dans le sens longitudinal.

Ces excitations sont simulées en considérant l'effet de passage d'onde, l'effet d'incohérence en utilisant le modèle de cohérence de Luco et Wong (1986), et l'effet de site.

Ce dernier est approximativement incorporé en simulant en premier lieu les mouvements sismiques spatialement variables dans un massif rocheux, ensuite pour chacun des appuis du pont le mouvement en surface sera déterminé selon le profil de sol en se basant sur la théorie de propagation unidirectionnelle des ondes. L'effet d'interaction sol structure est introduit également en considérant les deux composantes cinématiques et inertielle.

Deux cas d'analyse linéaire et non linéaire sont traités. À travers cette étude les conclusions suivantes sont tirées :

- Il existe une liaison significative entre les effets de la variabilité spatiale, de site et d'interaction sol structure. L'importance relative de chacun de ces effets ne peut pas être facilement évaluée. Tous ces phénomènes jouent un rôle important dans la réponse dynamique non linéaire des ponts et devraient être traités dans le contexte d'une méthodologie complète.

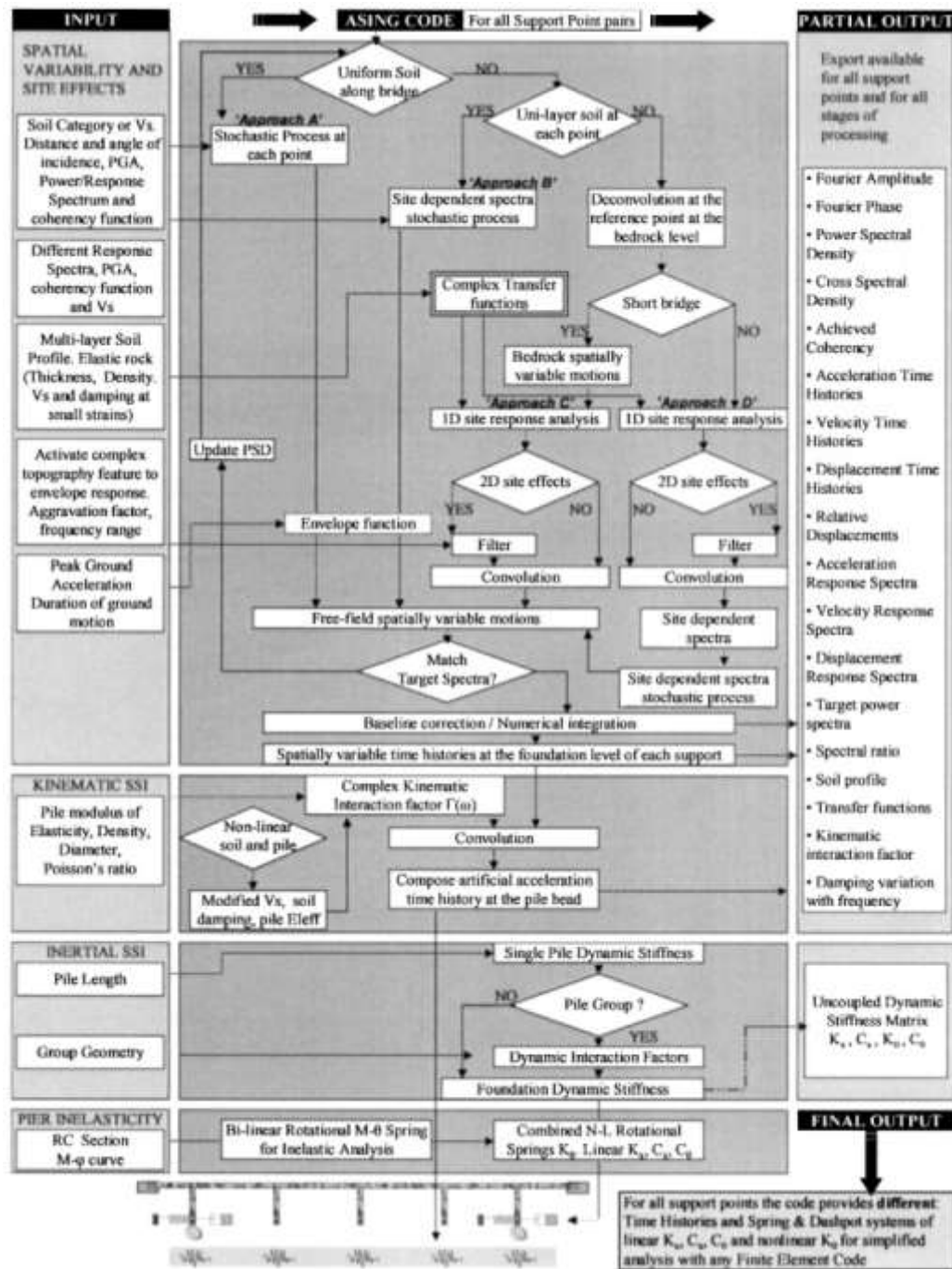


Figure 2. 2. Méthodologie générale d'analyse dynamique des ponts sous l'effet combiné des conditions locales du site, la variabilité spatiale et l'interaction sol-structure (Sextos et al. 2003a, b).

- Les ponts soumis à des chargements variables dans l'espace sont caractérisés par l'excitation des modes supérieurs qui sont principalement antisymétriques. Les structures symétriques ne répondent donc plus symétriquement et leur comportement dynamique ne peut pas être correctement évalué par des

mouvements uniformes. Les effets de passage d'onde et de perte de cohérence en termes de déplacement absolu et de moment fléchissant des piles sont généralement favorables pour les ponts courts, mais ils sont liés directement à la longueur totale.

- Les déplacements relatifs augmentent même dans des ponts courts. Ces déplacements relatifs ont tendance à suivre une augmentation logarithmique en fonction la longueur totale des ponts.
- La variabilité spatiale du mouvement sismique doit être considérée pour les ponts de longueur supérieure à 400 m.
- Les déplacements verticaux du tablier sont influencés par l'excitation sismique différentielle dans la direction transversale. Ils ont tendance à diminuer pour les longueurs de travées moins de 150 m.
- L'effet de site a une influence importante sur le processus global d'analyse dynamique en termes d'accélération maximale du sol et d'amplification spectrale. Cet effet joue également un rôle important dans la description fiable de l'interaction sol structure. L'ignorance de l'effet de site en étudiant des effets de l'interaction sol structure peut présenter une erreur de l'ordre de $\pm 50\%$ en termes de déplacements.
- Généralement les effets d'interaction sol structure sont bénéfique en termes des efforts développés, tandis qu'une augmentation dans les déplacements absolus et relatifs devrait être prévue.
- Ignorant l'interdépendance des effets cités précédemment, la demande en ductilité dans les piles de pont peut être sous estimées de 25% en moyenne et jusqu'à un facteur de 3 dans les cas extrêmes.

- **Bi et al. (2010)**

L'étude menée par Bi et al. (2010) consiste à étudier la réponse sismique d'un portique d'un pont sous un chargement sismique en adoptant la variabilité spatiale du mouvement sismique. Une méthode de simulation des signaux sismiques spatialement variables a été élaborée. L'ensemble des facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique sont pris en considération à savoir l'effet d'incohérence, l'effet

de passage d'onde et l'effet de site. L'effet d'incohérence est défini par un modèle de cohérence empirique déduit des enregistrements du réseau SMART1.

L'effet de site est pris en compte dans l'évaluation des mouvements sismiques différentiels. En effet, le site est supposé composé d'une couche de sol reposant sur le substratum rocheux. Les caractéristiques de la couche de sol peuvent être différentes d'un appui à un autre.

Le modèle du portique de pont étudié est illustré sur la figure 2.3. Ce modèle est décrit par deux supports reposant sur des sites différents liés par un tablier de longueur d qui est modélisé par une poutre rigide.

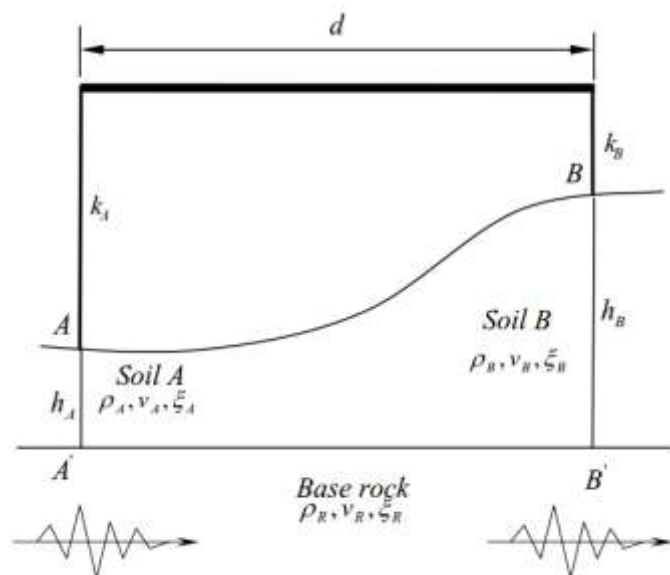


Figure 2. 3. Schéma du portique du pont à travers un canyon (Bi et al. 2010).

Le mouvement sismique à la base rocheuse est défini par la fonction de densité spectrale de puissance Tajimi-Kanai filtrée et le modèle de cohérence empirique de Sobczyk (1991). Les paramètres utilisés conduisent à la fonction de densité spectrale illustrée sur la figure 2. 4.

Les signaux sismiques à la surface sont calculés en utilisant l'amplification du site considéré. Les paramètres de site adoptés sous chaque support du portique de pont conditionnent l'intensité des mouvements sismiques simulés par l'amplification.

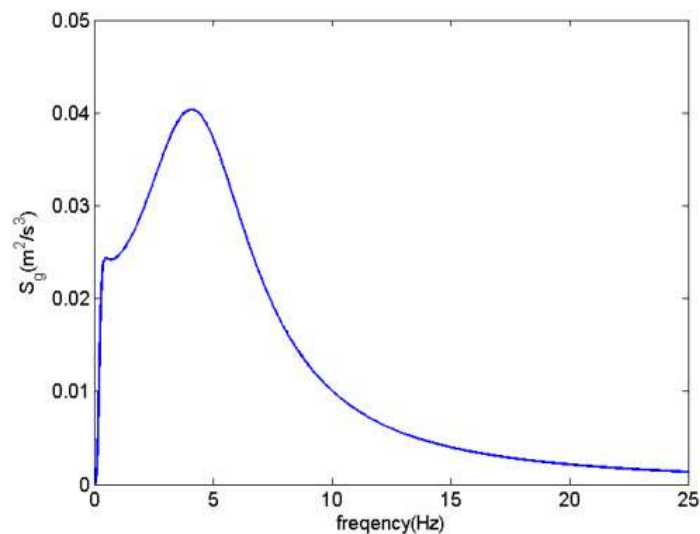


Figure 2. 4. Fonction de densité spectrale de puissance adoptée au substratum rocheux (Bi et al. 2010).

Une série d'analyse dynamique de la structure du pont a été établie sous différents chargements sismiques. Les réponses dynamiques, quasi-statiques et totales de la structure du pont sont calculées.

Deux mouvements sismiques différentiels sont adoptés le premier prend en compte l'effet de site et le second ne prend en compte que l'effet d'incohérence et l'effet de passage d'onde. Un mouvement sismique uniforme est également utilisé pour comparaison.

Une étude paramétrique en fonction des profondeurs des colonnes de sol sous chaque support de portique de pont, des propriétés des sites adoptés et de l'intensité du modèle d'incohérence pris en considération est également réalisée.

En effet, la première partie de cette étude paramétrique consiste à analyser l'effet de plusieurs profondeurs de colonnes de sol sur leurs réponses structurelles. Pour cela, six combinaisons de profondeurs ont été choisies. Les résultats sont exprimés sous forme de fonction de transfert (Amplification) (Figure 2. 5), de fonction de densité spectrale de puissance à la surface (Figure 2. 6) et de la réponse dynamique du portique de pont (Figure 2. 7).

Cette partie a permis de conclure que plus la colonne de sol sous les supports est profonde plus le site est flexible (très meuble) et plus la fréquence de vibration fondamentale est faible.

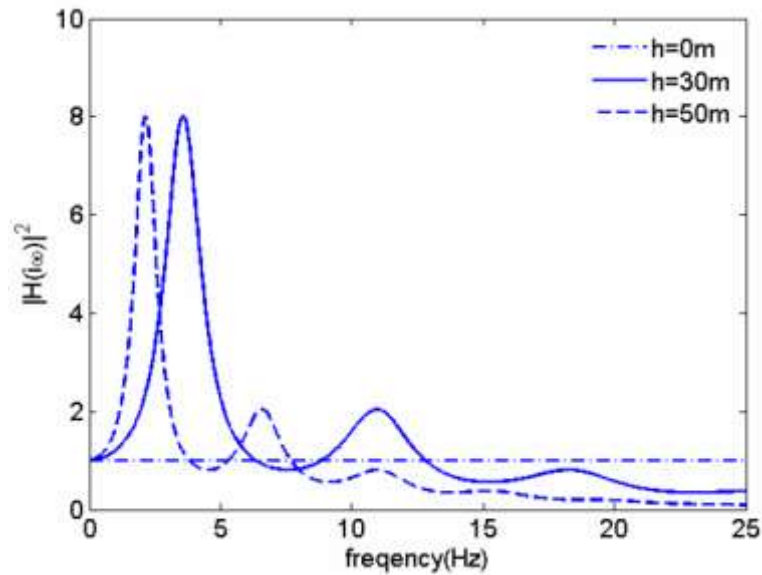


Figure 2. 5. Fonctions de transfert des sites pour des profondeurs différentes.

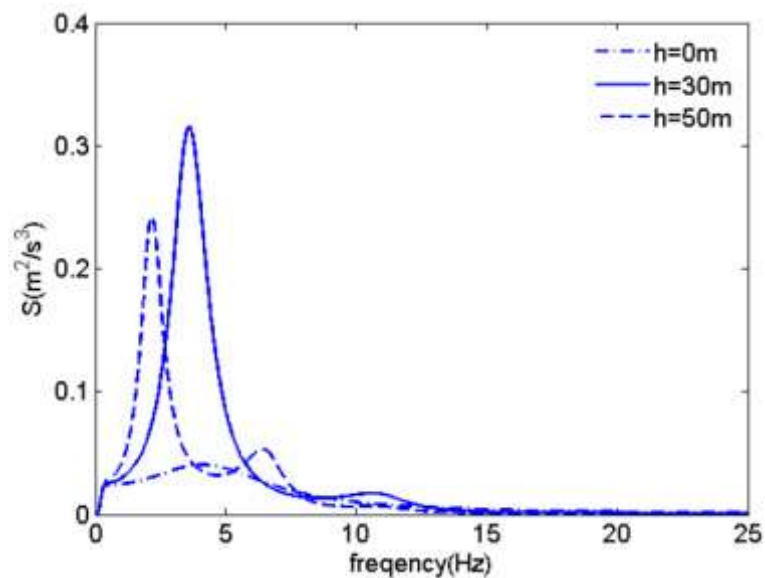


Figure 2. 6. Fonction de densité spectrale de puissance à la surface pour des profondeurs différentes.

La seconde partie de cette étude paramétrique traite la variation des caractéristiques de sol sous les supports du portique de pont. Les propriétés de sol utilisées dans cette étude sont illustrées dans le tableau 2. 1 ; à savoir, la masse volumique ρ la vitesse de propagation des ondes de cisaillement V_s et l'amortissement ξ .

Tableau 2. 1. Paramètres du substratum rocheux et les différents types de sol (Bi et al. 2010).

Type	ρ (KN/m^3)	V_s (m/s)	ξ
Substratum rocheux	3000	1500	0.05
Sol ferme	2000	450	0.05
Sol meuble	1500	300	0.05
Sol très meuble	1500	100	0.05

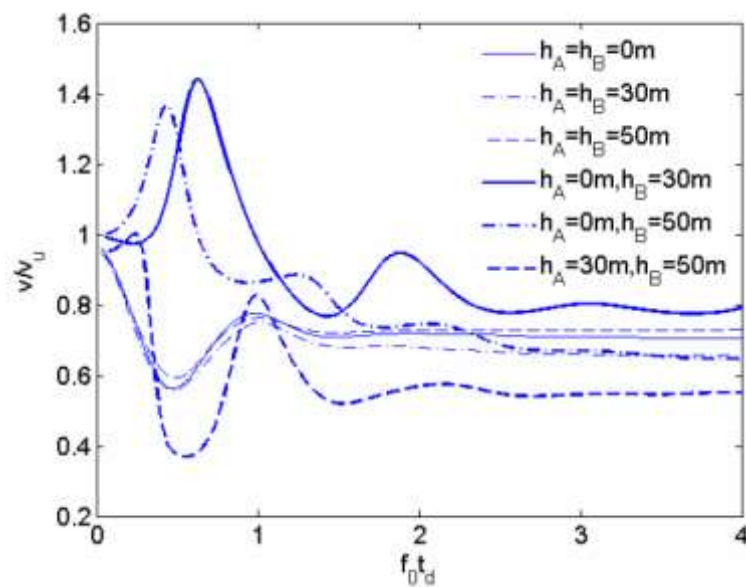


Figure 2. 7. Réponses dynamiques normalisées pour différentes profondeurs de sol.

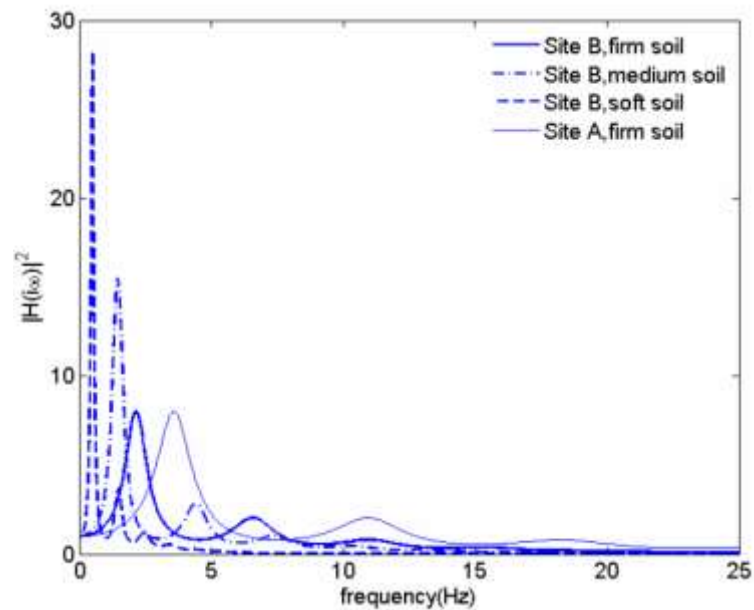


Figure 2. 8. Fonctions de transfert des différents types de sol.

La figure 2. 8 donne les fonctions de transfert pour différentes propriétés de site au niveau des deux supports du portique de pont. La réponse dynamique en fonction des propriétés de sol est illustrée sur la figure 2. 9.

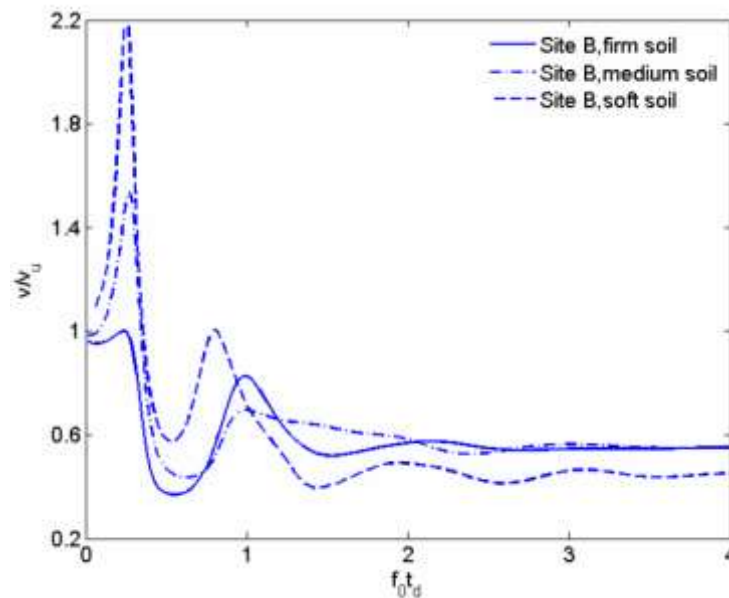


Figure 2. 9. Réponses dynamiques normalisées des différents types de sol.

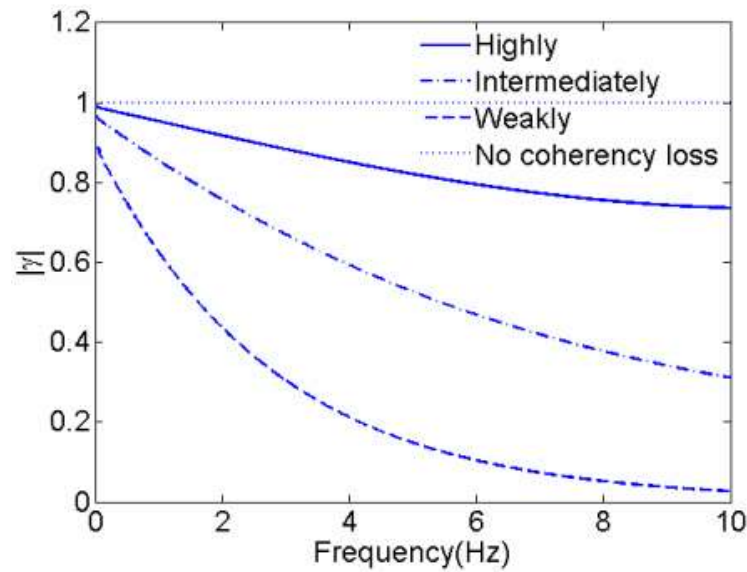


Figure 2. 10. Evolution de cohérence en fonction de l'intensité (Bi et al. 2010).

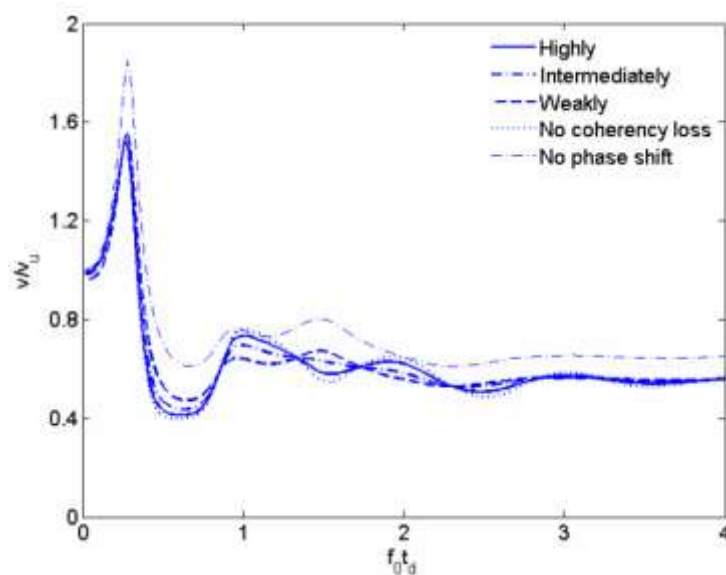


Figure 2. 11. Réponses dynamiques normalisées des différentes intensités d'incohérence.

Les auteurs ont conclu que le fait de considérer un site très meuble conduit à des réponses dynamiques élevées. Cependant, si le site est rigide (cas des sols rocheux) la réponse dynamique est faible. Ce qui conduit à ce que la réponse totale soit dominée par la composante pseudo-statique.

Au niveau de la dernière partie de l'étude paramétrique, trois niveaux d'intensité d'incohérence sont adoptés : une incohérence élevée, moyenne et faible (Figures 2. 10 et 2. 11).

Cette dernière partie a montré que le choix du niveau d'incohérence conditionne la réponse dynamique en particulier si la structure est rigide.

Selon les résultats obtenus dans ce travail, les auteurs ont conclu que les conditions locales du site affectent de manière significative les mouvements sismiques à la surface, agissant directement sur la réponse du pont. En effet, lorsque les conditions de site se diffèrent au niveau des deux supports du pont, cela entraîne des variations spatiales plus importantes des mouvements sismiques induisant des réponses structurelles considérables.

Il convient également de conclure que dans le cas d'une structure souple, l'effet d'incohérence du mouvement sismique a un effet relativement moins important sur la réponse totale qui est régie par la réponse dynamique. Cependant, l'effet d'incohérence est important, surtout lorsque la structure est rigide.

- **Mwafy et al. (2011)**

Les auteurs de ce travail ont mené une étude sur un pont à plusieurs travées de géométrie compliquée et de longueur très importante. Ce pont est situé à Caruthersville (Missouri, USA). L'influence de la variabilité spatiale du mouvement sismique sur le comportement dynamique de ce pont est également présentée (Mwafy et al. 2011).

Ce pont est conçu sur des couches épaisses de dépôts de sol (Figure 2. 12) et à proximité d'une faille sismique importante (faille de New Madrid) capable de produire des séismes majeurs. Il a été construit, au début des années 70, en considérant un risque sismique relativement minimal par rapports aux règlements actuels. L'ouvrage est composé de 59 travées avec une longueur totale de 2164 m. Il est constitué de plusieurs joints de dilatation, différents types d'appareils d'appuis et divers dispositifs irréguliers (Figure 2. 13).

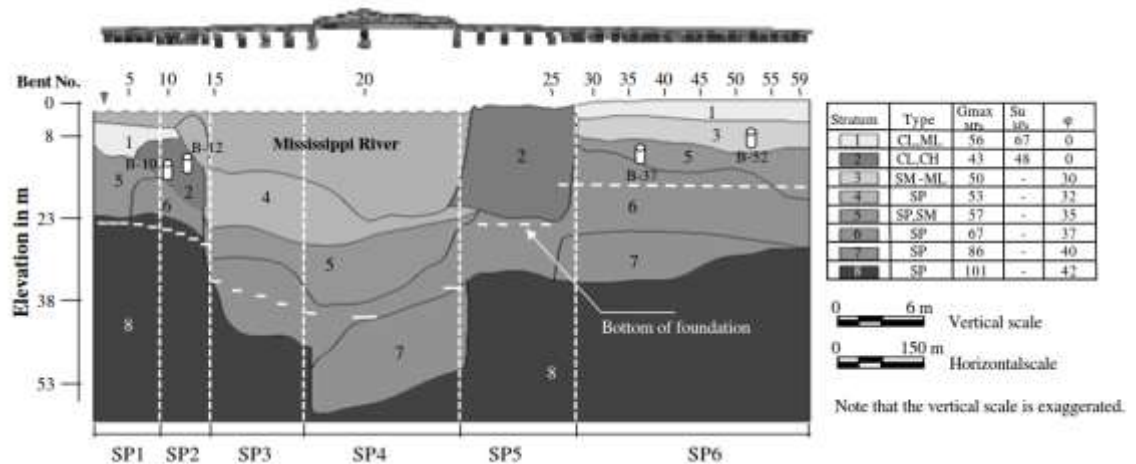


Figure 2. 12. Profils des sols le long du pont de Caruthersville (Mwafy et al. 2011).

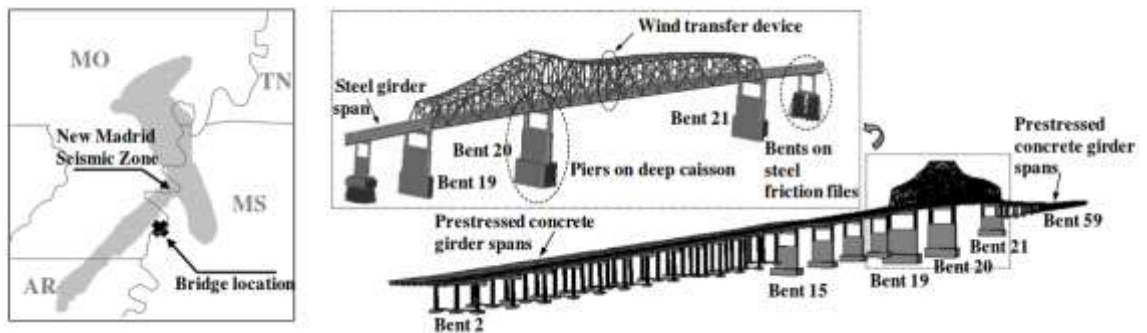


Figure 2. 13. Implantation du pont à Caruthersville, Missouri (USA) (Mwafy et al. 2011).

L'impact de la variabilité spatiale du mouvement sismique sur la réponse sismique de ce pont est examiné dans les deux directions longitudinale et transversale en comparant les réponses non linéaires de deux ensembles de mouvements sismiques. Le premier considère seulement les effets de site, tandis que le deuxième tient compte les effets de site, de passage d'onde, et d'incohérence.

Afin de traiter l'effet de site dans cette étude, l'analyse de la réponse des sites étudiés a été réalisé en utilisant le programme d'analyse de réponse de site unidimensionnel DEEPSOIL (Hashash et al. 2020). En effet, DEEPSOIL peut être utilisé afin d'établir une analyse de réponse de site en utilisant l'approche linéaire équivalente dans le domaine fréquentiel ou l'approche non linéaire de contrainte totale dans le domaine temporel. Les auteurs préconisent l'analyse du domaine temporel non linéaire parce

qu'elle est plus appropriée lors de la simulation de séismes forts, dans laquelle la réponse cyclique et hystérétique du sol est prise en compte.

Pour cette analyse un modèle non linéaire basé sur des approches d'évaluation rigoureuse est adopté pour le système pont-culées-fondations. L'interaction sol-fondation est prise en compte dans cette étude par un modèle tridimensionnel en considérant un comportement non linéaire pour la fondation et pour le profil du sol. Les résultats obtenus confirment l'impact significatif des effets de cette variabilité sismique sur le comportement dynamique du pont étudié. Les auteurs ont remarqué que les effets de passage d'onde et d'incohérence amplifient la demande sismique en déformation et en effort internes dans certaines piles (+65%) et réduisent ces demandes dans d'autres (-40%). La réponse sismique des appareils d'appuis est affectée en grande partie par ces deux effets surtout dans la direction longitudinale où l'amplification des demandes sismiques maximales peut dépasser 150%. Les auteurs ont montré, à partir de cette étude concentrée sur un pont très critique, que les contributions des effets d'incohérence et de passage d'onde donnent la limite supérieure de la réponse pour des structures semblables avec le même niveau de risque sismique. Finalement, il a été conclu que l'évaluation sismique détaillée des ponts aussi importants nécessite des techniques de modélisation avancées pour déterminer réellement leur réponse sismique complexe.

- **Benmansour et al. (2012)**

Le travail présenté par Benmansour et al. (2012) a pour but principal d'évaluer la méthode proposée par le règlement parasismique algérien des ouvrages d'art (RPOA) (MTP 2010). Cette méthode prend en compte la variabilité spatiale du mouvement sismique. Des analyses dynamiques de plusieurs ponts ont été établies en utilisant des méthodes plus raffinées de modélisation de la variabilité spatiale du signal sismique. Les résultats issus de ces analyses ont été comparés avec ceux calculés en adoptant la méthode simplifiée proposée par le règlement parasismique des ouvrages d'art (RPOA) (MTP 2010).

Une autre comparaison a été également réalisée et cela en adoptant les dispositions de l'Eurocode 8 (CEN 2004) de la prise en compte de la variabilité spatiale du mouvement sismique pour les structures étendues.

Dans un souci de compatibilité des résultats, les signaux sismiques simulés sont comparables à ceux issus des codes parasismiques. Pour ce faire, les signaux sismiques simulés ont été calibrés par un spectre de réponse cible donné par ces codes parasismiques.

L'approche de simulation conditionnelle a été adoptée. En effet, cette approche consiste à définir un enregistrement sismique cible. Le signal sismique à un site est bien connu.

Ce travail est composé de deux phases. La première consiste à générer des signaux sismiques en fonction d'un modèle de cohérence. Puis, ces signaux sismiques simulés sont appliqués à des ponts.

Il est à noter que la méthode de représentation spectrale décrite par Deodatis (1997) a été utilisée pour générer des inputs sismiques variables dans l'espace. Les auteurs ont opté pour le choix de la fonction de cohérence empirique de Harichandran et Vanmarcke (1986) afin de modéliser la variabilité spatiale du mouvement sismique (Figure 2. 14).

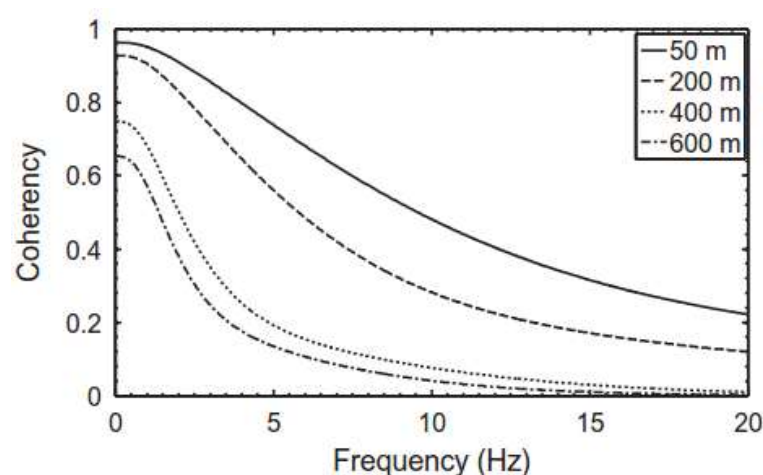


Figure 2. 14. Fonction de cohérence de Harichandran et Vanmarcke (1986).

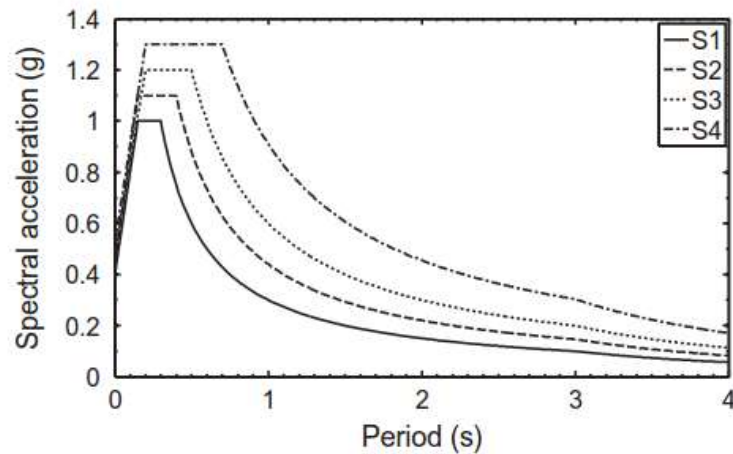


Figure 2. 15. Spectre de réponse pseudo-accélération des quatre types de sites S1, S2, S3 et S4 (MTP 2010).

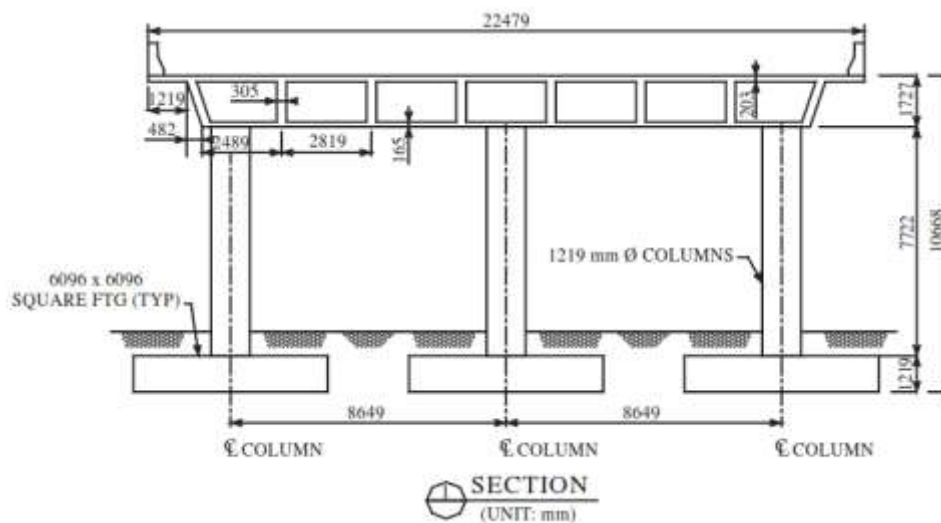


Figure 2. 16. Section transversal du pont (FHWA 1996).

Les signaux sismiques sont générés en adoptant un spectre de réponse de référence. Le choix de ce spectre cible est établi conformément aux dispositions du règlement parasismique algérien des ouvrages d'art (RPOA) (MTP 2010).

Il y a lieu de noter que ce même règlement parasismique donne une classification des sites en quatre catégories (S1 : site rocheux ; S2 : site ferme ; S3 : site meuble ; S4 : site très meuble). Ainsi, ces quatre cas sont également étudiés. La figure 2. 15 illustre

les spectres de réponse de pseudo-accélération correspondants aux différentes catégories de site (MTP 2010).

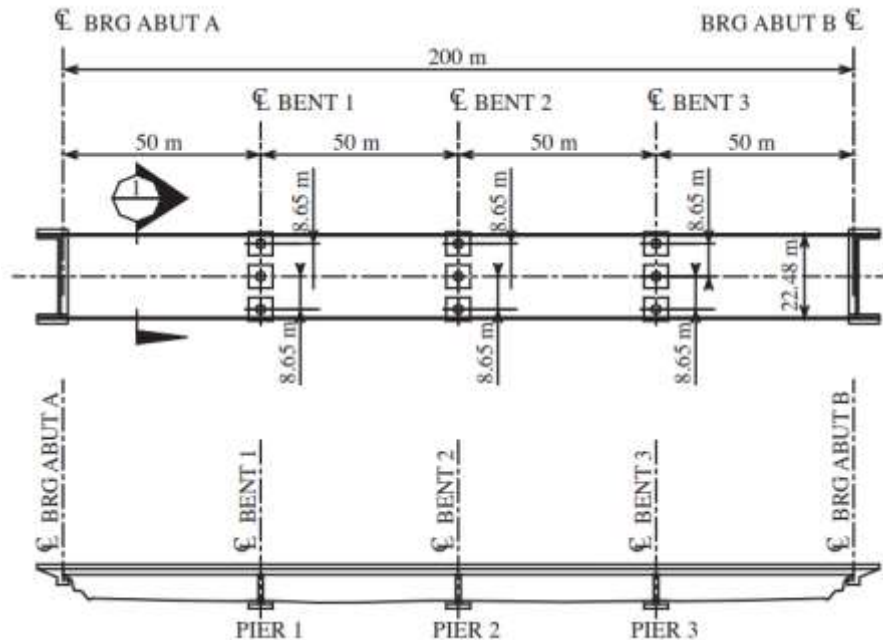


Figure 2. 17. Vue en plan et en long du pont 1 (FHWA 1996).

Après génération des signaux sismiques spatialement variables, le spectre de réponse de ces signaux est comparé avec le spectre de réponse cible (Figure 2. 18).

Les signaux sismiques générés sont utilisés comme inputs sismiques à trois exemples de ponts. Les ponts considérés dans cette étude ont la même configuration structurelle. La longueur de chaque travée est de 50 m pour l'ensemble des exemples. Les longueurs totales de ces ponts sont : 200 m pour le premier (pont 1) avec 4 travées (Figures 2. 16 et 2. 17), 400 m pour le second (pont 2) avec 8 travées et 600 m pour le dernier (pont 3) avec 12 travées. Leur configuration structurelle a été obtenue à partir de celle de l'exemple de conception N°1 décrit dans le code parasismique Federal Highway Administration (FHWA. 1996).

Pour chaque exemple de pont, cinq types d'analyses sismiques linéaires décrits dans le tableau 2. 2, sont réalisés. Ensuite, les résultats de ces analyses sont comparés en termes de demande d'efforts internes.

Les auteurs préconisent que les inputs sismiques différentiels doivent être appliqués à partir des deux extrémités du pont étudié. Et cela quand les méthodes simplifiées données par le RPOA et EC8 sont utilisées.

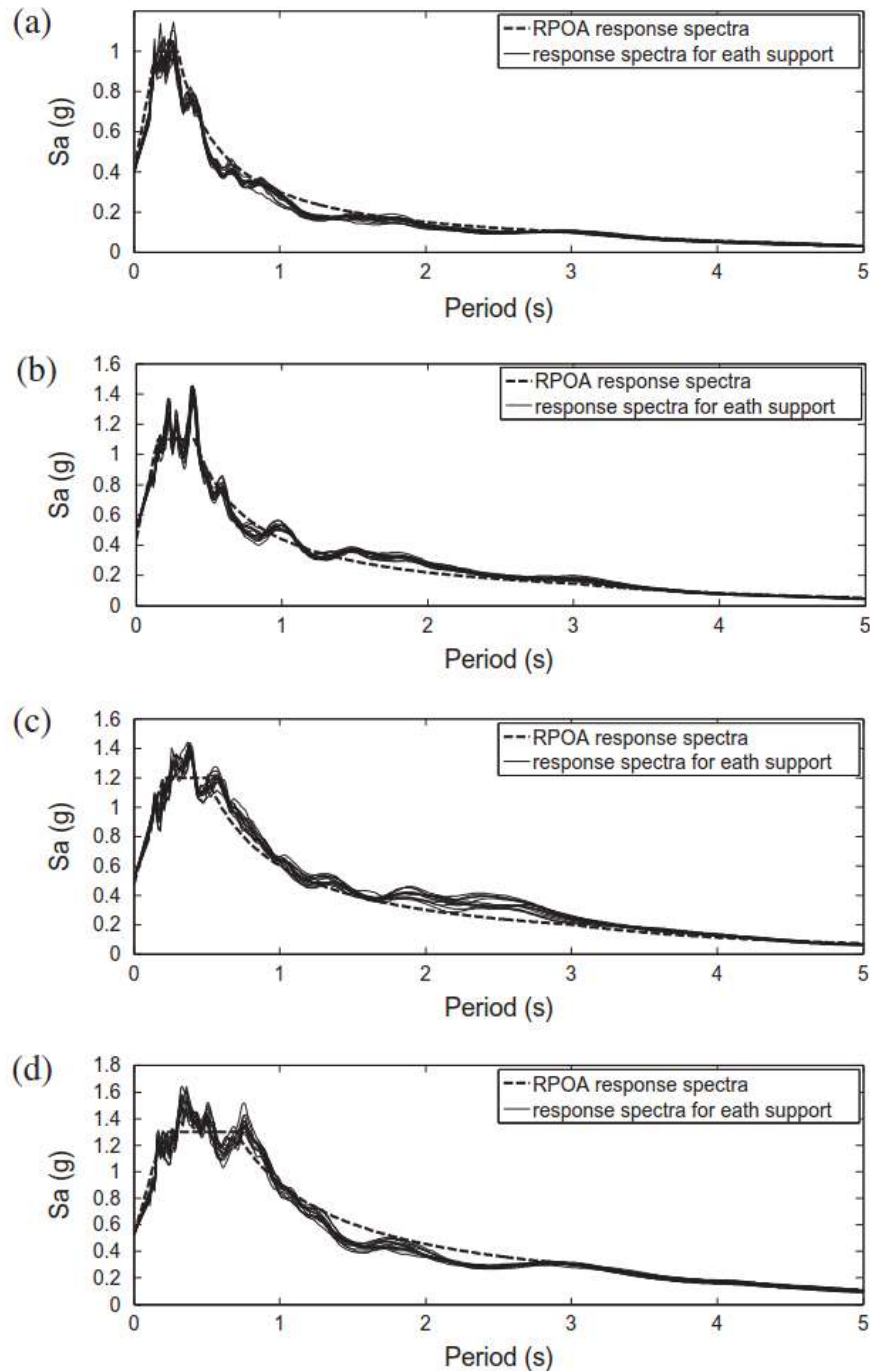


Figure 2. 18. Comparaison entre les spectres de réponse simulés et celui cible : (a) S1, (b) S2, (c) S3 et (d) S4.

Tableau 2. 2. Cas d'analyses (Benmansour et al. 2012).

Acronyme	Mouvement sismique	Type d'analyse	Chargement sismique
URSA	Uniforme	Spectre de réponse	Spectre de réponse
UTHA	Uniforme	Déterministe	Déplacement simulé au 1 ^{er} support sera imposé pour tous les supports
VRPA	Variable	Méthode simplifiée du RPOA	Spectre de réponse du RPOA
VEC8	Variable	Méthode simplifiée du EC8	Spectre de réponse du RPOA
VTHA	Variable	Déterministe	Déplacements simulés (SVGM)

Benmansour et al. ont conclu que la méthode simplifiée donnée par RPOA (MTP 2010) pour prendre en compte l'effet de la variabilité spatiale dans l'analyse dynamique des ponts, surestime la demande sismique (Figure 2. 18). Conséquemment, ils proposent une modification de quelques dispositions et paramètres afin d'avoir des résultats raisonnables.

- **Bi et Hao (2012)**

Dans cet article, les auteurs ont examiné l'impact de la variation des conditions locales du site sur l'évaluation des mouvements sismiques spatialement variables. Pour un site plat et uniforme, l'hypothèse de considérer que le mouvement sismique, à différentes positions, a la même densité spectrale de puissance (DSP) ou le même spectre de réponse est justifiée. Par contre, si un site caractérisé par des conditions de sol variables au niveau des appuis d'une structure est considéré, cette hypothèse n'est plus valide (Bi et Hao 2012).

Une approche approximative pour modéliser et simuler la variabilité spatiale du mouvement sismique à la surface d'un site accidenté avec des conditions de sol variables à des points différents a été développée. Les mouvements sismiques spatialement variables sont simulés en passant par deux étapes.

La première étape consiste à considérer que l'intensité des mouvements sismiques à la base rocheuse est identique à différentes positions. Ils sont modélisés par la fonction de densité spectrale de Kanai-Tajimi ou par d'autres modèles d'atténuation. La variabilité spatiale du mouvement sismique à la base rocheuse est modélisée par un modèle de cohérence empirique.

Les fonctions de densité spectrale de puissance des mouvements sismiques à la surface en considérant plusieurs couches de sol variables sont générées en se basant sur la théorie de propagation unidirectionnelle d'ondes. Tout en négligeant la réflexion des ondes sismique à la surface accidentée d'un canyon et en supposant que les mouvements sismiques à la base rocheuse sont caractérisés par des ondes *SH* ou une combinaison des ondes *P* et *SV* qui se propagent dans le site avec un angle incident donné (Wolf 1985).

En deuxième lieu, une méthode stochastique pour générer des mouvements sismiques différentiels (évolution temporelle) compatible avec des densités spectrales non uniformes et une fonction de cohérence est développée en adoptant un site accidenté. Les mouvements générés sont compatibles avec la densité spectrale de puissance dérivée en un point particulier sur le site ou avec un spectre de réponse correspondant aux conditions du site.

Afin de valider les résultats de cette approche, des exemples de démonstration sont présentés. La configuration des sites, illustrée sur la Figure 2. 19, est utilisée pour les réaliser.

Pour le premier exemple, les mouvements sismiques sont simulés au niveau du substratum rocheux en adoptant la fonction filtrée de Kanai-Tajimi et le modèle de cohérence empirique de Sobczyk (1991). Ces mouvements sismiques sont simulés à la base rocheuse.

Ensuite, les signaux sismiques à la surface sont dérivés à partir des mouvements sismiques simulés au substratum rocheux en se basant sur les fonctions de transfert. Ces fonctions sont calculées en fonction de la configuration locale des sites.

Deux cas de figure sont étudiés, à savoir les mouvements horizontaux hors du plan induit par les ondes *SH* et les mouvements horizontaux dans le plan, générés par la combinaison des ondes *P* et *SV*.

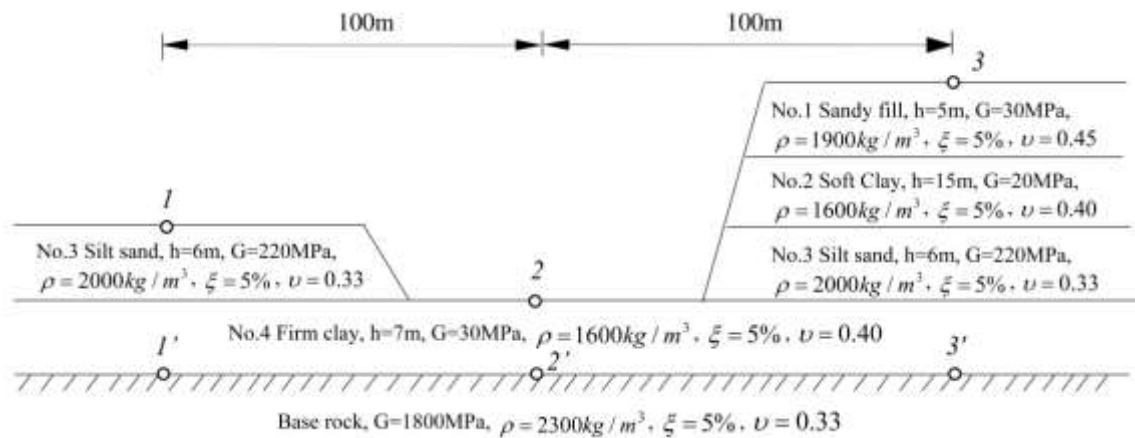


Figure 2. 19. Configuration des sites composés de plusieurs couches de sol (Bi et Hao 2012).

Une étude paramétrique a été également établie en fonction du type des ondes et leur angle d'incidence. Les types d'ondes adoptées sont les ondes *SH* ou la combinaison des ondes *P* et *SV*. La Figure 2. 20 illustre l'amplification de site estimée en adoptant la configuration des couches de sol au point 3 (décrit par la figure 2. 19).

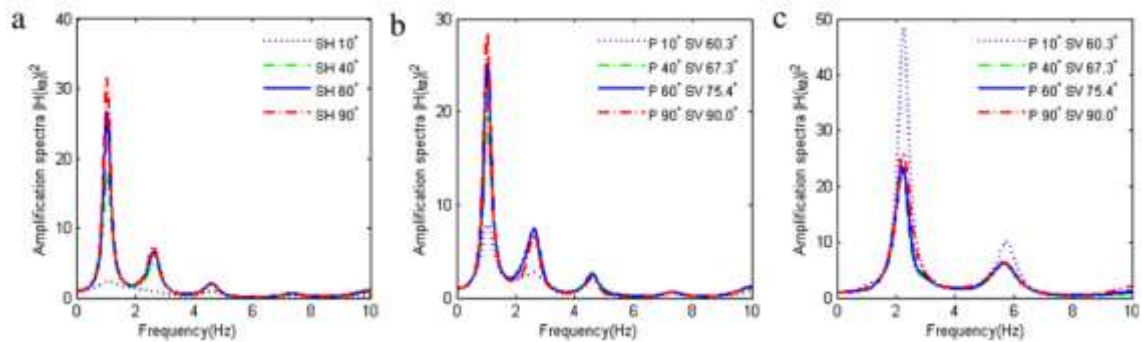


Figure 2. 20. Amplification des sites en fonction des types d'ondes et la direction considérés.

Les évolutions temporelles de ces mouvements sismiques simulés en surface en termes d'accélération et de déplacement sont dérivées à partir de ceux simulés au substratum rocheux en incorporant l'amplification des sites.

Le deuxième exemple démonstratif consiste à simuler des mouvements sismiques spatialement variables en adoptant un spectre de réponse cible. Les PGA (Peak Ground Acceleration) coïncident avec celles du spectre de réponse. Les PGD (Peak

Ground Displacement) se diffèrent à cause de l'amplification des sites. Une comparaison des spectres de réponses calculés à partir des signaux sismiques simulés à la surface avec celui cible est illustrée sur la figure 2. 21.

Il est à noter que les fonctions de transfert des sites concernés peuvent être obtenues en se basant sur la théorie de propagation d'ondes sismique décrite par Wolf (1985) et que cette approche approximative repose sur la méthode de représentation spectrale. Cette dernière s'appuie sur la décomposition de Cholesky de la matrice d'inter-densité spectrale.

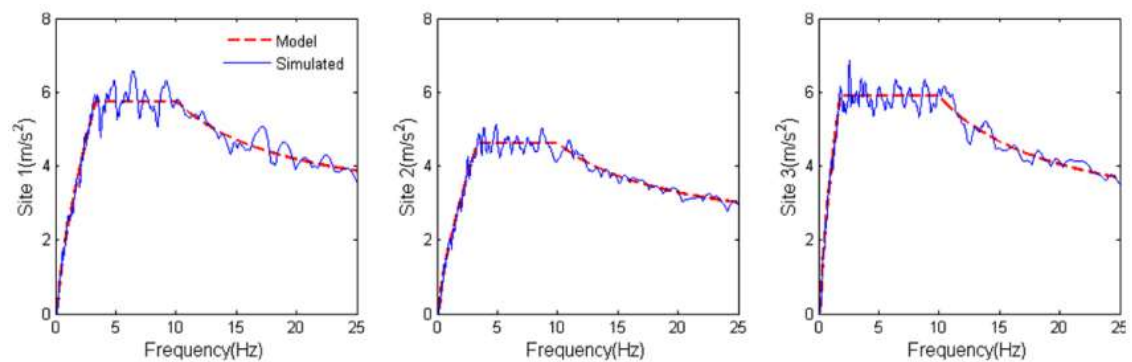


Figure 2. 21. Comparaison des signaux sismiques simulés avec le spectre de réponse cible.

Les résultats obtenus ont montré que le fait de négliger l'effet du site (effet d'amplifications) dans l'analyse dynamique des structures.

- **Konakli et Der Kiureghian (2012)**

Le travail de ces auteurs consiste à élaborer une méthode de simulation de la variabilité spatiale du mouvement sismique incluant l'incohérence, le passage d'ondes et l'effet de site (Konakli et Der Kiureghian 2012).

La méthode de segmentation est utilisée pour prendre en compte la non-stationnarité du mouvement sismique. En effet, cette méthode consiste à supposer que le mouvement sismique est composé de plusieurs segments. Chaque segment peut être considéré comme un processus stationnaire. Les segments sont définis de sorte qu'ils conservent à un temps plus au moins égale les mêmes caractéristiques statistiques. Après simulation, les segments simulés correspondants sont réunis.

Il est à noter qu'une segmentation plus dense conduit à une représentation plus précise de la nature non-stationnaire et du contenu des hautes fréquences du signal d'origine. Mais, ils mettent en garde que ce choix de segmentation peut modifier le contenu des basses fréquences du signal sismique (Figure 2. 22).

Afin d'éviter ce phénomène, ils préconisent d'utiliser un filtrage pour séparer le contenu des basses fréquences. Une étude des critères de choix de filtres est aussi menée (Figure 2. 23).

Afin d'éviter le décalage des segments en temps pour les différents sites, l'effet de passage d'ondes est réalisé séparément en appliquant un décalage temporel.

La méthode de simulation de la variabilité spatiale du mouvement sismique est basée sur deux approches. Au niveau de la première approche nommée l'approche inconditionnelle, la simulation des signaux sismiques spatialement variables est menée en considérant que le mouvement sismique est compatible avec une fonction de densité spectrale de puissance estimée. Cette approche est caractérisée par une variabilité uniforme.

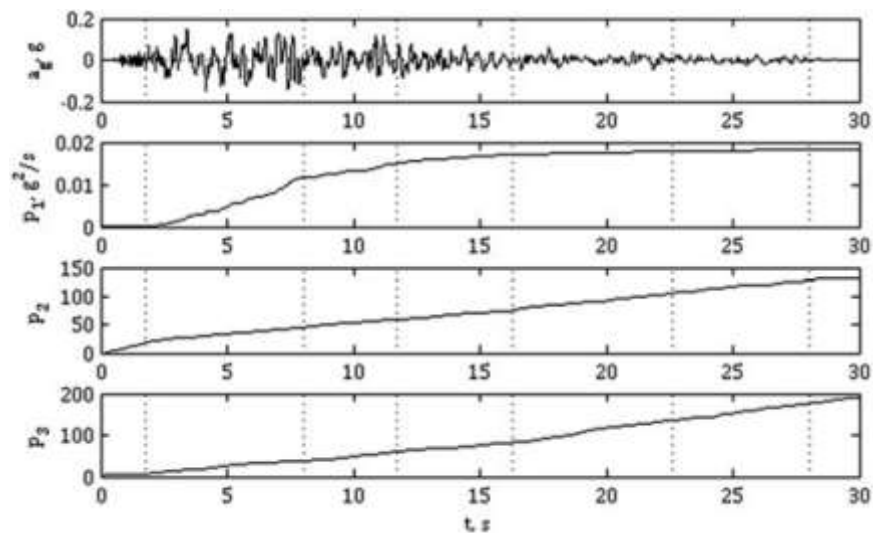


Figure 2. 22. Segmentation d'un enregistrement basée sur l'intégrale de l'énergie cumulée, la fréquence prédominante et la largeur de bande (Konakli et Der Kiureghian 2012).

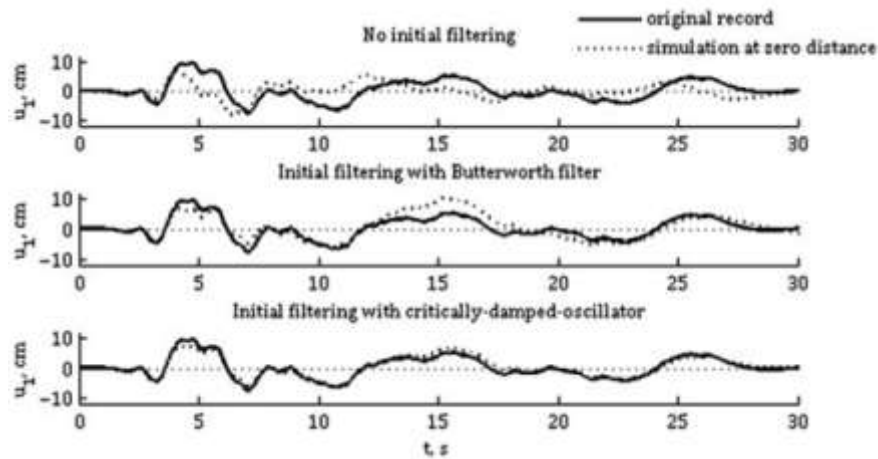


Figure 2.23. Comparaison de l'enregistrement original en déplacement avec les déplacements simulés (séisme d'Izmit 1999) à une distance nulle (Konakli et Der Kiureghian 2012).

Il est à noter que cette variabilité uniforme est nécessaire lorsque des signaux artificiels sont utilisés pour l'analyse des structures étendues. L'approche conditionnelle est la deuxième approche qui est conditionnée par un enregistrement (accélérogramme) observé à un site donné. Dans ce cas, il a été observé que la variabilité augmente avec la distance.

Afin d'incorporer l'effet de site à la variabilité spatiale du mouvement sismique, la réponse locale du profil de sol est modélisée en deux façons. Une première étude est menée en modélisant ce profil de sol par un oscillateur à un seul degré de liberté. Le deuxième travail est établi en utilisant la théorie de propagation des ondes verticales dans une couche de sol sur un substratum rocheux. Il est à noter que les conditions locales de sol sont supposées identiques pour l'ensemble des supports du pont étudié.

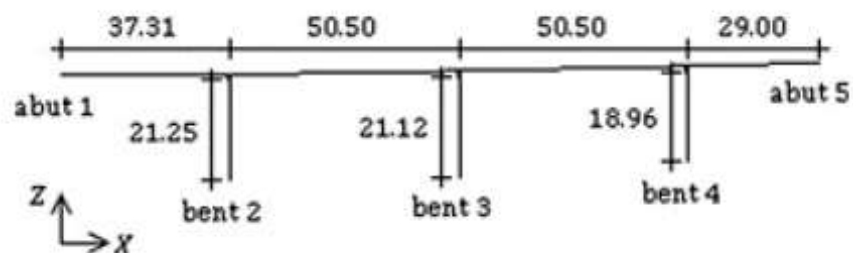


Figure 2.24. Application numérique : modèle du pont Penstock (Konakli et Der Kiureghian 2012).

Les signaux sismiques sont simulés en utilisant chaque approche décrite ci-haut conformément au modèle de pont existant (Figure 2. 24).

Les résultats de ces simulations en adoptant l'approche inconditionnelle ou conditionnelle montrent que la nature non stationnaire du mouvement sismique est préservée. Les mouvements sismiques simulés pour tous les supports du pont étudié présentent le même contenu fréquentiel. Une légère différence est constatée entre les mouvements simulés pour les culées et ceux des piles. Cela est dû aux effets d'incohérence et passage d'onde.

Les résultats en spectres de réponse issus des mouvements sismiques sont obtenus en considérant 20 simulations. Cela est valable pour les deux approches inconditionnelle et conditionnelle. En effet, les spectres de réponse des mouvements sismiques simulés à chaque point du contact du sol avec les supports du pont sont étudiés en considérant un amortissement de 5% (Figures 2. 25 et 2. 26).

Pour le cas inconditionnel, les variances calculées à tous les points d'appuis sont similaires. Cette dernière caractéristique est très souhaitable pour les analyses de la réponse sismique d'un pont sous un chargement différentiel. Tandis que pour le cas conditionnel, ils ont observé des variances croissantes de l'amplitude spectrale avec la distance.

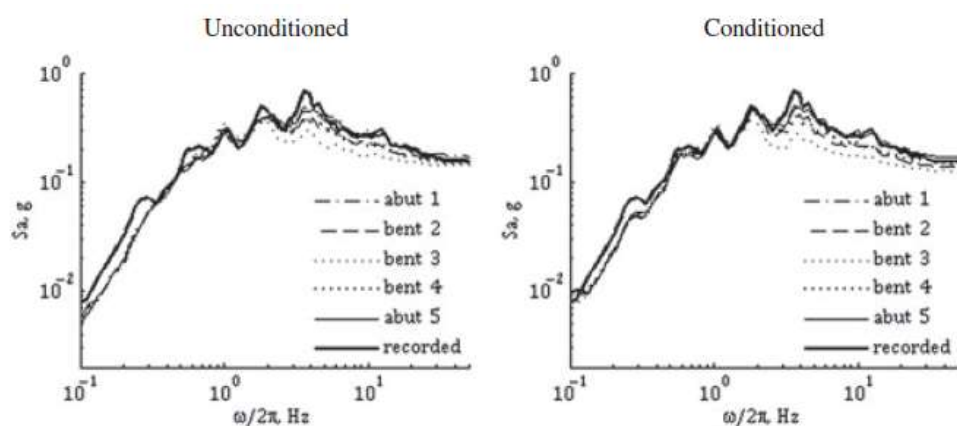


Figure 2. 25. Spectre de réponse pseudo-accélération de 20 simulations en modélisant le profil de sol par 1DDL.

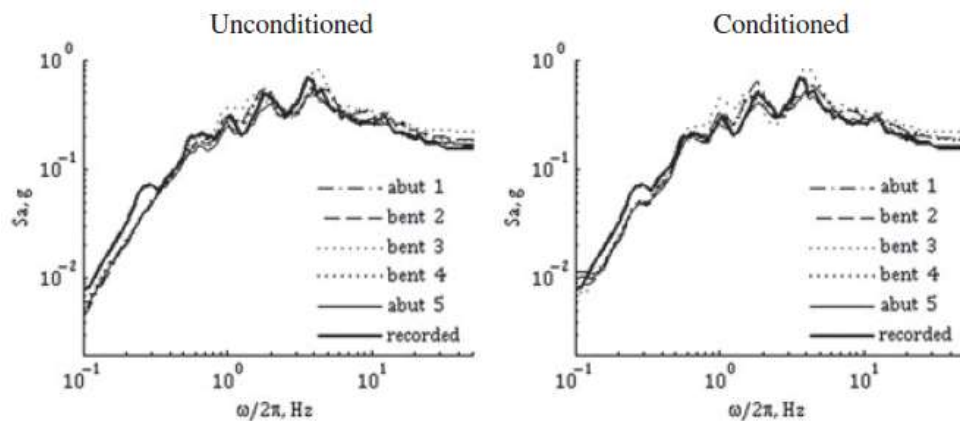


Figure 2. 26. Spectre de réponse pseudo-accélération de 20 simulations en modélisant le profil de sol par la théorie de propagation des ondes.

- **Zhang et al. (2013)**

Les auteurs préconisent l'utilisation des mouvements sismiques synthétiques à cause de la rareté des enregistrements sismiques réels pour des structures de différentes dimensions, et d'une grande importance pour le génie parasismique et l'analyse des risques sismiques (Zhang et al. 2013).

Les auteurs de cet article présentent une méthode de simulation des mouvements sismiques synthétiques variables dans l'espace toute en considérant la non-stationnarité des mouvements sismiques, les conditions locales du site et la compatibilité avec un spectre de réponse cible, générés à la surface.

Une approche de transformation du spectre de réponse du substratum rocheux à la surface à l'aide de la méthode d'amplification de site est également présentée.

Le schéma de cette méthode de simulation permettant de générer des mouvements sismiques spatialement variables et compatibles avec des spectres de réponse est d'abord établi pour les positions à la surface du sol avec des conditions locales variables du site.

L'approche d'amplification de site est ensuite dérivée sur la base de la théorie de propagation d'ondes, en supposant que les mouvements sismiques au substratum rocheux consistent en des ondes *SH* hors du plan ou combinées dans le plan des ondes *P* et *SV* se propageant dans le site avec des angles incidents prédéfinis.

La variabilité spatiale des mouvements sismiques est prise en considération en adoptant un modèle de cohérence et les conditions locales des sites étudiés. En effet, le modèle de cohérence proposé par Harichandran and Vanmarcke (1986) est utilisé.

La non-stationnarité des mouvements sismiques générés est introduite en utilisant le modèle de différence de phases de Thráinsson et Kiremidjian (2002) développé à partir d'environ trois cent données d'enregistrement sismique en Californie.

Un exemple numérique est présenté afin de démontrer la méthode de simulation des mouvements sismiques spatialement variables. Cet exemple est une structure de pont composé de trois piles espacées de 100 m (Figure 2. 27). Les caractéristiques des sites sous ces piles sont choisies conformément à la classification des sites définie dans les prévisions de NEHRP (FEMA P-749 2010) (Tableau 2. 3).

Ils ont observé que les fréquences fondamentales sont proportionnelles à la rigidité des sites. En effet, plus le site est souple, plus la fréquence fondamentale augmente et plus les valeurs d'amplification des sites diminuent (Figure 2. 28).

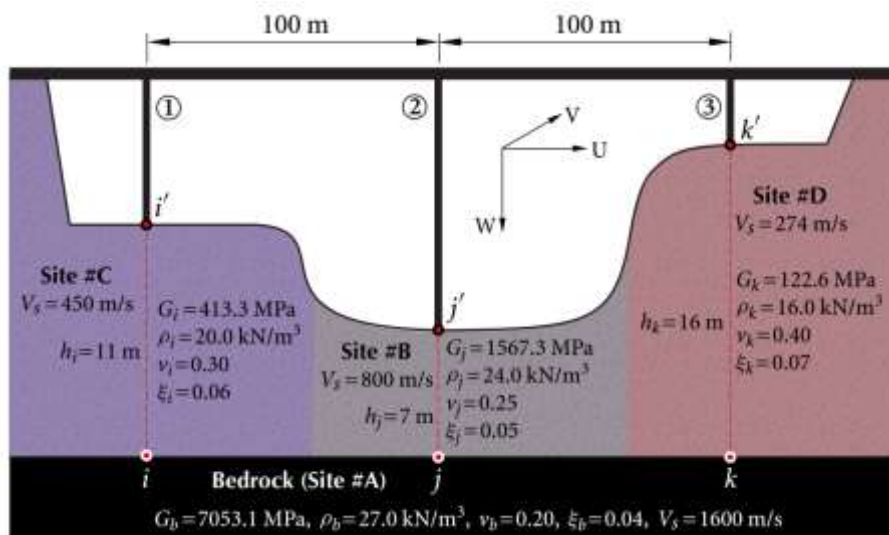


Figure 2. 27. Vue schématique de la structure du pont à travers un canyon.

Les auteurs ont constaté que les PGAs des accélérations synthétiques simulés des sites souples sont plus élevés que ceux des sites rigides (Figure 2. 29).

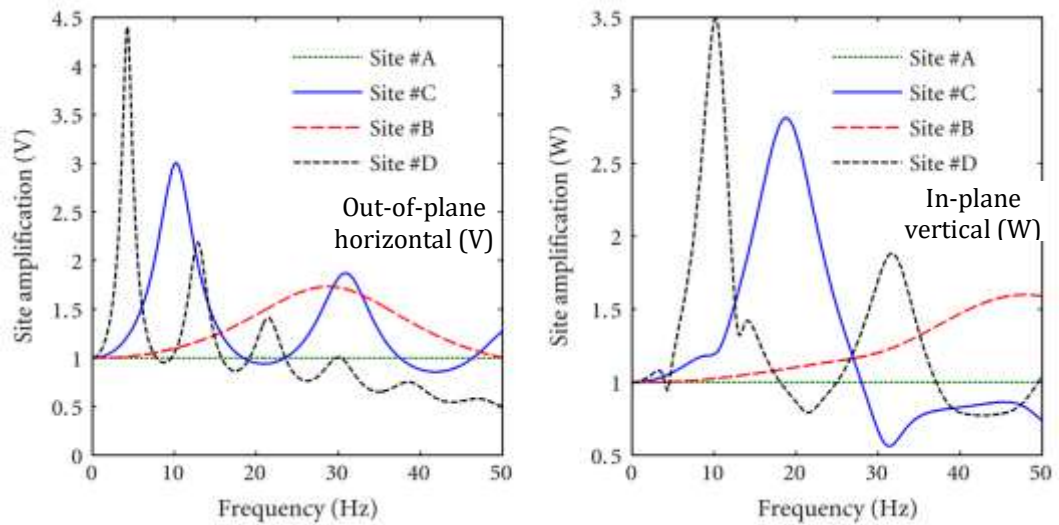


Figure 2. 28. Amplification des sites conditions différents des sites.

Tableau 2. 3. Classification des sites conformément aux prévisions de NEHRP (FEMA P-749 2010).

Classe du site	Description	Vitesse de propagation des ondes de cisaillement, V_s (m/s)	Module de cisaillement
#A	Roches dures	>1524	-
#B	Roches	762-1524	-
#C	Sol très dense et roches friables	366-762	>95800
#D	Sol compact	183-366	47900-95800

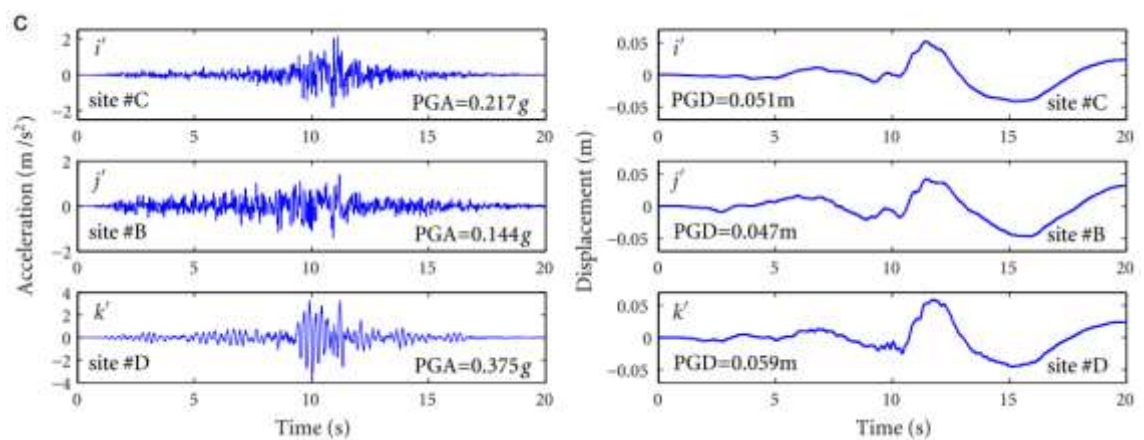


Figure 2. 29. Mouvements sismiques spatialement variables générés à la surface.

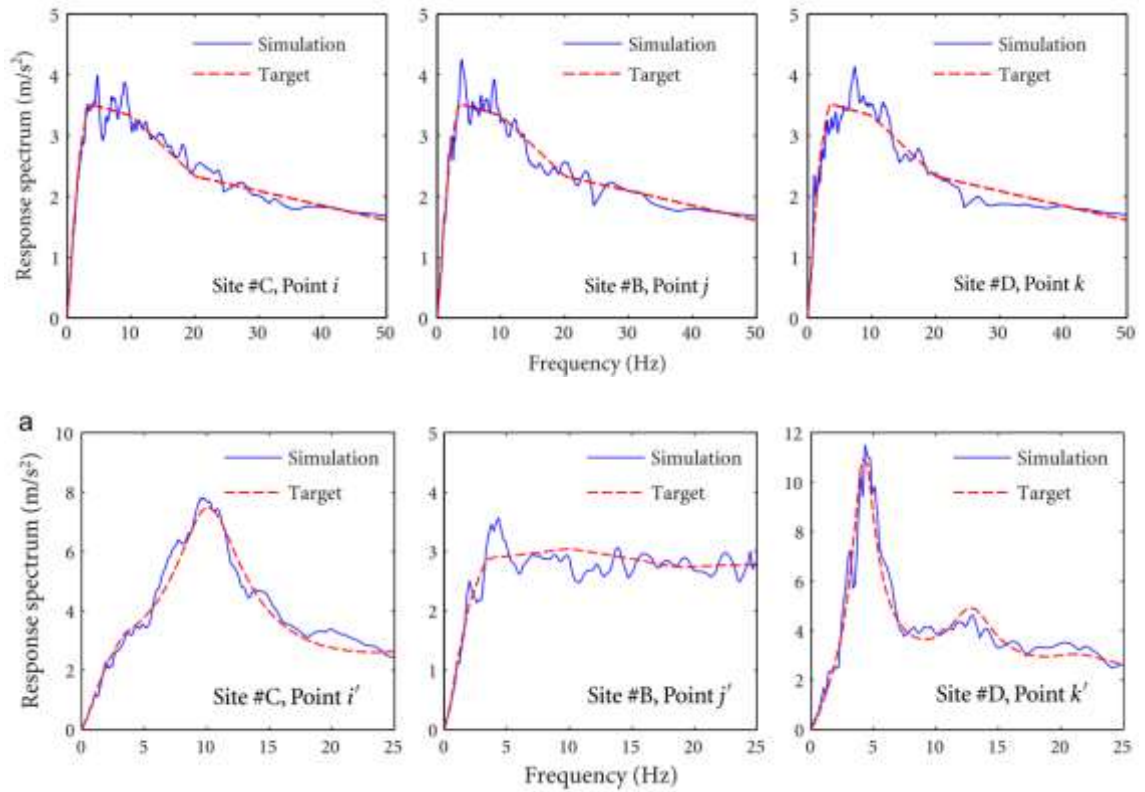


Figure 2. 30. Compatibilité des spectres de réponses des mouvements simulés au substratum rocheux (a) et à la surface(b).

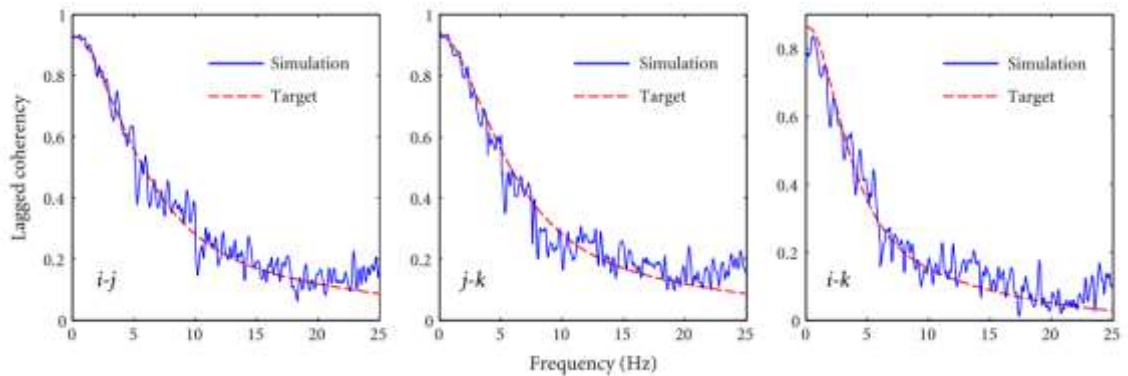


Figure 2. 31. Compatibilité des fonctions de cohérence des mouvements simulés au substratum rocheux.

A partir de la figure 2. 30, une bonne concordance est observée entre les mouvements sismiques simulés aux points situés au substratum rocheux et leurs projections en surface avec les spectres de réponse cibles. En outre, les valeurs de cohérence calculées

des mouvements sismiques synthétiques sont compatibles avec le modèle de cohérence adopté dans l'approche de simulation (Figure 2. 31).

Les auteurs insistent sur l'influence des conditions locales des sites sur les propriétés des mouvements sismiques synthétiques. La méthode de simulation proposée conduit à des signaux sismiques générés non-stationnaires et parfaitement compatibles avec les spectres de réponse au substratum rocheux et ceux en surface.

- **Fontara et al. (2015)**

Dans cet article, les auteurs ont présenté une étude numérique de l'influence de la variabilité spatiale du mouvement sismique, l'effet de site et l'interaction sol-structure sur la réponse dynamique d'un pont. Une analyse dynamique inélastique (non linéaire) de structures du pont a été menée (Fontara et al. 2015). L'effet de site est calculé en considérant une analyse bidimensionnelle du profil du sol toute en utilisant la méthode des éléments de frontières (MEFr). En effet, une propagation bidirectionnelle des ondes sismiques est considérée. Ces ondes, supposées de type *SH*, se propagent dans un demi-plan viscoélastique, isotrope et homogène constitué de *N* parallèles ou non parallèles couches hétérogènes avec une surface libre de forme arbitraire (Figure 2. 32).

La propagation des ondes sismiques à travers les profils géologiques complexes est modélisée, de manière à générer les enregistrements qui prennent en compte les conditions locales du site.

La méthode des éléments de frontières (MEFr) est utilisée pour calculer les enregistrements temporels pour quatre profils géologiques différents en considérant : (a) la topographie du canyon, (b) la stratification du sol et (c) l'effet de gradient du matériau. Ces quatre profils géologiques adoptés dans cette étude sont illustrés sur la figure 2. 33.

Une série de signaux sismiques temporels est appliquée au pont pour mener une analyse non-linéaire en utilisant la méthode des éléments finis (MEF) et en tenant compte de l'interaction sol-structure.

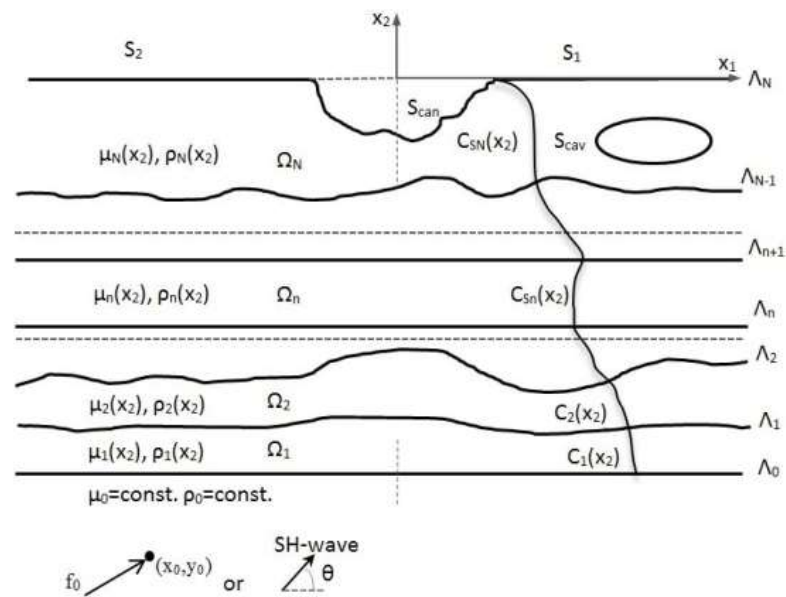


Figure 2. 32. Géométrie du problème traité par la méthode des éléments de frontière (MEFr) (Fontara et al. 2015).

La procédure de travail peut être résumée dans les étapes suivantes :

- Le mouvement sismique au substratum rocheux est défini par des enregistrements sismiques réels illustrés par le tableau 2. 4. Cela en considérant la topographie de canyon, la stratification du sol et l'effet de gradient de matériau.
- Les mouvements sismiques sont générés en utilisant la méthode des éléments de frontière (MEFr).
- Ces mouvements sismiques générés sont utilisés comme input pour un modèle tridimensionnel d'un pont monolithique (Figure 2. 34).
- L'étude du comportement sismique du pont est réalisée en utilisant la méthode des éléments finis (MEF).
- La réponse dynamique du pont est ensuite évaluée de manière paramétrique afin d'identifier l'impact relatif des phénomènes étudiés.

Pour l'ensemble des cas de chargement sismique, les résultats montrent que la rigidité latérale des piles sous un chargement uniforme est toujours surestimée de l'ordre de 30% par rapport au cas de chargement sismique qui prend en compte la topographie

du canyon et la stratification du sol. D'autres résultats ont été également présentés tel que les déplacements absolus des nœuds au niveau des piles et des tabliers.

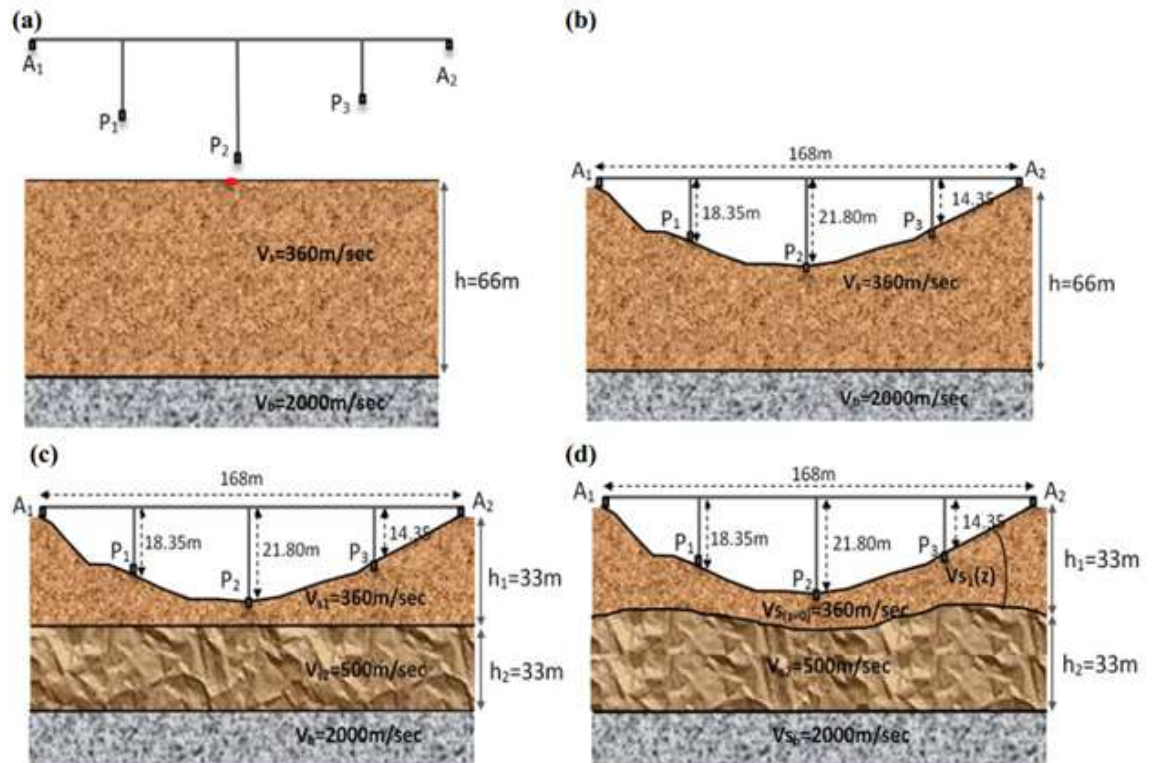


Figure 2.33. Les quatre profils géologiques adoptés (Fontara et al. 2015).

Tableau 2.4. Enregistrements sismiques adoptés (base de données PEER-2003 cité par Fontara et al. 2015).

N°	Date	Séisme	Magnitude	Station	Distance (Km)	Comp. (deg)	PGA (g)
1	22.03.1922	San Francisco	5.3	Golden Gate Park	-	100	0.112
2	17.01.1994	Northridge 1	6.7	Mt Wilson CIT	26.8	000	0.234
3	17.01.1994	Northridge 1	6.7	Little Rock Brainard Can	46.9	090	0.072
4	17.01.1994	Northridge 1	6.7	Lake Hughes #9	28.9	090	0.217
5	18.10.1989	Loma Prieta	6.9	Monterey City hall	44.8	000	0.073
6	10.01.1987	Wittier Narrows	6	Mt Wilson CIT	21.2	000	0.158
7	12.09.1900	Lytle Creek	5.4	Cedar Springs, Allen Ranch	20.6 (Hypo)	095	0.071

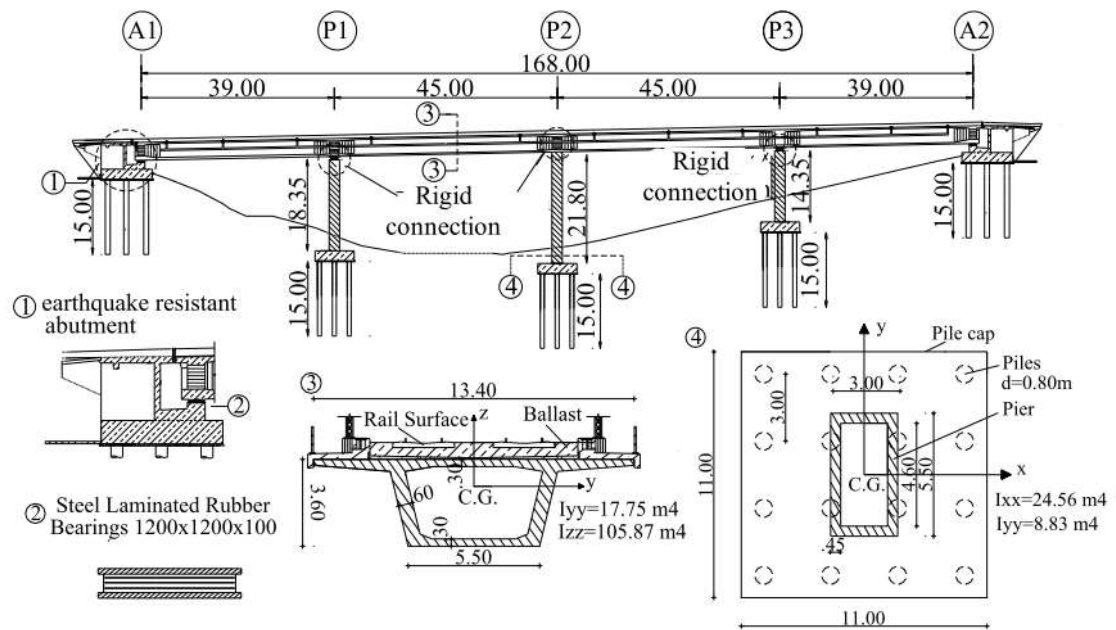


Figure 2. 34. Données géométrie du pont étudié. (1) les culées, (2) appareil d'appuis, (3) section transversale du tablier, (4) vue en plan des piles et leur fondation.

D'une manière générale, les résultats numériques montrent que l'effet de variabilité spatiale du mouvement sismique sur la réponse sismique du pont dépend de l'interaction entre les caractéristiques dynamiques de la structure, la variabilité des propriétés du sol de fondation et les propriétés des ondes. Il est démontré également que l'effet de l'input sismique différentiel est conditionné par l'interaction de ces paramètres.

- **Adanur et al. (2016)**

Les auteurs ont étudié l'influence des effets de la variabilité spatiale des mouvements du sol sur le comportement dynamique du pont suspendu Bosphorus. Ce pont est situé à Istanbul en Turquie et joint les continents européen et asiatique avec une longueur de 1560 m (Figure 2. 35) (Adanur et al. 2016).

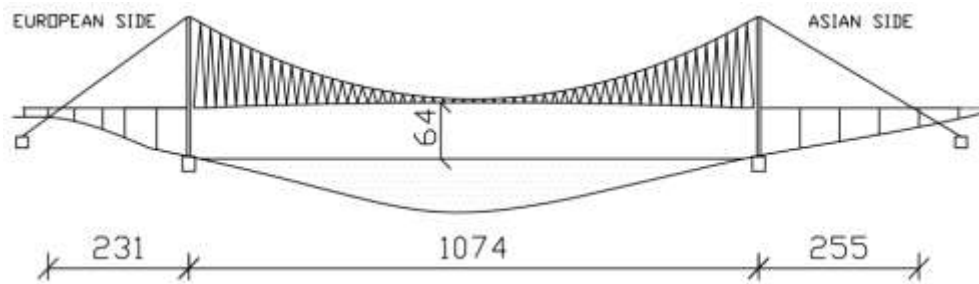


Figure 2. 35. Représentation schématique avec dimensions (dimensions en m).

Un modèle bidimensionnel du pont considéré est adopté en considérant un chargement spatialement variable dans la direction verticale et une configuration des conditions locale du site MMFF (Medium-Medium-Firm-Firm) au niveau des quatre appuis du pont Bosphore. Ce modèle numérique est illustré sur la figure 2. 36.

Ils ont utilisé une approche d'analyse spectrale et deux méthodes de spectre de réponse. La première méthode consiste en une approche d'analyse spectrale basée sur les vibrations aléatoires. Cette méthode s'appuie sur un modèle de mouvement sismique du bruit blanc filtré (FWN) et le considère comme un modèle de mouvement sismique d'un séisme.

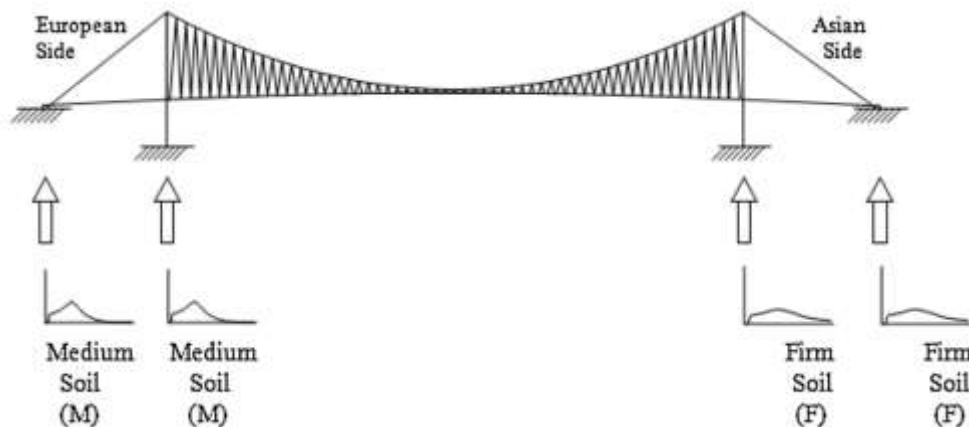


Figure 2. 36. Modèle bidimensionnel en MEF du pont suspendu de Bosphorus sous des mouvements sismiques spatialement variables dans la direction verticale pour le cas de conditions de site MMFF (Adanur et al. 2016).

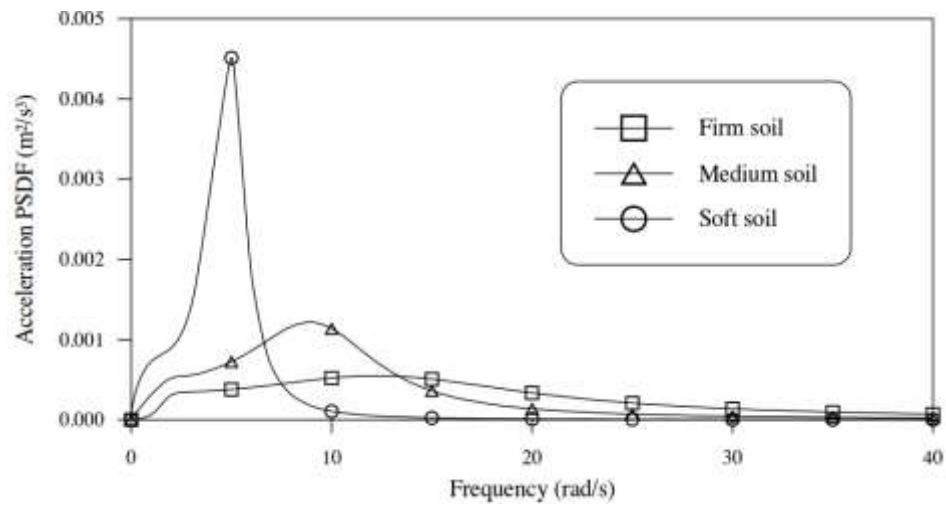


Figure 2. 37. Fonctions de densité spectrale de puissance du modèle du bruit blanc filtrée pour différents types de site.

La seconde méthode est une méthode de réponse spectrale basée sur la relation entre la fonction de densité spectrale de puissance et la réponse spectrale d'un input sismique. Cette méthode de réponse spectrale utilise la réponse spectrale en déplacement du séisme Kocaeli et la fonction de densité spectrale de puissance et le bruit blanc filtré des sites ferme et meuble (Figure 2. 37).

La fonction de densité spectrale de puissance et les valeurs du spectre de réponse ont été déterminés à partir des enregistrements du séisme de Kocaeli (Turquie) du 17 août 1999.

La troisième méthode consiste à utiliser la réponse spectrale en déplacement de deux composantes du séisme Kocaeli.

Les résultats obtenus montrent que l'analyse spectrale et la méthode du spectre de réponse basée sur la fonction de densité spectrale de puissance donnent des valeurs de réponse proches (Figure 2. 38). La méthode du spectre de réponse (troisième méthode) conduit à des réponses beaucoup plus importantes. A titre indicatif, les résultats des moments fléchissant au niveau du tablier sont illustrés sur la figure 2. 39.

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.

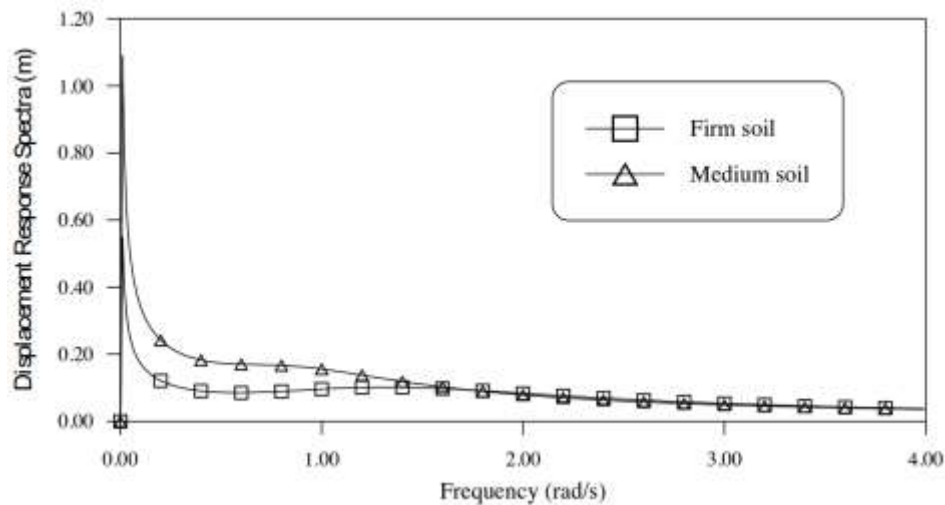


Figure 2. 38. Spectre de réponse en déplacement pour les des conditions de sites ferme et meuble.

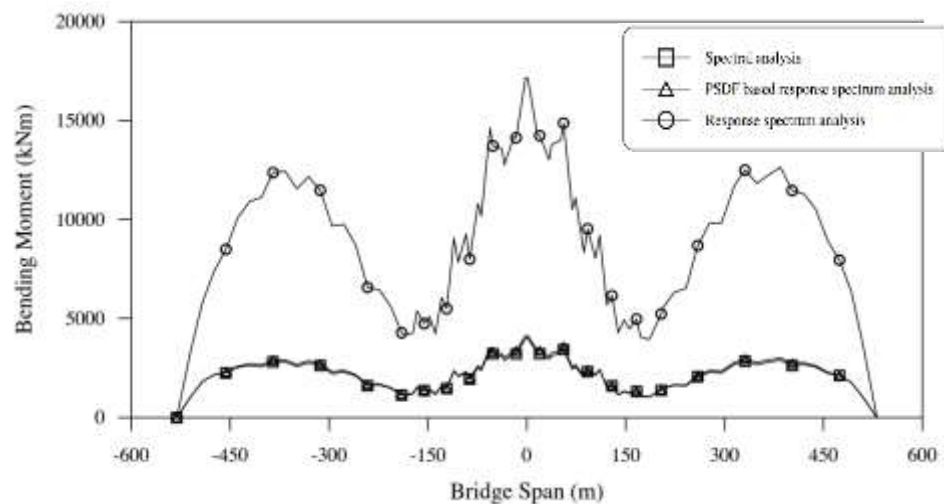


Figure 2. 39. Moments fléchissant maximaux au niveau du tablier.

- **Shiravand et Parvanehro (2019)**

Shiravand et Parvanehro (2019) ont réalisé une étude comparative des résultats des analyses dynamique d'un pont à haubans sous un chargement différentiel qui tient en compte l'effet de la variabilité spatiale du mouvement sismique et un chargement uniforme qui suppose que tous les supports du pont subissent la même excitation sismique. Le mouvement sismique en accélération simulé est compatible avec un spectre de réponse de conception réglementaire.

Tableau 2. 5. Cas de chargements différentiels (Shiravand and Parvanehro 2019).

Cas de chargement	Soil Type under each supports *	Wave Apparent Velocity (m/s)	SVEGM Sources	Bridge length (m)
1	1 1 1 1	2000	Wave passage, coherency	400, 800, 1200
2	1 2 2 1	1750	All sources	400, 800, 1200
3	1 3 3 1	1500	All sources	400, 800, 1200
4	1 4 4 1	1250	All sources	400, 800, 1200
5	2 1 1 2	1750	All sources	400, 800, 1200
6	2 2 2 2	1500	Wave passage, coherency	400, 800, 1200
7	2 3 3 2	1250	All sources	400, 800, 1200
8	2 4 4 2	1000	All sources	400, 800, 1200
9	3 1 1 3	1500	All sources	400, 800, 1200
10	3 2 2 3	1250	All sources	400, 800, 1200
11	3 3 3 3	1000	Wave passage, coherency	400, 800, 1200
12	3 4 4 3	750	All sources	400, 800, 1200
13	4 1 1 4	1250	All sources	400, 800, 1200
14	4 2 2 4	1000	All sources	400, 800, 1200
15	4 3 3 4	750	All sources	400, 800, 1200
16	4 4 4 4	500	Wave passage, coherency	400, 800, 1200

* Sites 1, 2, 3, 4 correspondent au sol rocheux, sol ferme, sol meuble et sol très meuble respectivement.

Le but principal de ce travail est de fournir une étude large pour comprendre les limitations des études similaires antérieures citées dans la littérature. Le comportement sismique du pont à haubans sous chargement sismique différentiel est étudié en s'appuyant sur la simulation de Monte Carlo. Pour cela, seize cas de chargement sismique ont été défini conformément à un spectre de réponse réglementé. En adoptant quatre types de site, le total de simulations s'élève à soixante-quatre (Tableau 2. 5). Il est à noter que vingt vecteur déplacements-temps ont été générés pour chaque cas de chargement sismique et trois cas de ponts à haubans ont été choisis avec des longueurs de 400, 800 et 1200 m (Figure 2. 40).

Au niveau de ce travail, les mouvements sismiques simulés présentent une excellente compatibilité avec le spectre de réponse réglementaire et cela a été observé pour l'ensemble des classes de sites (Figure 2. 41).

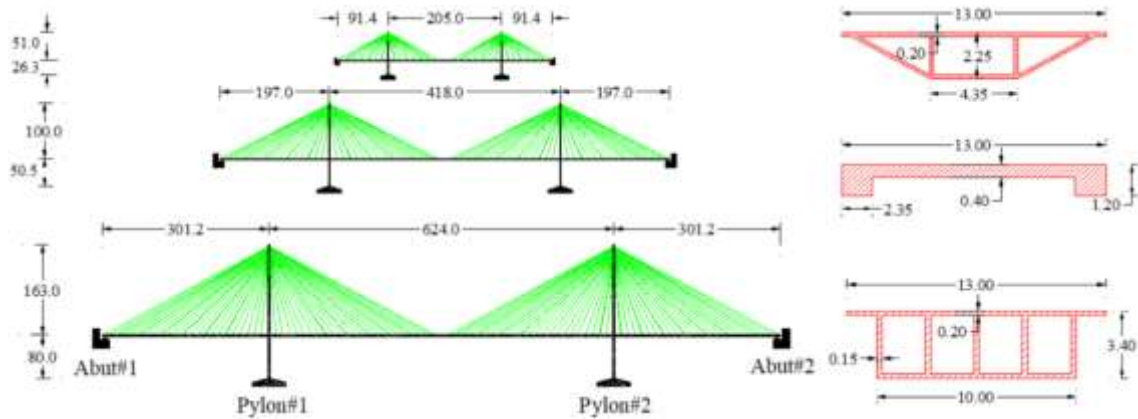


Figure 2. 40. Configuration géométrique des trois ponts à haubans (Shiravand et Parvanehro 2019).

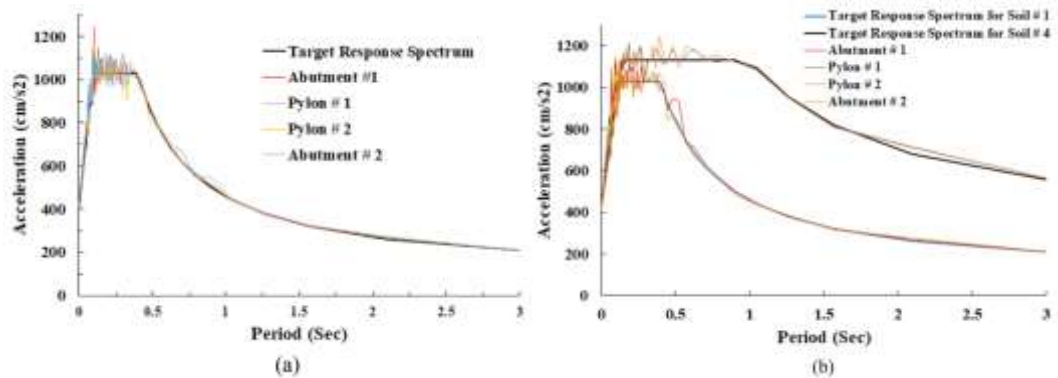


Figure 2. 41. Comparaison des spectres de réponse cible et ceux des accélérations générées : (a) pont de longueur 1200 m, cas 1111 ; (b) pont de longueur 1200 m, cas 1441.

Les résultats ont montré que la composante pseudo-statique augmente largement quand la longueur du pont augmente, spécialement dans les cas où les appuis du pont présentent des classes de site différents (Figure 2. 42). En effet, les ponts deviennent très vulnérables lorsque les caractéristiques du sol changent d'un appui à l'autre.

Les résultats ont conduit à une relation directe entre la longueur du pont et l'effort tranchant à la base. En effet, plus le pont est long, plus l'effort tranchant augmente considérablement.

Les auteurs ont conclu que parmi les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique, l'effet de site est le facteur le plus important qui amplifie de manière

significative la contribution de la composante pseudo-statique de la réponse dynamique d'un pont. En effet, la variabilité spatiale des conditions locales du site affecte d'une manière considérable la stabilité des ponts étudiés.

Ce travail a permis de conclure que plus le pont est long plus l'effort tranchant à la base des pylônes est amplifié. Alors que les effets de passage d'ondes et de l'incohérence ont un impact insignifiant sur la variation de l'effort tranchant à la base. Les résultats indiquent que, selon le type de sol, la réponse du pont peut varier considérablement.

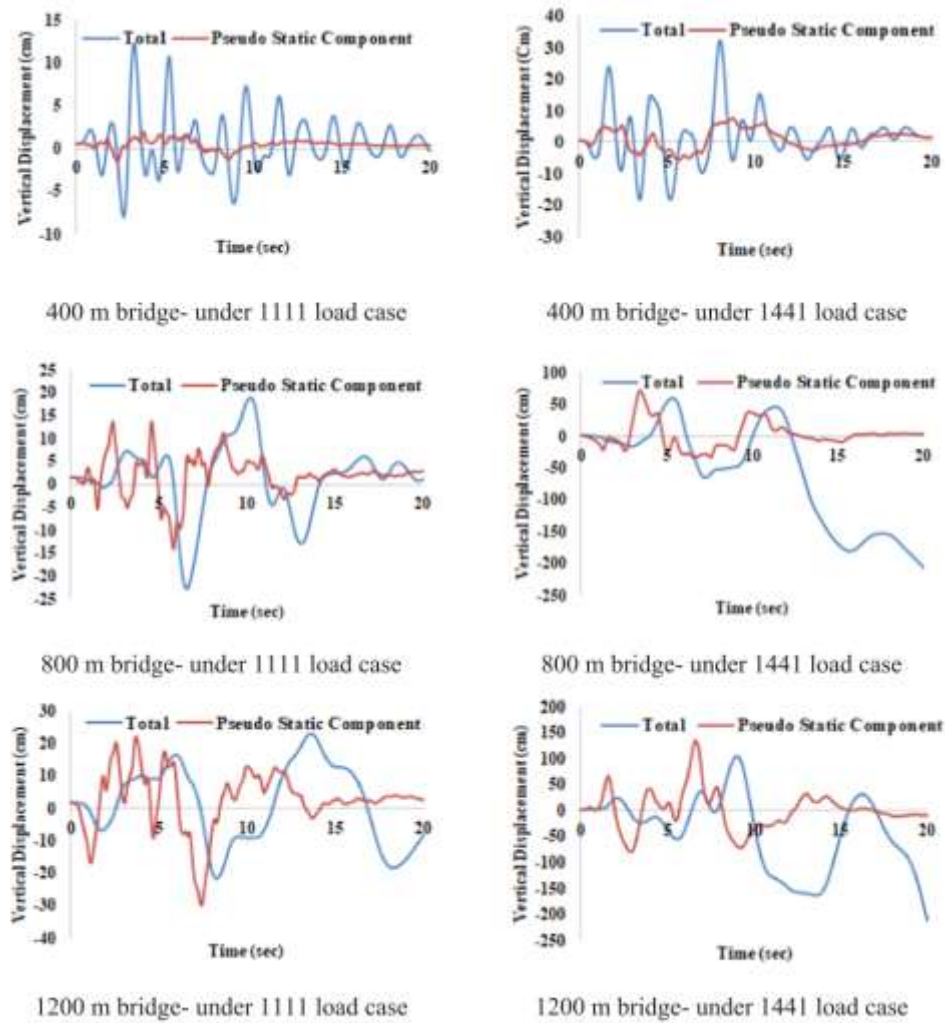


Fig. 11. Vertical displacement of mid of main span.

Figure 2. 42. Déplacement vertical maximum de la travée centrale.

3. Conclusion

Une synthèse des travaux antérieurs sur la réponse des structures étendues soumises aux sollicitations sismiques en incorporant l'effet de variabilité spatiale du mouvement sismique est présenté. On s'est limité à présenter les études qui ont pris en considération l'effet de site dans la représentation des mouvements sismiques spatialement variables.

Ces études ont démontré que l'effet de site seul peut conduire à des chargements sismiques considérables. A cet effet, le fait de négliger les conditions locales du site dans la représentation du chargement sismique différentiel donne lieu à une sous-estimation de l'input sismique.

Nombreux ceux qui insistent sur le fait que l'effet de site doit être pris en considération pour caractériser la variabilité spatiale des mouvements sismiques et cela malgré la complexité du travail qui doit être mené pour aboutir à caractériser cet effet.

En réalité, les résultats de travaux réalisés sur l'effet de site nous enseignent sur la particularité de chaque cas de conditions locales de site. Cependant, introduire l'effet de site dans la caractérisation d'un mouvement sismique spatialement variable conduit à calculer la réponse d'un site donné. Le comportement des sites dépend de plusieurs paramètres qui peuvent déterminer leurs réponses. En premier lieu, la nature et la composition du site vis-à-vis de sa densité, de l'épaisseur de la couche ou les couches qui le forment et la profondeur du substratum rocheux. En second lieu, l'excitation sismique, tellement imprévisible, caractérisée par un PGA, un PGD et un contenu fréquentiel où une coïncidence de la fréquence fondamentale du site avec celle de l'excitation sismique peut conduire à une résonance. Cette dernière donne naissance à une amplification des mouvements sismiques.

Notons que les codes parasismiques regroupent la nature des sites en plusieurs classes en fonction de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement V_s . En effet, plus V_s est élevée plus le site est compact ou rigide et plus V_s est petite plus le site est meuble ou très meuble. Ces codes parasismiques nous obligent à se cadrer dans cette classification de sites et parfois, avec un choix approximatif favorisant le cas le plus défavorable. Par conséquent, la détermination de la réponse de sites se fait de cas en cas. Malgré que cela peut entraîner un coût supplémentaire, des fois très considérable, en termes de temps et d'effort de calcul. Ainsi, on peut conclure qu'à ce stade, penser à une démarche simplifiée

pour prendre en compte l'effet de site dans la représentation des mouvements sismiques spatialement variables est loin d'être concrétisé.

En outre, nous concluons que l'approche la plus réaliste dans la simulation des mouvements sismiques spatialement variables est celle qui modélise cette variabilité en la caractérisant par l'effet d'incohérence, passage d'ondes et surtout l'effet de site où l'ouvrage est implanté. Il a été démontré que ces effets sont indépendants, néanmoins omettre un effet aura des conséquences néfastes sur la représentation des chargements différentiels et conduira par conséquent à une conception parasismique erronée.

A cet égard, cette approche sera adoptée pour mener ce travail de recherche, en mettant l'accent sur les conditions locales du site (effet de site).

Chapitre 3.

Analyse de la réponse sismique des sites

1. Introduction

Malgré le progrès croissant des connaissances scientifiques en matière de compréhension et de prévention, les séismes restent toujours catastrophiques, non seulement en termes de vies humaines mais aussi de coût économique. Le séisme de Mexico (1985) en est un exemple parfait. Le 19 septembre 1985, un terrible tremblement de terre de magnitude de 8.2 a frappé principalement les états de Guerrero, de Michoacán, le sud de l'état de Jalisco ainsi que le district fédéral de Mexico.

L'épicentre de ce séisme est localisé au large de la côte pacifique du Mexique. Un bilan total de dégâts humains d'environ 10 000 morts et 50 000 blessés a été enregistré. Tandis que les dégâts matériels s'élèvent à environ 420 bâtiments complètement détruits et 3150 autres sérieusement endommagés. En effet, l'évaluation de l'ampleur des pertes humaines et des dégâts matériels sur l'ensemble de la zone touchée a été difficile dans la mesure où la capitale Mexico est située à presque 400 km de l'épicentre.

Il a été reconnu que trois principaux facteurs ont contribué à l'ampleur monstrueuses de ces dégâts (Bard et al. 1988; Kham 2004):

- La présence d'un remplissage sédimentaire qui s'étale sur tout le sous-sol de la ville de Mexico. La plus grande profondeur de ce bassin sédimentaire correspond à l'emplacement de la vieille ville où les dégâts les plus importantes ont été enregistrés.
- Le phénomène de résonance provoqué par la proximité des fréquences propres des bâtiments situés sur la vieille ville et les fréquences naturelles du sol. Les bâtiments les plus touchés sont ceux qui ont 10 à 20 étages.
- Les courtes périodes du mouvement sismique ont été amorties à cause de la distance épacentrale très importante de ce séisme. Tandis que les longues périodes, particulièrement celles autour de 2 secondes, préservaient leur intensité pour exciter à la fois le sol et les bâtiments.

Cet exemple a révélé à toute la communauté scientifique l'ampleur des dégâts qui peuvent être causé par l'effet de site (Bard et al. 1988; Kham 2004).

2. Caractérisation de l'effet de site sismique

Au cours de trajet du foyer du séisme à la surface, les ondes sismiques traversent des milieux géologiques aux propriétés mécaniques variées (densité, vitesse de propagation des ondes sismiques, ...etc.), ce qui va perturber leur propagation et accroître la complexité du signal sismique.

Les couches les plus superficielles sont en particulier plus meubles (la vitesse des ondes y est plus faible), ce qui modifie notablement leurs caractéristiques et leur comportement mécanique. L'effet de site est le terme utilisé pour décrire la modification de la secousse sismique induite par la géologie locale (Figure 3.1).

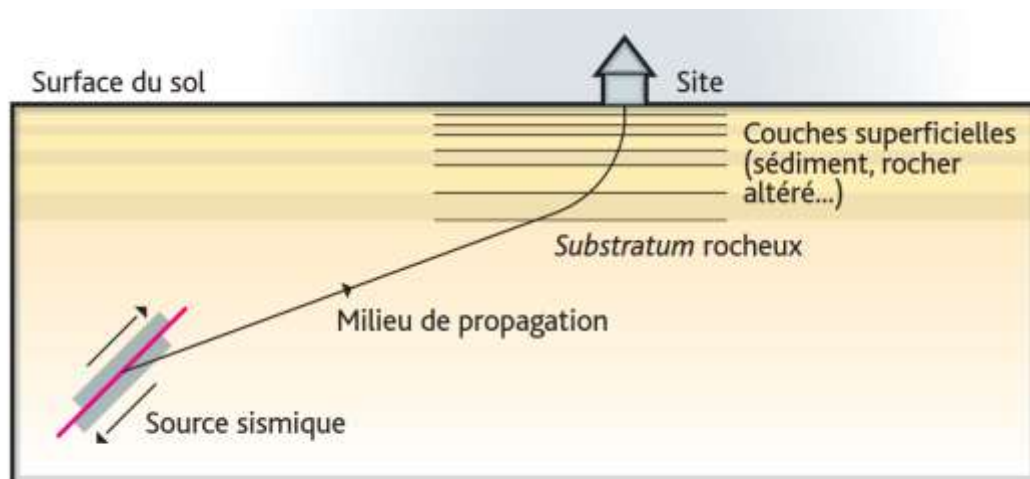


Figure 3. 1. Phénomènes d'amplification et d'atténuation causés par les effets de site (Bonilla et al. 2008).

2.1. Origine des effets de site

Lors d'un séisme, des vibrations associées aux ondes émises par le glissement soudain au niveau de la faille se naissent. Ces vibrations peuvent être caractérisées par leur fréquence, et leur amplitude ; les ondes qui les propagent sont caractérisées par leur type (compression ou cisaillement), et leur vitesse de propagation. Cette dernière, relativement stable en profondeur dans la croûte terrestre, devient très fortement variable à proximité immédiate de la surface, car elle est en relation directe avec la compacité des sols et roches. Ainsi, la vitesse des ondes de cisaillement varie de 3 km/s dans du granite sain, à moins de 500 m/s dans le même granite mais cette fois fortement altéré, et de près de

1000 m/s dans des sédiments très compactés, à moins de 50 m/s dans des vases et tourbes. Dès lors, la propagation de ces ondes est très fortement affectée par ces hétérogénéités de surface, et il en va de même pour la répartition spatiale de l'amplitude des vibrations sismiques associées. Cette variabilité spatiale liée à la géologie de surface est classiquement appelée "effets de site".

En effet, l'origine des effets de site est liée à la géologie locale qui produit une modification du mouvement sismique. Actuellement, l'un des objectifs les plus importants du génie parasismique est l'étude de ces effets de site. L'analyse des enregistrements sismiques a mis en évidence le fait que le mouvement sismique est fortement influencé par la géologie locale des sites induisant des variations spatiales des mouvements sismiques. Il s'est avéré que les pertes humaines et les dégâts matériels provoqués par les séismes sont fréquemment le résultat direct des effets de site locaux. Par conséquent, il est impératif que le zonage sismique élaboré dans les codes parasismiques, prenne en considération les effets de site de manière approfondie (Bonilla et al. 2008).

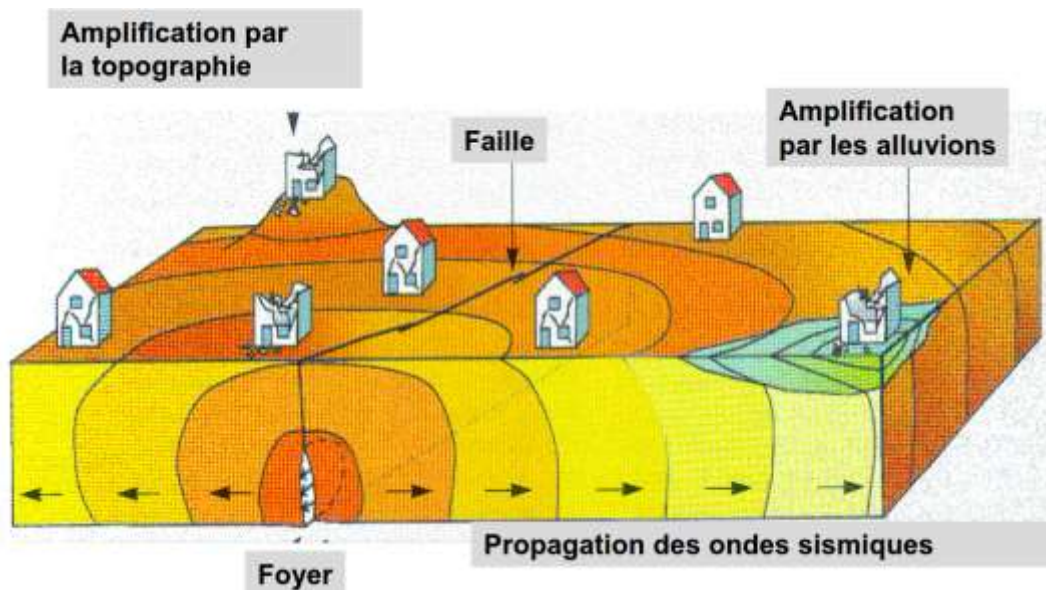


Figure 3. 2. Type des effets de site.

2.2. Type des effets de site

Les effets de site se traduisent ainsi par une augmentation ou une diminution des mouvements du sol en réponse à une sollicitation sismique ainsi qu'à une prolongation

de la durée de vibration du sol lors des séismes. On distingue deux types d'effets de site. Ces derniers sont illustrés sur la figure 3.2.

2.2.1. Les effets de site topographiques

Ils se produisent quand les ondes sismiques se réfractent sur les limites d'un terrain de topographie irrégulière et relativement élevée. Par exemple, lors d'un même évènement, une amplification des ondes peut être notée au niveau d'une crête et pas au niveau d'une vallée se trouvant à proximité. Pour une longueur d'onde similaire à la largeur des crêtes, la composante horizontale des ondes de Rayleigh est amplifiée au niveau de la crête alors que la composante verticale est réduite par rapport à une surface libre sans topographie.

2.2.2. Les effets de site lithologiques

Ils sont la conséquence du passage des ondes dans des sols sédimentaires. Une fois les ondes arrivées dans une couche de remplissage sédimentaire se trouvant au-dessus d'une couche de terrain plus compact, elles se retrouvent piégées. A cause de la différence de rigidité entre les milieux, les ondes se réfléchissent sur le substratum induisant ainsi une amplification des mouvements sismiques et une vibration du sol plus longue du fait de la réverbération des ondes dans la couche de sédiments.

La figure 3.3 illustre le séisme de Mexico (1985), la ville construite sur un bassin sédimentaire a enregistré des accélérations du sol, supérieures à la zone épiscopale pourtant à 400 km de distance. A Mexico, les accélérations enregistrées sont de l'ordre de 4 à 5 fois supérieures qu'aux abords du bassin (Figure 3. 4).

Un autre exemple de l'effet de site est illustré sur la figure 3. 5. Les enregistrements montrent que l'amplitude et la durée des sismogrammes sont plus élevées dans les sédiments que sur le rocher.

Les effets de site se traduisent fréquemment par une augmentation de l'amplitude des enregistrements de la secousse sismique et de sa durée. Ce phénomène peut être illustré en comparant les secousses sismiques enregistrées sur un rocher et sur un dépôt d'alluvions à proximité (Figure 3. 5).

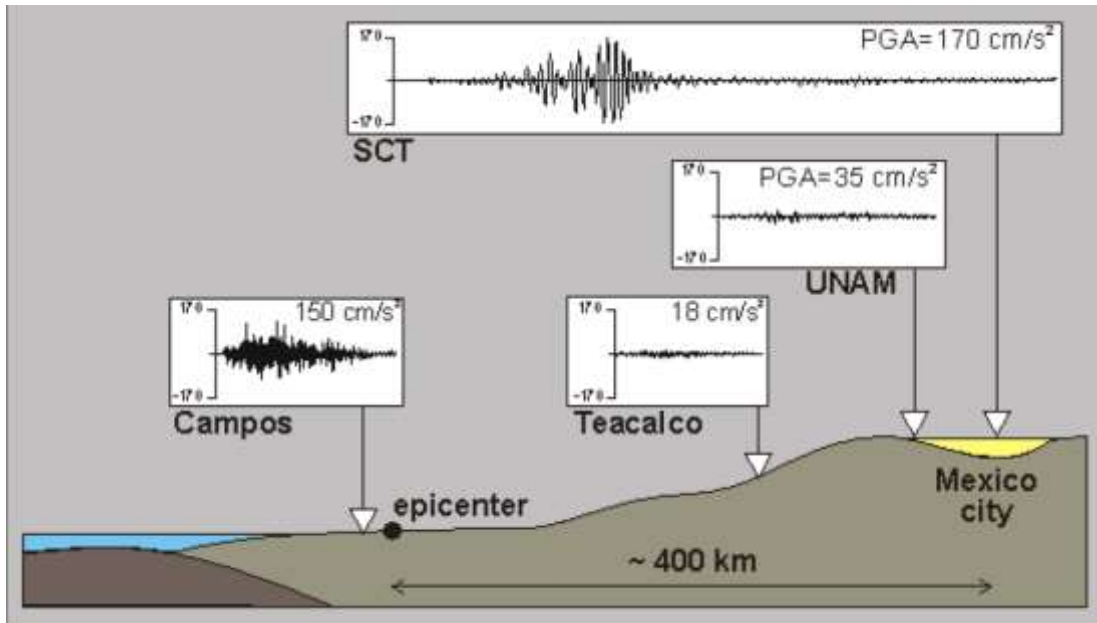


Figure 3. 3. Effets de site lithologique à Mexico : enregistrements réalisés lors du séisme de Mexico 1985 (Wikipédia, ajoutée par Semblat en 2014).

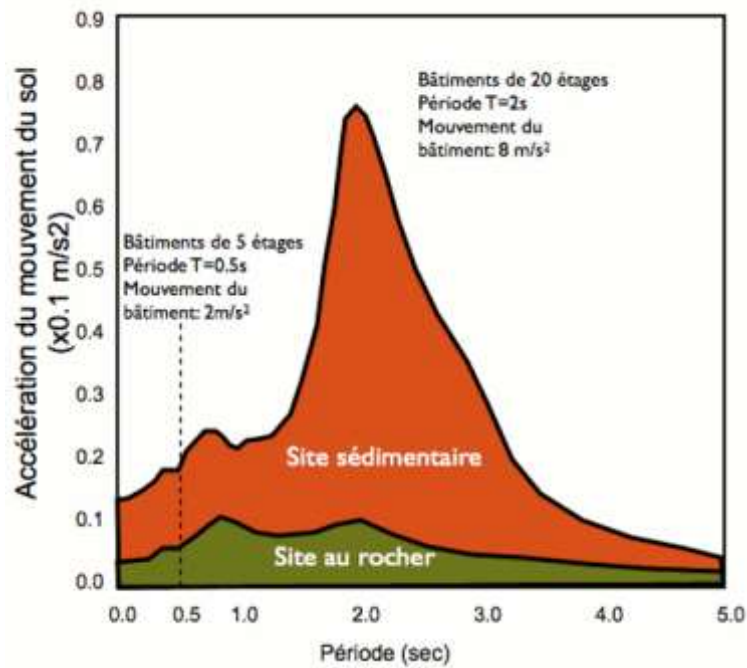


Figure 3. 4. Amplification du mouvement du sol lors du séisme de Mexico 1985 (Guéguen 2009).

Les effets de site liés aux remplissages sédimentaires sont bien connus des sismologues sous le nom d'effets de bassin. L'amplification du mouvement sismique induite par ces effets de bassin est contrôlée par sa géométrie particulière favorisant plus ou moins la focalisation des ondes sismiques, par le contraste de rigidité entre les sédiments du bassin et les roches du substratum et par l'amortissement intrinsèque du sol.

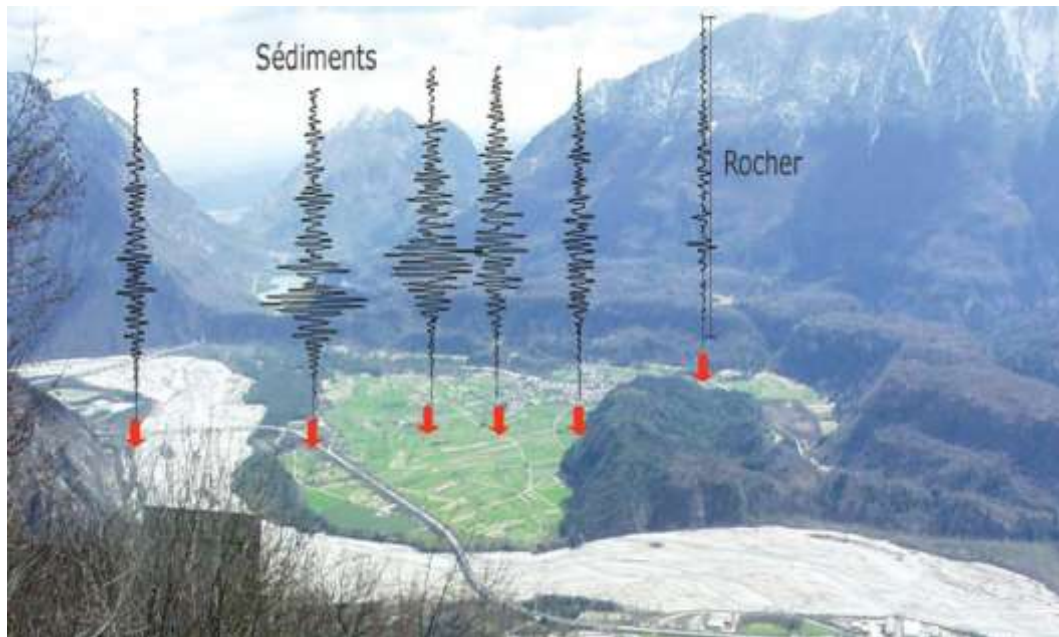


Figure 3. 5. Effet de site dans la vallée de Tagliamento (Italie) (Bard 2002).

L'importance de ces effets de site sur l'aggravation du risque sismique conduit au développement de méthodes destinés à les mesurer et de modèles destinés à les caractériser. L'attention grandissante de la communauté scientifique pour cette problématique a donné le jour au projet EUROSEISTEST en 1993. Un site test européen est choisi à Volvi (Grèce) et vise à offrir aux scientifiques du monde, une base de données sismologiques complète et unique en termes de données géotechniques sur le sous-sol et enregistrements d'événements sismiques, non seulement pour une meilleure compréhension des effets de site mais pour la recherche parasismique en général.

3. Modélisation de la réponse sismique des sols

L'analyse des effets de site passe obligatoirement par la modélisation de la structure du sol, souvent on parle de remplissages sédimentaires. Cela est nécessaire afin d'étudier les

phénomènes prépondérants. Cette modélisation est souvent réalisée de manière analytique ou semi-analytique.

Pour des configurations de sol de fondation plus complexes ou des lois de comportement plus élaborées, l'utilisation de modèles numériques est plus que nécessaire. Ces derniers sont des représentations plus ou moins simplifiées des milieux étudiés. Ainsi, ces simplifications peuvent limiter le domaine de validité de la méthode utilisée. Les modèles sont regroupés ici en trois catégories, selon l'ordre croissant de la dimension du problème rencontré.

Le principal inconvénient de ces méthodes de modélisation est le degré de connaissance du sol exigée au préalable. Cette connaissance du sol implique des campagnes de reconnaissance et d'investigations géophysiques et géotechniques du sous-sol dont le coût peut être assez élevé. Toutefois, l'évolution des normes de sécurité pour les constructions civiles demande également des analyses de risque de plus en plus précises.

3.1. Modèles unidimensionnels

Les modèles unidimensionnels se basent sur la considération d'une représentation stratigraphique du sous-sol (Figure 3. 6). De par leur simplicité de mise en œuvre et d'application, ils sont fréquemment utilisés en génie parasismique.

Ces modèles unidimensionnels ont été adoptés par plusieurs logiciels tels que SHAKE, DEEPSOIL, Cyberquake...etc. où des lois de comportement linéaires équivalents ou non-linéaires peuvent être intégrées. L'allure de l'amplification des sites en fonction de leurs propriétés est illustrée sur la figure 3. 7. Au niveau des règlements parasismiques, l'impact de variation en profondeur des sites sur le mouvement sismique en surface est évalué à travers l'analyse unidimensionnelle.

Cependant, ce modèle unidimensionnel qui se traduit par une approximation de la composition réelle du sol présente des limites quand l'influence des hétérogénéités latérales sur la réponse sismique n'est plus négligeable. A cet effet, ce modèle n'est valable qu'à l'échelle très locale d'un bâtiment isolé ou dans le cas des vallées alluvionnaires peu encaissées (Semblat et al. 2000; Kham 2004).

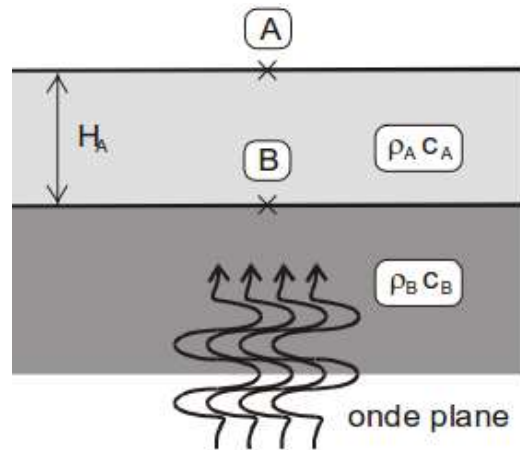


Figure 3. 6. Modèle simplifié de sol tubulaire (Kham 2004).

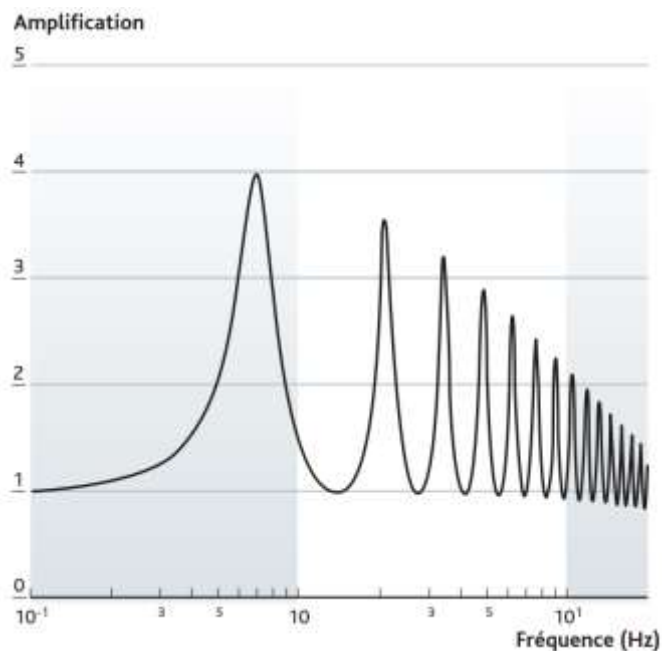


Figure 3. 7. Amplification en fonction de la fréquence pour un modèle unidimensionnel d'une couche de sol sur un demi-espace (Bonilla et al. 2008).

Par un souci de complexité, nous allons présenter, dans la section suivante, la réponse sismique d'un site modélisé par un sol monocouche. Dans le cas où un site est caractérisé par un sol multicouches, la méthodologie présentée dans le cas d'un sol monocouche peut être étendue directement en se basant de la théorie de la propagation des ondes sismiques (Wolf 1985).

3.1.1. Réponse sismique d'un sol monocouche

Sous chargement sismique, la réponse d'un site donné peut être aléatoire et complexe. Souvent la composition du site où la structure est implantée peut-être approchée sur la base des hypothèses. En effet, le sous-sol est souvent considéré comme étant une seule couche homogène reposant sur le substratum rocheux. Cette hypothèse a été considérée au niveau de plusieurs travaux dans la littérature. Au niveau de plusieurs codes parasismiques, le site de fondation est approché par un site se composant d'une seule couche avec des paramètres prédéfinis. En effet, les classifications sont basées principalement sur la vitesse de propagation des ondes de cisaillement. A titre d'exemple, nous exposons ici, les classifications données par le RPOA (Règles Parasismiques applicables au domaine des Ouvrages d'Art) (MTP 2010) l'Eurocode 8 (CEN 2005) et FEMA (P-749 2010). Une autre classification fréquemment utilisée dans la littérature est aussi présentée dans l'annexe B.

Adoptant l'hypothèse que le substratum rocheux est considéré comme étant un demi-espace élastique homogène. Les ondes sismiques se propagent du substratum rocheux à la surface traversant la couche homogène de sol. Dans ce qui suit, la propagation des ondes SH et la combinaison des ondes SV et les ondes P est présentée (Wolf 1985).

3.1.2. Propagation des ondes SH

Considérant un sol se composant d'une seule couche homogène avec une épaisseur d reposant sur un substratum rocheux considéré comme un demi-espace. Cette représentation est donnée par la figure 3. 8 (Wolf 1985).

Notons que l'exposant R et L correspondent au substratum rocheux et à la couche de sous-sol, respectivement. Le cosinus directeur m_x^R au substratum rocheux est donné, en fonction de l'angle incident des ondes SH ψ_{SH}^R , par :

$$m_x^R = \cos \psi_{SH}^R \quad (3. 1)$$

Ainsi, la vitesse de phase des ondes SH notée V est donnée par la formule suivante :

$$V = \frac{V_s^{*R}}{m_x^R} \quad (3. 2)$$

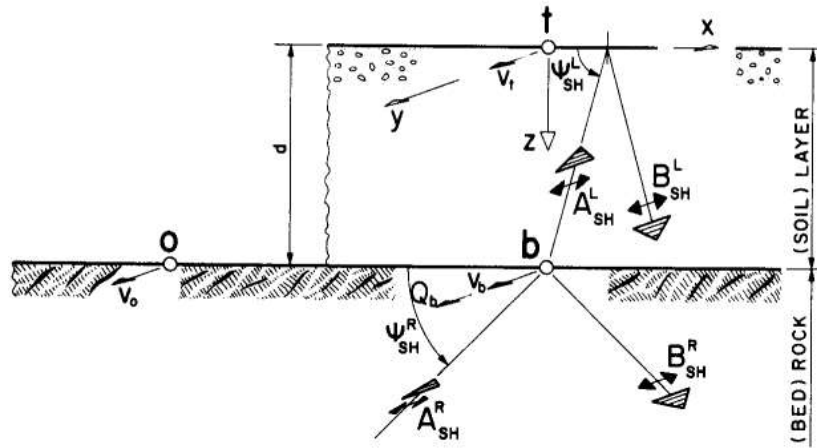


Figure 3. 8. Représentation schématique d'un sol monocouche sur un substratum rocheux (Wolf 1985).

Alors l'équation (3. 2) devient :

$$m_x^L = \frac{V_s^{*L}}{V} = \frac{V_s^{*L}}{V_s^{*R}} m_x^R \tag{3. 3}$$

Avec :

$$V_s^* = V_s \sqrt{1 + 2\zeta_s i} \tag{3. 4}$$

Nous admettons les relations suivantes :

$$t^R = -i \sqrt{1 - \frac{1}{(m_x^R)^2}} ; t^L = -i \sqrt{1 - \frac{1}{(m_x^L)^2}} \tag{3. 5 a, b}$$

L'expression de t^R peut être donnée par :

$$t^R = \tan \psi_{SH}^R \tag{3. 6}$$

Ainsi, les équations d'équilibre dynamique du site sont obtenues en assemblant les matrices de rigidité dynamique de la couche du sous-sol et ceux du substratum rocheux modélisé en un demi-espace. Ces équations ont la forme suivante (Wolf 1985) :

$$\frac{kt^L G^{*L}}{\sin kt^L d} \begin{bmatrix} \cos kt^L d & -1 \\ -1 & \cos kt^L d + ip \sin kt^L d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_t \\ v_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ Q_b \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

Avec :

$$G^* = G (1 + 2\zeta_s i) \quad (3.8)$$

G est le module de cisaillement du sous-sol et ζ_s est l'amortissement correspondant.

Le nombre d'ondes k est donné en fonction de la fréquence angulaire ω par :

$$k = \frac{\omega}{v} \quad (3.9)$$

Le facteur d'impédance est défini comme suit :

$$p = \frac{kt^R G^{*R}}{kt^L G^{*L}} \quad (3.10)$$

Ce même facteur peut être exprimé sous une autre forme :

$$p = \frac{\sqrt{1-(m_x^R)^2} \sqrt{G^{*R} \rho^R}}{\sqrt{1-(m_x^L)^2} \sqrt{G^{*L} \rho^L}} \quad (3.11)$$

A partir de l'équation (4.6), le rapport des déplacements v_b et v_t est obtenu par la relation suivante :

$$\frac{v_b}{v_t} = \cos kt^L d \quad (3.12)$$

Notons que pour un nombre d'ondes k donné, le rapport des déplacements v_b/v_t dépend uniquement des propriétés de la couche du sous-sol.

Pour le cas particulier où l'amortissement est négligé ($\zeta^L = 0$), ce rapport de déplacement est nul pour :

$$kt^L d = (2j - 1)\pi/2 ; j = 1, 2, \dots \quad (3.13)$$

Ce qui donne :

$$\omega_f = \frac{2j-1}{2} \pi \frac{v_s^L}{d \sin \psi_{SH}^L} \quad (3.14)$$

Pour un amortissement minime de valeur ζ^L , le rapport des déplacements $|v_t|/|v_b|$ calculé à la fréquence angulaire ω_f est donné par :

$$\left(\frac{|v_t|}{|v_b|}\right)_{max} = \frac{2}{(2j-1)\pi \zeta^L} \quad (3.15)$$

Dans ce cas d'ondes, le rapport du déplacement de la face supérieure de la couche du sous-sol v_t et le déplacement v_0 d'un mouvement d'affleurement de roche (Figure 3. 9) est donné par l'équation suivante :

$$\frac{v_t}{v_0} = \frac{1}{\cos kt^L d + \frac{i}{p} \sin kt^L d} \quad (3.16)$$

De la même manière, le rapport du déplacement de la face inférieure de la couche du sous-sol v_b et le déplacement v_0 d'un mouvement d'affleurement de roche peut être calculé en adoptant l'équation suivante :

$$\frac{v_b}{v_0} = \frac{1}{\cos kt^L d + \frac{i}{p} \tan kt^L d} \quad (3.17)$$

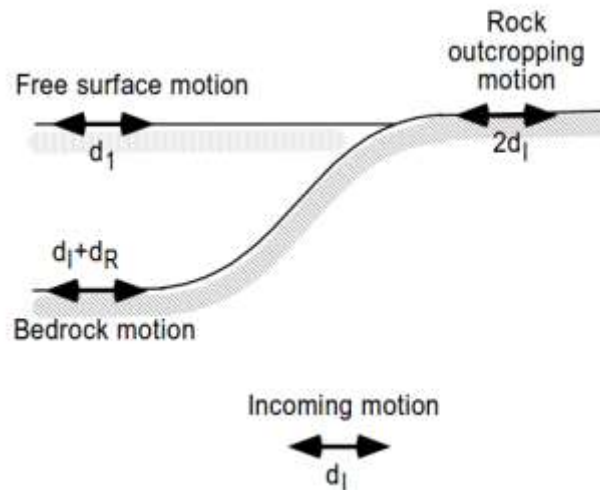


Figure 3. 9. Terminologie utilisée dans l'analyse de la réponse de sites et amplitudes des ondes de cisaillement à plusieurs endroits (Wolf 1985).

Pour le cas particulier où l'amortissement est négligé, le rapport de déplacements $|v_t|/|v_0|$ devient comme suit :

$$\frac{|v_t|}{|v_0|} = \frac{1}{\sqrt{\cos(kt^L d)^2 + \frac{\sin(kt^L d)^2}{p^2}}} \quad (3.18)$$

De la même manière, pour un amortissement minime de valeur ζ^L , le rapport des déplacements $|v_t|/|v_b|$ calculé à la fréquence angulaire ω_f est donné par :

$$\left(\frac{|v_t|}{|v_0|}\right)_{max} = \frac{1}{\frac{1}{p} + \frac{(2j-1)\pi\zeta^L}{2}} \quad (3.19)$$

3.1.3. La combinaison des ondes P et SV

Dans cette partie, la propagation des ondes dans le plan est traitée. ψ_{SV}^R est l'angle incident des ondes SV (Figure 3. 10). En fonction de ψ_{SV}^R , on donne le cosinus directeur m_x^R au substratum rocheux par la relation suivante (Wolf 1985) :

$$m_x^R = \cos \psi_{SV}^R \quad (3.20)$$

La vitesse de phase des ondes SV notée V est donnée par la formule suivante :

$$V = \frac{V_s^{*R}}{m_x^R} \quad (3.21)$$

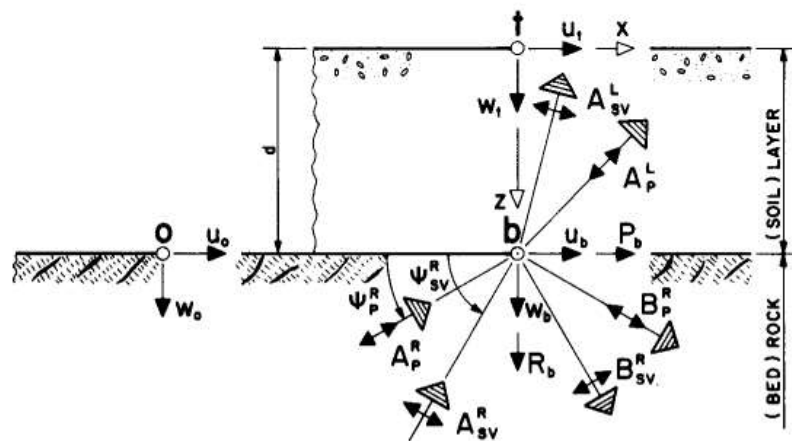


Figure 3. 10. Nomenclature dans le cas d'un mouvement dans le plan pour un sol monocouche reposant sur le substratum rocheux (Wolf 1985).

Dans ce cas de combinaison des ondes P et SV , cette équation peut être écrite comme suit :

$$V = \frac{V_P^{*L}}{l_x^L} = \frac{V_S^{*L}}{m_x^L} = \frac{V_P^{*R}}{l_x^R} \quad (3.22)$$

Avec :

$$V_p^* = V_p \sqrt{1 + 2\zeta_p i} \quad (3.23)$$

Les équations d'équilibre dynamique du site sont obtenues en assemblant les matrices de rigidité dynamique de la couche du sous-sol et ceux du substratum rocheux modélisé en un demi-espace. Ces équations ont la forme suivante :

$$[S_{P-SV}] \begin{Bmatrix} u_t \\ iw_t \\ u_b \\ iw_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_b \\ iR_b \end{Bmatrix} \quad (3.24)$$

Avec :

$$\begin{Bmatrix} u_t \\ iw_t \\ u_b \\ iw_b \end{Bmatrix} \text{ est le vecteur des déplacements. et } \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_b \\ iR_b \end{Bmatrix} \text{ est le vecteur des charges}$$

extérieures.

$[S_{P-SV}]$ est la combinaison de la matrice de rigidité de la couche du sous-sol $[S_{P-SV}^L]$ et celle du substratum rocheux $[S_{P-SV}^R]$ qui sont exprimées comme suit :

$$[S_{P-SV}^L] = \frac{(1+t^2)kG^*}{D} \begin{bmatrix} \frac{1}{t} \cos ksd \sin ktd + & \frac{3-t^2}{1+t^2} (1 - \cos ksd \cos ktd) + & -s \sin ksd - & \cos ksd - \\ s \sin ksd \cos ktd & \frac{1+2s^2t^2-t^2}{st(1+t^2)} \sin ksd \sin ktd & \frac{1}{t} \sin ktd & \cos ktd \\ \frac{3-t^2}{1+t^2} (1 - \cos ksd \cos ktd) + & \frac{1}{s} \sin ksd \cos ktd + & -\cos ksd + & \frac{1}{s} \sin ksd - \\ \frac{1+2s^2t^2-t^2}{st(1+t^2)} \sin ksd \sin ktd & 1 + \cos ksd \sin ktd & \cos ktd & -t \sin ktd \\ -s \sin ksd - & -\cos ksd + & \frac{1}{t} \cos ksd \sin ktd + & \frac{t^2-3}{1+t^2} (1 - \cos ksd \cos ktd) + \\ \frac{1}{t} \sin ktd & \cos ktd & s \sin ksd \cos ktd & \frac{1+2s^2t^2-t^2}{st(1+t^2)} \sin ksd \sin ktd \\ \cos ksd - & -\frac{1}{s} \sin ksd & \frac{t^2-3}{1+t^2} (1 - \cos ksd \cos ktd) + & \frac{1}{s} \sin ksd \cos ktd + \\ \cos ktd & -t \sin ktd & \frac{1+2s^2t^2-t^2}{st(1+t^2)} \sin ksd \sin ktd & t \cos ksd \sin ktd \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$[S_{P-SV}^R] = kG^* \begin{bmatrix} \frac{is(1+t^2)}{1+st} & 2 - \frac{1+t^2}{1+s^2} \\ 2 - \frac{1+t^2}{1+s^2} & \frac{it(1+t^2)}{1+st} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Où :

$$s = -i \sqrt{1 - \frac{1}{l_x^2}} ; \quad t = -i \sqrt{1 - \frac{1}{m_x^2}} \quad (3.27 \text{ a, b})$$

Dans le cas d'un mouvement d'affleurement de la roche, ce même rapport du déplacement de la face inférieure de la couche du sous-sol v_b et le déplacement v_0 peut être calculer en adoptant l'équation suivante (Wolf 1985) :

$$\begin{Bmatrix} P_b \\ iR_b \end{Bmatrix} = [S_{P-SV}^R] \begin{Bmatrix} u_0 \\ iw_0 \end{Bmatrix} \quad (3.28)$$

3.2. Analyse unidimensionnelle linéaire équivalente

Il est reconnu que le sol a un comportement non linéaire même à de faibles niveaux de sollicitations. Cela implique une diminution de la rigidité dynamique et une augmentation de l'amortissement matériel. Une relation entre les caractéristiques du matériau et le niveau de déformation est utilisée pour l'analyse de la réponse sismique du sol (Bouafia 2010).

Le comportement non linéaire du sol est pris en considération en adoptant un calcul linéaire équivalent ou un calcul non linéaire.

Cependant, un calcul linéaire équivalent se traduit par un calcul linéaire où les caractéristiques dynamiques dépendent du niveau de déformation induite. Un processus itératif de calculs linéaires est mis en place pour aboutir à la convergence des déformations.

L'analyse linéaire équivalente présente un inconvénient majeur, celui où la sollicitation sismique dépasse en termes d'accélération la valeur de 0.4 g, ou des déformations de distorsion de l'ordre de 2%, les résultats ne sont plus représentatifs (Bouafia 2010).

3.3. Analyse unidimensionnelle non linéaire

Sous des sollicitations sismiques, le comportement réel du sol doit être caractérisé par un modèle non linéaire. Lors d'un chargement cyclique, ce modèle définit l'évolution de la boucle hystérétique cyclique. Tandis que le modèle linéaire équivalent approche seulement la rigidité et l'amortissement.

Le recours à une analyse non linéaire est caractérisé par certaines considérations particulières ; à savoir, l'importance du projet, la prise en compte de conditions aux limites irrégulières, présence d'un remblai sur sol nécessitant une étude plus poussée ou bien la nécessité de résultats plus précis que ceux donnés par l'analyse linéaire équivalente (Bouafia 2010).

3.4. Modèles bidimensionnels

Pour des configurations relativement complexes du sol tel que les bassins sédimentaires, les modèles bidimensionnels sont favorisés et aboutissent à une réponse sismique plus représentative.

Différentes méthodes existent afin de mener une analyse bidimensionnelle, nous allons citer les plus importantes (Kham 2004):

- **La méthode des éléments finis ou différences finis**

La discrétisation du milieu étudié est réalisée, ainsi, les résultats sont calculés aux différents nœuds de ce maillage. Il s'avère que ce sont les plus anciennes méthodes et qui sont suffisamment maîtrisées. Ces méthodes sont parfaitement adaptées pour des milieux à comportement non linéaire.

- **Les méthodes pseudo-spectrales ou qui utilisent les nombres d'ondes discrets**

Le principe de ces méthodes est presque identique aux méthodes des éléments finis ou différences finis. Néanmoins, la résolution spatiale et temporelle est transposée en nombre d'ondes ou en fréquence afin de réduire les volumes de calcul.

- **Les méthodes d'équations intégrales et d'éléments de frontière**

La dimension du problème à traiter est réduite d'une unité et rapportée aux interfaces entre les différents milieux.

Ces méthodes sont parfaitement adaptées aux problèmes linéaires de propagation d'ondes dans des milieux non bornés.

- **Les méthodes d'optique généralisée**

La propagation d'ondes dans le massif de sol est traitée en considérant l'outil le plus flexible et le plus efficace qui est l'optique géométrique. Les phénomènes d'interférence et de diffraction se déduisent des raies de propagation. Ces méthodes sont parfaitement recommandées pour des configurations plus au moins particulières des milieux du sol.

3.5. Modèles tridimensionnels

Ces méthodes permettent de dépasser l'hypothèse simplificatrice d'une géométrie bidimensionnelle et de passer à une représentation plus réaliste du problème à étudier.

Néanmoins, l'inconvénient majeur de ces modèles réside dans volume de calcul très coûteux. Où rares sont les cas qui nécessitent le recours à des modèles tridimensionnels pour l'évaluation des effets de site. Cependant, de nombreuses études ont montré qu'il y a moins de différences, en termes d'augmentation de l'amplification, dans le passage du bidimensionnel au tridimensionnel que dans celui du unidimensionnel au bidimensionnel (Kham 2004).

3.6. Modèles vibratoires

Les méthodes correspondantes vibratoires correspondent à une modélisation de la réponse sismique d'un profil de sol en considérant la propagation d'une onde incidente. Une autre alternative qui consiste à opter pour une approche modale du profil du sol, peut être utilisée. Ensuite, les propriétés vibratoires de ce profil peuvent être calculées. Ainsi, la fréquence fondamentale du profil de sol étudié peut être estimée et les modes propres de vibration de ce modèle sont déterminés (Kham 2004).

4. Formulation analytique du modèle unidimensionnel

4.1. Cas d'un site monocouche

En exploitant la théorie de propagation des ondes développée par (Aki et Richards 1980), Şafak (1995) a dérivé la fonction de transfert de propagation des ondes de cisaillement dans une couche horizontale de sol. Cette fonction est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{U_j(i\omega)}{U_{j'}(i\omega)} = \frac{2(1+r_j-i\xi_j)\exp(-i\omega\tau_j(1-2i\xi_j))}{1+(r_j-i\xi_j)\exp(-2i\omega\tau_j(1-2i\xi_j))} = H_j(i\omega) \quad (3. 29)$$

Où :

$U_j(i\omega)$ et $U_{j'}(i\omega)$: sont les transformées de Fourier du mouvement sismique $u_j(t)$ et $u_{j'}(t)$ à la surface et au substratum rocheux respectivement.

$\xi_j = 1/4Q$: est le coefficient d'amortissement calculé à partir de la dissipation d'énergie due à la propagation des ondes sismiques.

Q : est le facteur de qualité.

$\tau_j = h_j/v_j$: 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 :

$$r_j = \frac{\rho_R v_R - \rho_j v_j}{\rho_R v_R + \rho_j v_j} \quad (3. 30)$$

En général, le mouvement sismique à la surface de la roche peut être donné, au lieu du mouvement sismique du substratum rocheux. Les paramètres définis correspondant à la fonction de densité spectrale de puissance correspondent également au mouvement sismique à la surface de la roche. Par conséquent, la constante 2 dans l'équation (3. 29), qui est une mesure de la réflexion de surface libre, dans la fonction de transfert peut être supprimée. A cet effet, l'équation de $H_j(i\omega)$ devient alors :

$$H_j(i\omega) = \frac{U_j(i\omega)}{U_{j'}(i\omega)} = \frac{(1 + r_j - i\xi_j) \exp(-i\omega\tau_j(1 - 2i\xi_j))}{1 + (r_j - i\xi_j) \exp(-2i\omega\tau_j(1 - 2i\xi_j))} \quad (3. 31)$$

4.2. Cas d'un sol multicouche

La théorie de propagation des ondes sismiques est également utilisée dans ce cas. En effet, un cas plus réaliste de l'effet de site doit se baser sur le fait que le sol est composé de plusieurs couches (sol stratifié). Les hypothèses d'une propagation d'une onde sismique unidimensionnelle et d'un sol de fondation composé de plusieurs couches sont considérées.

En effet, dans ce cas de sol stratifié, la formulation présentée pour un cas de sol monocouche est étendue et cela en exploitant la théorie de la propagation des ondes détaillée par Wolf (1985).

Il a été démontré que la théorie de la propagation des ondes unidimensionnelles, couramment utilisée dans la pratique de l'ingénierie, permet de donner une modélisation satisfaisante de l'amplification du site.

L'effet de site est considéré en adoptant l'hypothèse que les ondes sismiques se propagent dans le site avec un angle incident à l'interface du substratum rocheux et de la couche de sol. Puis, les ondes se propagent verticalement dans les couches de sol jusqu'à la surface libre du sol.

Par souci de complexité, l'analyse unidimensionnelle linéaire pour un sol multicouche est considérée. Ainsi, pour une excitation harmonique de fréquence ω , les équations d'équilibre dynamique se présentent comme suit :

$$\nabla^2 e = -\frac{\omega^2}{c_p^2} e \quad \text{ou} \quad \nabla^2 \{\Omega\} = -\frac{\omega^2}{c_s^2} \{\Omega\} \quad (3.32)$$

Où $\nabla^2 e$ et $\nabla^2 \{\Omega\}$ sont l'opérateur de Laplace de l'amplitude de déformation volumétrique e et du vecteur de déformation de rotation $\{\Omega\}$. c_p et c_s sont respectivement la vitesse des ondes P et S .

Les déplacements hors plan d'amplitude v sont causés par l'onde incidente SH . Tandis que les déplacements dans le plan d'amplitude u et w dans les directions horizontale et verticale dépendent des ondes P et SV combinées.

L'amplitude v est indépendante de u et w , par conséquent, la matrice de rigidité dynamique bidimensionnelle de chaque couche de sol pour le mouvement hors plan et dans le plan, $[S_{SH}^L]$ et $[S_{P-SV}^L]$, peut être formulée indépendamment en analysant les relations des contraintes de cisaillement et des déplacements à la frontière de chaque couche de sol. Les exposants L et R correspondent à la couche de sol et substratum rocheux, respectivement.

En assemblant les matrices de chaque couche de sol et du substratum rocheux, la rigidité dynamique du système global est obtenue et notée respectivement $[S_{SH}]$ et $[S_{P-SV}]$. Alors, l'équation d'équilibre dynamique du site dans le domaine fréquentiel est donnée par :

$$[S_{SH}]\{u_{SH}\} = \{P_{SH}\} \quad \text{ou} \quad [S_{P-SV}]\{u_{P-SV}\} = \{P_{P-SV}\} \quad (3.33)$$

Où $\{u_{SH}\}$ et $\{P_{SH}\}$ sont les déplacements hors plan et le vecteur de charge correspondant à l'onde SH incidente, $\{u_{P-SV}\}$ et $\{P_{P-SV}\}$ sont les déplacements dans le plan et le vecteur de charge du P combiné et les ondes SV . Les matrices de rigidité $[S_{SH}]$ et $[S_{P-SV}]$ dépendent des propriétés du sol, du type d'onde incidente, de l'angle d'incidence et de la fréquence circulaire ω . La charge dynamique $\{P_{SH}\}$ et $\{P_{P-SV}\}$ dépend des propriétés du substratum rocheux, du type d'onde incidente, de la fréquence et de l'amplitude de l'onde incidente.

En résolvant l'équation (3. 32) dans le domaine fréquentiel, la relation des amplitudes entre le substratum rocheux et chaque couche de sol peut être formée. Ainsi, la fonction de transfert de site $[H(\omega)]$ à chaque couche de sol peut être estimée.

Dans un cas particulier où le sol est monocouche, la solution de l'équation (3. 32) sera donnée par l'équation (3. 33). L'entrée sur substratum rocheux est supposée être une onde SH. Il peut être directement étendu à plus de couches de sol ou à des ondes P et SV combinées. En assemblant la matrice de rigidité dynamique de la couche $[S_{SH}^L]$ et du substratum rocheux $[S_{SH}^R]$, les matrices de rigidité $[S_{SH}]$, les déplacements hors plan $\{u_{SH}\}$ et le vecteur de charge $\{P_{SH}\}$ peuvent être exprimés comme (Wolf 1985) :

$$[S_{SH}] = \frac{kt^L G^{*L}}{\sin kt^L} \begin{bmatrix} \cos kt^L & -1 \\ -1 & \cos kt^L + ip \sin kt^L d \end{bmatrix} \quad (3. 34)$$

$$\{P_{SH}\} = [v_t, v_b]^T \quad (3. 35)$$

$$\{u_{SH}\} = [0, ikt^R G^{*R} v_0]^T \quad (3. 36)$$

Où k est le nombre d'onde, t est un paramètre lié à l'angle d'incidence, G est le module de cisaillement, d est la profondeur de la couche de sol, v_t et v_b sont le déplacement en haut et en bas de la couche de sol, T désigne la transposition, et i est le nombre imaginaire unitaire.

La formulation ci-dessus peut être facilement étendue à plus de couches de sol en assemblant la rigidité de couche appropriée à la matrice de rigidité.

En remplaçant l'équation (3. 34) dans l'équation (3. 33), le rapport du mouvement de surface v_t au mouvement d'affleurement v_0 à la surface est donné par (Wolf 1985):

$$H(\omega) = \frac{v_t}{v_0} = \frac{1}{\cos kt^L d + \frac{i}{p} \sin kt^L d} \quad (3. 37)$$

Où p est le rapport d'impédance, il est donné par :

$$p = t^R G^{*R} / t^L G^{*L} \quad (3. 38)$$

5. Conclusion

Dans ce chapitre, le phénomène de l'effet de site, correspondant à l'influence des conditions géologiques locales sur le mouvement sismique, a été présenté. La modélisation de la réponse sismique des sites a été également abordée en introduisant les différents modèles de l'évaluation de l'effet de site. Ensuite, une partie importante a été consacrée à l'analyse de la réponse sismique des sites où les formulations adéquates ont été détaillées.

Il convient de noter que l'analyse unidimensionnelle linéaire de la réponse des sites est l'approche la plus utilisée dans la littérature. Elle se base sur la théorie de propagation des ondes et sa formulation ne présente pas un niveau de complexité élevée et donne lieu à des résultats satisfaisants. Ce type d'analyse reste à la portée des chercheurs dans le domaine du génie parasismique. Introduire la non-linéarité dans cette analyse reste tout à fait possible pour des résultats plus précis.

Cependant, les analyses bidimensionnelle et tridimensionnelle présente un niveau de complexité très élevé. Ces types d'analyse sont souvent très déprisés par les chercheurs en génie parasismique à cause de leur complexité et coût exorbitant en temps d'analyse. Néanmoins, dans certains cas de structures ou des études particulières tel que le zonage ou micro-zonage sismique d'une région donnée, opter pour ces types d'analyse est plus que nécessaire. Il a été démontré les analyses bidimensionnelles induisent des amplifications locales et des prolongations de la durée des signaux très importantes, en augmentant considérablement le mouvement sismique au-dessus des remplissages sédimentaires (Kham 2004).

Il est à souligner que la prise en compte des effets de site dans la réglementation parasismique algérienne reste timide. Plusieurs chercheurs ont évoqué la classification des sites au niveau de la réglementation algérienne. En effet, la prise en compte de l'influence du site en considérant une répartition des sites en quatre catégories, peut être assez problématique (Zenchi Sennour 2008).

L'objectif de ce chapitre était de fournir les outils essentiels pour la compréhension de la simulation des mouvements sismiques spatialement variables. Cette partie sera entamée dans le chapitre suivant. En effet, une technique de simulation des signaux sismiques sera mise en place en considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement

sismique. L'effet des conditions locales du site, considéré comme facteur principal de cette variabilité des excitations sismiques, sera soigneusement étudié dans les chapitres suivants.

Chapitre 4.

Simulation du champ du mouvement sismique tenant en considération les conditions locales du site

1. Introduction

Une estimation correcte de l'action sismique est cruciale pour une analyse fiable de la réponse dynamique des structures étendues. Par ailleurs, les enregistrements des mouvements sismiques lors des séismes, étroitement espacés, sont très rares. A cet effet, l'analyse de la réponse sismique des structures étendues doit reposer sur des mouvements sismiques artificiels ou synthétiques compatibles avec un modèle de variabilité spatiale sismique.

La simulation des mouvements sismiques spatialement variables était principalement basée sur le concept de fonction de cohérence. Ce qui mène à une modélisation de la variabilité spatiale des mouvements sismiques dans le domaine fréquentiel en adoptant l'hypothèse de stationnarité.

Zerva et Zervas (2002) ont présenté un modèle sur la base des enregistrements sismiques du réseau SMART-1. Il est à noter que de nombreux modèles ont été élaborés en exploitant les enregistrements de ce réseau. La plupart de ces modèles ont été proposés sur la base des données sismiques enregistrées sur les sites relativement plats.

Des méthodes de simulation ont été développées en utilisant des modèles de cohérence et en considérant des fonctions théoriques de densité spectrale de puissance cible. Les mouvements stationnaires simulés résultants sont ensuite modulés dans le temps pour fournir une non-stationnarité temporelle. D'autres méthodes de simulation des mouvements sismiques ont été élaborées en adoptant l'approche conditionnelle. En effet, le mouvement sismique cible est un enregistrement d'un tremblement de terre (accélérogramme). Ces méthodes sont également basées sur un modèle de cohérence. Ensuite, dans le but de préserver le caractère non-stationnaire du mouvement sismique, la non-stationnarité est incorporée en utilisant la segmentation ou la modulation dans le domaine temporel.

La segmentation du signal sismique peut être effectuée sur la base d'une division arbitraire du mouvement sismique cible en petits segments pour obtenir une représentation plus précise de la non-stationnarité du champ aléatoire (Vanmarcke et Fenton 1991; Konakli et Der Kiureghian 2012). D'autres chercheurs ont adopté la segmentation du signal sismique afin de préserver la nature non-stationnaire des excitations sismiques où les segments sont définis de manière à conserver des

caractéristiques statistiques presque invariantes dans le temps. Les caractéristiques considérées sont la variance, la fréquence prédominante et la largeur de bande du processus d'accélération du sol. Les valeurs instantanées de ces caractéristiques sont respectivement mesurées comme les pentes de l'intégrale de l'accélération au carré dans le temps, le nombre cumulé des passages à zéro au niveau de l'intersection et le nombre cumulé des maxima négatifs ou minima positifs (Rezaeian et Kiureghian 2010; Konakli et Der Kiureghian 2012). Il est important de noter qu'une segmentation plus dense conduit à une représentation plus précise de la nature non-stationnaire et du contenu des hautes fréquences de signal d'origine cible, mais modifie le contenu basse fréquence du mouvement sismique (Konakli et Der Kiureghian 2012).

Plusieurs chercheurs ont développée des méthodes de simulation afin d'approcher le phénomène de l'aléa sismique. Parmi ces méthodes, on relève la méthode de représentation spectrale développée par Shinozuka (1971) (Deodatis 1996). Elle considère le mouvement sismique comme étant un processus gaussien aléatoire.

Un aperçu sur les méthodes de simulation des mouvements sismiques spatialement variables et leurs résultats dans la littérature est abordé au début de ce chapitre. En particulier ceux qui considèrent l'ensemble des facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique à savoir les effets d'incohérence et de passage d'onde ainsi que les conditions locales du site. Un intérêt particulier sera réservé à l'influence de l'effet de site sur les mouvements sismiques simulés.

Puis, la technique de simulation des mouvements sismiques spatialement variables est présentée. Une validation de cette technique de simulation est réalisée en examinant et en comparant les propriétés statistiques et physiques tels que les fonctions de densité spectrales de puissance et les fonctions de cohérence des mouvements simulés avec le mouvement cible.

La technique de simulation des mouvements sismiques spatialement variables est développée en se basant sur le code de programmation Matlab. Cette technique permet de simuler des sollicitations sismiques en accélérations, vitesses et déplacements.

2. Aperçu sur les méthodes de simulation des mouvements sismiques spatialement variables

Au préalable, rappelons que la nécessité de développer des techniques et méthodes de simulation des mouvements sismiques découle de la rareté des données d'enregistrement sismiques à des distances rapprochées proportionnelles aux dimensions des structures étendues en génie civil.

En premier lieu, nous allons discuter quelques méthodes de simulation des mouvements sismiques spatialement variables d'une manière générale. Ensuite, nous allons évoquer ceux qui s'intéressent plus à l'effet de site et son influence sur les mouvements sismiques simulés.

Vanmarcke et Fenton (1991) ont utilisé la méthode équivalente de Krigeage pour la simulation conditionnée des mouvements sismiques. Cela en optant pour une division arbitraire de l'enregistrement cible en petits segments afin d'obtenir une représentation plus précise de la non-stationnarité du champ aléatoire.

Liao et Zerva (2006) ont utilisé le processus d'interpolation en conjonction avec le concept de segmentation pour simuler des mouvements sismiques cohérent avec des accélérogrammes enregistrés ou des signaux synthétiques. L'étude menée a fourni une analyse plus approfondie du problème en incorporant le post-traitement nécessaire pour obtenir des mouvements physiquement conformes et en examinant les vitesses et les déplacements des mouvements simulés ainsi que les spectres de réponse et les caractéristiques de cohérence correspondants.

Une méthode de génération des signaux sismiques variables dans l'espace et dans le temps a été développée par Benmansour et al. (2012). Cette technique se base sur la méthodologie de représentation spectrale mise en place par Shinozuka (1971). 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 ces auteurs. Elle consistait à comparer la méthode proposée par le règlement parasismique algérien des ouvrages d'art (RPOA) (MTP 2010) avec des approches plus raffinées et avec les dispositions de l'Eurocode 8 (CEN 2005). Les résultats obtenus ont montré que la méthode simplifiée

proposée dans le RPOA (MTP 2010) surestime la demande sismique. Afin d'obtenir des résultats semblables aux autres méthodes, ils préconisent d'apporter quelques modifications aux dispositions réglementaires.

D'une manière générale, considérer que la variabilité spatiale est caractérisée uniquement par les effets d'incohérence et de passage d'onde conduit à des procédures de simulation des mouvements sismiques, basées sur l'approche conditionnelle ou inconditionnelle, limités au cas de conditions de sol uniformes. Cependant, les variations des profils de sol locaux peuvent contribuer de manière significative à la variabilité spatiale des mouvements sismiques. Par conséquent, ces variations des conditions locales de sol peuvent amplifier l'intensité des mouvements sismiques et augmenter leurs temps d'excitation et par la suite, influencer la réponse sismique des structures étendues. En effet, l'intégration de l'effet de site dans le développement des méthodes de simulation conditionnelle et inconditionnelle du champ sismique est un passage obligatoire (Konakli et Der Kiureghian 2012).

En tenant compte de la variabilité des conditions locales du site, (Konakli et Der Kiureghian 2011) a présenté un modèle de cohérence théorique, dans lequel la fonction de densité spectrale de puissance du mouvement sismique est caractérisée par une fonction de transfert dépendant du site et un spectre de bruit blanc. Des paramètres typiques dépendant du site, à savoir, la fréquence centrale et le rapport d'amortissement pour trois types de site communs : site ferme, moyen et mou, ont été proposés. L'avantage de ce modèle de cohérence est la prise en compte des propriétés variables du site à plusieurs positions et son utilisation plus au moins simple. En revanche, l'inconvénient majeur de ce modèle est sa représentation approximative de l'effet local du site sur les mouvements sismiques. Par exemple, il est bien connu que les ondes sismiques seront amplifiées lors de leur propagation à travers un site de sol stratifié. Les amplifications se produisent à différents modes de vibration du site. Par conséquent, l'énergie des mouvements de surface se concentrera à quelques fréquences. Ainsi, la fonction de densité spectrale de puissance du mouvement sismique en surface peut alors avoir plusieurs pics. Ce phénomène ne peut cependant pas être considéré dans le modèle de Der Kiureghian (Konakli et Der Kiureghian 2011) car un seul pic correspondant au mode de vibration fondamental du site modélisé est adopté.

L'effet de site, responsable de l'amplification des ondes sismiques, entraînant une modification de leurs amplitudes et leurs contenus fréquentiels, a également été étudié de manière intensive par quelques chercheurs. Wolf (1985) a présenté une approche uniforme dans le domaine fréquentiel pour analyser la réponse en champ libre et en même temps l'effet d'interaction sol-structure basée sur la théorie de la propagation des ondes et l'approche des éléments finis.

Vogt et al. (1988) et Şafak (1995) ont également présenté des méthodes pour modéliser la propagation des ondes de cisaillement dans des milieux stratifiés dans le domaine temporel.

Sur la base des travaux de Wolf (1985), Bi et Hao (2012) ont présenté une méthode de génération des signaux sismiques en considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique. 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.

3. Approches de simulation des mouvements sismiques

Il est connu que les mouvements sismiques ont la principale propriété non-stationnaire à la fois dans les domaines temporel et fréquentiel. Cependant, la plupart de ces mouvements sismiques peuvent être considéré comme un ensemble de segments temporels qui sont presque stationnaires dans le cas où le signal cible est un enregistrement en accélération d'un séisme. Dans le cas contraire, où le signal cible est défini par des propriétés sismologiques tel que la densité spectrale de puissance, le signal dérivé est également considéré comme stationnaire (à l'exception des enregistrements sismiques proche d'une faille). Pour cette raison, le traitement des processus stationnaires est présenté en se basant le théorème de la limite centrale, il est raisonnable de supposer que le processus de mouvement sismiques est également gaussien.

La technique de simulation des mouvements sismiques variables dans l'espace sera présentée. En adoptant cette technique, la simulation des signaux sismiques peut être réalisée en deux méthodes. En effet, il existe deux approches de simulation des processus gaussien stationnaires. Ces méthodes ont été désignées par Vanmarcke et Fenton (1991) comme des méthodes de simulation inconditionnelle et de simulation conditionnelle.

3.1. Approche inconditionnelle

Dans l'approche de simulation inconditionnelle, le mouvement sismique cible est compatible avec la densité spectrale de puissance d'une réalisation aléatoire du processus sur un site donné. En effet, la fonction de densité spectrale de puissance est un paramètre incontestable et couramment utilisés pour définir l'action sismique.

Dans cette optique, de nombreuses fonctions de densité spectrale de puissance de mouvement sismiques ont été développées par différents chercheurs. Les modèles les plus utilisés sont le modèle de Kanai–Tajimi (Tajimi 1960) et le modèle de Clough–Penzien (Clough et Penzien 1993). Ces deux modèles supposent que l'excitation sismique au substratum rocheux est un processus aléatoire de bruit blanc. Le mouvement sismique en surface du sol est estimé par le calcul de la réponse d'une monocouche de sol à l'excitation de bruit blanc.

Dans l'approche inconditionnelle, la non-stationnarité du mouvement sismique est incorporée en appliquant une modulation dans le domaine temporel. En effet, la fonction de modulation la plus utilisée est celle de Jennings et al. (1968).

La simulation des mouvements sismiques en considérant l'approche inconditionnelle fournit des signaux sismiques artificiels.

3.2. Approche conditionnelle

Dans le cas d'une simulation des signaux sismiques en adoptant l'approche conditionnelle, le mouvement sismique est caractérisé par un accélérogramme enregistré à un site donné.

Dans le cas de l'approche inconditionnelle, la non-stationnarité du mouvement sismique est souvent introduite, en appliquant la segmentation. En effet, l'accélérogramme cible

est divisé en plusieurs petit segments où l'hypothèse de stationnarité est acceptable. Une division plus dense conduit à une représentation qui préserve la non-stationnarité de l'accélérogramme cible, mais modifie le contenu basse fréquence (Konakli et Der Kiureghian 2012). En effet, une définition adéquate de cette segmentation sert à conserver des caractéristiques statistiques presque invariantes dans le temps. Ces caractéristiques se résument dans la variance, la fréquence prédominante et la largeur de bande du processus d'accélération (Konakli et Der Kiureghian 2012).

3.3. Approches de simulation inconditionnelle et conditionnelle :

Discussion

Il convient de noter que pour des mouvements sismiques simulés par l'approche conditionnelle sur un accélérogramme cible, la variance de ces mouvements, a tendance à augmenter avec l'augmentation de la distance entre le site et l'origine du mouvement sismique cible. Ce qui représente un inconvénient majeur lors de l'analyse statistique de la réponse des structures étendues.

Afin de contourner ce problème, une approche alternative à la simulation d'un champ de mouvements sismique avec un modèle de cohérence spécifié consiste à opter pour le conditionnement probabiliste. Cette simulation est réalisée en adoptant un mouvement sismique cible enregistré ou simulé sur un site de référence (Vanmarcke et Fenton 1991; Liao et Zerva 2006; Konakli et Der Kiureghian 2012).

Au niveau de l'approche conditionnelle, caractérisée par un accélérogramme de référence, la segmentation est souvent approuvée afin d'incorporer la non-stationnarité du mouvement sismique. L'utilisation de cette approche pour simuler des mouvements sismiques est conditionnée par la conformité physique des signaux sismiques simulés. En effet, la vérification de la conformité la plus importante est que les vitesses et déplacements simulés ne doivent pas avoir des résidus (Konakli et Der Kiureghian 2011).

L'approche de simulation inconditionnelle a l'avantage que la variabilité observée dans les mouvements sismiques simulés est uniforme, alors que dans l'approche de simulation conditionnelle, la variabilité du mouvement observé augmente avec la distance.

La variabilité uniforme des mouvements sismiques est essentielle lorsque les mouvements artificiels sont utilisés pour l'analyse statistique de la réponse d'une structure à support multiple tel que les ponts et les viaducs (Konakli et Der Kiureghian 2012).

4. Notions générales sur le traitement probabiliste d'un processus stochastique

4.1. Processus Aléatoire

Un processus aléatoire ou stochastique est défini comme étant une série infinie de fonctions d'un paramètre donné (le temps par exemple) et chaque valeur de ce paramètre correspond à une variable aléatoire. L'introduction de plusieurs paramètres dans un processus aléatoire conduit à la formation d'un champ aléatoire (Shinozuka 1971; Deodatis 1996).

4.2. Fonction d'Auto-Corrélation

La fonction d'auto-corrélation d'un processus stochastique à un seul paramètre $X(t)$ n'est que la valeur moyenne du produit de ce processus à deux instants différents. Elle est donnée par :

$$R_{XX}(t_1, t_2) = E[X(t_1) X(t_2)] \quad (4. 1)$$

Pour un processus stochastique stationnaire :

$$R_{XX}(t_1, t_2) = R_{XX}(\tau) = E[X(t)X(t + \tau)] \quad (4. 2)$$

Avec : $\tau = t_2 - t_1$

4.3. Fonction d'Inter-Corrélation

La fonction d'inter-corrélation est définie pour deux processus stochastiques à un seul paramètre $X(t)$ et $Y(t)$. Elle est la valeur moyenne du produit de ces deux processus à deux instants différents. Elle est donnée par :

$$R_{XY}(t_1, t_2) = E[X(t_1) Y(t_2)] \quad (4.3)$$

Pour un processus stochastique stationnaire, on aura la relation suivante :

$$R_{XY}(t_1, t_2) = R_{XY}(\tau) = E[X(t) Y(t + \tau)] \quad (4.4)$$

4.4. Fonction de Densité Spectrale de Puissance

La fonction de densité spectrale de puissance pour un processus stochastique stationnaire $X(t)$, est la Transformée de Fourier de la fonction d'auto-corrélation.

$$S_{XX}(\omega) = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{+\infty} R_{XX}(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau \quad (4.5)$$

L'allure de la fonction de densité spectrale de puissance est illustrée sur la figure 4. 1.

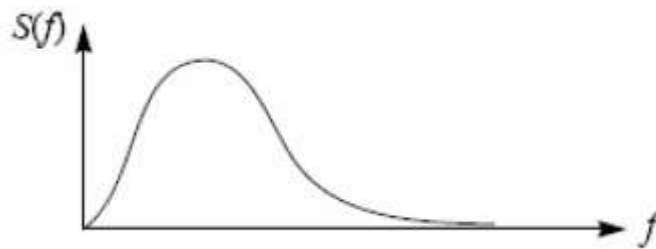


Figure 4. 1. Fonction de densité spectrale de puissance (Harichandran 1999).

5. Simulation du champ du mouvement sismique spatialement variable

5.1. Simulation d'un champ de mouvement sismique différentiel stationnaire

La technique de simulation des mouvements sismiques spatialement variables se base sur la méthode de représentation spectrale décrite par Deodatis (1996). Le modèle de simulation tient en considération l'ensemble des facteurs qui sont à l'origine de la variabilité spatiale du mouvement sismique, à savoir, l'effet d'incohérence, l'effet de passage d'onde et l'effet de site.

5.1.1. Evaluation de la fonction de densité spectrale de puissance

La représentation d'un événement sismique dans le domaine fréquentiel a une grande importance. Dans le cas des enregistrements déterministes, cette analyse peut être effectuée en calculant leurs transformées de Fourier. Ceci ne peut pas être réalisé pour les processus aléatoires stationnaires puisqu'un échantillon stationnaire ne s'annule pas à l'infini (Benmansour 2013).

A cet effet, l'analyse spectrale de Fourier s'effectue sur la fonction d'auto-corrélation $R_{jj}(\tau)$ d'un processus stationnaire de moyenne nulle noté $g_j(t)$. Cette fonction d'auto-corrélation a la forme suivante :

$$R_{jj}(\tau) = E[g_j(t)g_j(t + \tau)] \quad (4. 6)$$

L'indice j indique la dépendance du processus $g_j(t)$ au point j .

Où E désigne l'espérance mathématique.

Puisque le processus est stationnaire, la fonction d'auto-corrélation est paire et dépend de la seule variable τ .

Les équations (4. 7) et (4. 8) représentent respectivement la fonction de densité spectrale de puissance $S_{jj}(\omega)$ et sa transformée de Fourier inverse $R_{jj}(\tau)$. Ces équations sont données comme suit :

$$S_{jj}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{jj}(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau \quad (4. 7)$$

$$R_{jj}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{jj}(\omega) \exp(i\omega\tau) d\omega \quad (4. 8)$$

La fonction de densité spectrale de puissance est une fonction réelle paire et positive. Sa propriété la plus importante s'obtient lorsque $\tau = 0$. Ceci abouti à la relation (4. 9).

A partir de cette relation, on déduit que la fonction de densité spectrale de puissance est une mesure de distribution de la moyenne quadratique dans le domaine des fréquences. Ou encore, c'est une mesure de la distribution d'énergie moyenne d'un processus.

$$R_{jj}(\tau = 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{jj}(\omega) d\omega = E[(g_j(t))^2] \quad (4. 9)$$

La fonction de densité spectrale peut être déterminée directement dans le domaine fréquentiel par l'équation (4. 10).

$$S_{jj}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{G_j^*(\omega)G_j(\omega)}{2\pi T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|G_j(\omega)|^2}{2\pi T} \quad (4.10)$$

Où :

* est une notation indiquant le conjugué complexe.

$G_j(\omega)$ est la transformé de Fourier du processus $g_j(t)$.

$|G_j(\omega)|$ est le module de la fonction $G_j(\omega)$.

Les deux premières fonctions de densités spectrales de processus dérivés $\dot{g}_j(t)$ et $\ddot{g}_j(t)$ sont définies par la relation (4.11).

$$\begin{cases} S_{\dot{g}_j}(\omega) = \omega^2 S_{jj}(\omega) \\ S_{\ddot{g}_j}(\omega) = \omega^4 S_{jj}(\omega) \end{cases} \quad (4.11)$$

5.1.2. Evaluation de la fonction d'inter-densité spectrale

La fonction d'inter-densité spectrale de puissance $S_{jk}(\omega)$ des deux processus $g_j(t)$ et $g_k(t)$ est la transformée de Fourier de la fonction d'inter-corrélation $R_{jk}(\tau)$ tel que :

$$R_{jk}(\tau) = E[g_j(t)g_k(t + \tau)] \quad (4.12)$$

$$S_{jk}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{jk}(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau \quad (4.13)$$

La fonction d'inter-densité spectrale de puissance $S_{jk}(\omega)$ est généralement complexe et satisfait les relations suivantes :

$$S_{jk}(\omega) = S_{jk}^*(-\omega) \quad (4.14)$$

$$S_{jk}(\omega) = S_{jk}^*(\omega) \quad (4.15)$$

Successivement, la fonction d'inter - densité spectrale de puissance peut être évaluée directement dans le domaine fréquentiel par l'équation :

$$S_{jk}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{G_j^*(\omega)G_k(\omega)}{2\pi T} \quad (4.16)$$

Où :

$G_j(\omega)$ et $G_k(\omega)$ sont respectivement les transformés de Fourier des processus $g_j(t)$ et $g_k(t)$.

5.1.3. Simulation des processus aléatoires stationnaires par la méthode de représentation spectrale

La méthode de représentation spectrale proposée par Shinozuka (1971) (Deodatis 1996) est adoptée pour la simulation des mouvements sismiques. Ces derniers sont considérés comme des processus aléatoires stationnaires.

Soit un vecteur de processus stochastiques stationnaires multi-variables à une dimension constitué par les composantes $g_j(t)$; ($j = 1, 2, \dots, n$) et de moyennes nulles telle que :

$$E[g_j(t)] = 0; (j = 1, 2, \dots, n) \quad (4. 17)$$

La matrice d'inter-corrélation est donnée par :

$$R(\tau) = \begin{bmatrix} R_{11}(\tau) & R_{12}(\tau) & \dots & R_{1n}(\tau) \\ R_{21}(\tau) & R_{22}(\tau) & \dots & R_{2n}(\tau) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1}(\tau) & R_{n2}(\tau) & \dots & R_{nn}(\tau) \end{bmatrix} \quad (4. 18)$$

Et la matrice d'inter-densité spectrale correspondante est la suivante :

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(\omega) & \dots & S_{1n}(\omega) \\ S_{21}(\omega) & S_{22}(\omega) & \dots & S_{2n}(\omega) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1}(\omega) & S_{n2}(\omega) & \dots & S_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (4. 19)$$

En utilisant la définition de la fonction de cohérence (Équation (1. 1)) les fonctions d'inter-densités spectrales s'écrivent alors comme suit :

$$S_{jk}(i\omega) = \gamma_{jk}(i\omega) \sqrt{S_{jj}(\omega)S_{kk}(\omega)} ; (j, k = 1, 2, \dots, n); j \neq k \quad (4. 20)$$

Pour la simulation des processus stationnaires $g_j(t); (j = 1, 2, \dots, n)$, on décompose d'abord la matrice de densité spectrale $S(i\omega)$ suivant la méthode de Cholesky, ce qui donne le produit illustré par l'équation (4. 21). Notons que $i = \sqrt{-1}$.

$$S_{jk}(i\omega) = L(i\omega)L^{*T}(i\omega) \quad (4. 21)$$

Où l'exposant T indique la matrice transposée et $L(i\omega)$ est une matrice triangulaire inférieure exprimée par l'équation (4. 22) :

$$L(i\omega) = \begin{bmatrix} L_{11}(\omega) & 0 & \dots & 0 \\ L_{21}(i\omega) & L_{22}(\omega) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1}(i\omega) & L_{n2}(i\omega) & \dots & L_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (4. 22)$$

Les éléments diagonaux de la matrice $H(\omega)$ sont réels et positifs et vérifient la relation suivante :

$$L_{jj}(i\omega) = L_{jj}(-i\omega) ; (j = 1, 2, \dots, n) \quad (4. 23)$$

Les éléments sous la diagonale sont généralement complexes ; ils s'écrivent alors sous la forme :

$$L_{jk}(i\omega) = |L_{jk}(\omega)| \exp(i\theta_{jk}(\omega)) ; (j = 2, \dots, n; k = 1, \dots, n-1); j > k \quad (4. 24)$$

Où:

$$\theta_{jk}(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[L_{jk}(\omega)]}{\text{Re}[L_{jk}(\omega)]} \right) \quad (4. 25)$$

$\text{Im}(L_{jk}(\omega))$ et $\text{Re}(L_{jk}(\omega))$ sont respectivement les parties imaginaire et réelle du nombre complexe $L_{jk}(\omega)$. Ce dernier vérifie la relation suivante :

$$L_{jk}(i\omega) = L_{jk}(-i\omega) ; (j = 2, \dots, n; k = 1, \dots, n - 1); j > k \quad (4. 26)$$

En utilisant les équations (4. 21) et (4. 22), les processus stationnaires $g_j(t)$ ($j = 1, 2, \dots, n$) peuvent être simulés par la série suivante lorsque $N \rightarrow \infty$ (Benmansour 2013):

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

$$(j = 1, 2, \dots, n) \quad (4. 27)$$

$$\text{Où:} \quad \omega_l = l\Delta\omega \quad ; \quad \Delta\omega = \frac{\omega_u}{N} \quad (4. 28 \text{ a, b})$$

Les Φ_{ml} ; ($m=1, 2, \dots, n$); ($l=1, 2, \dots, N$) utilisées dans l'équation (4. 27) sont des phases aléatoires indépendantes uniformément distribuées sur l'intervalle $[0, 2\pi]$.

Dans l'équation (4. 28 b), ω_u représente la fréquence angulaire limite ou de coupure à partir de laquelle les éléments de la matrice donnée par (4. 19) deviennent nulles. Et N est le nombre total de pas de fréquence angulaire $\Delta\omega$ pour atteindre cette limite.

Pour la simulation des processus $g_j(t)$; ($j = 1, 2, \dots, n$) selon l'équation (4. 27) le pas de temps Δt doit être inférieur ou égale à (π/ω_u) afin d'éviter le phénomène d'Aliasing.

5.2. Prise en compte de la non-stationnarité du mouvement sismique

Les excitations sismiques sont connues par leur caractère non-stationnaire. Sachant que la technique proposée de simulation ne traite que les processus stationnaires. L'adaptation des signaux sismiques simulés à la nature non-stationnaire doit se faire par le biais de la méthode de segmentation ou la modulation temporelle.

5.2.1. Méthode de segmentation

Cette méthode consiste à subdiviser le signal sismique cible en un nombre défini de segments de façon à ce que l'hypothèse de la stationnarité soit plus au moins plausible. Plusieurs manières existent de procéder à cette division. Il est à noter qu'il faut maintenir la compatibilité des signaux sismiques simulés avec le signal cible. Après simulation, ces petits segments doivent être reliés pour construire le signal résultant.

5.2.2. Méthode de modulation temporelle

Nombreux sont les chercheurs qui optent pour cette méthode, en particulier ceux qui optent pour l'approche inconditionnelle. Cependant, il existe plusieurs fonctions de modulation. On propose trois fonctions de modulation temporelle (Cacciola et Zentner 2012; Zentner 2013; Zentner 2016):

- **Fonction de modulation Gamma**

La fonction gamma (Figure 4. 2) s'écrit :

$$\zeta(t) = \alpha_1 t^{(\alpha_2-1)} \exp(-\alpha_3 t) \quad ; \quad t \in T \quad (4. 29)$$

Les paramètres α_2 et α_3 décrivent respectivement la forme et la durée de la phase forte du signal. Le paramètre α_1 détermine l'énergie du signal et peut être déterminé à partir de la donnée de l'intensité d'Arias.

Il est à noter que l'intensité d'Arias est une grandeur quantifiant du potentiel énergétique de l'onde sismique à partir de l'accélérogramme enregistré. Elle intègre à la fois l'amplitude, le contenu fréquentiel et la durée du signal (Saragoni et Hart 1973; Zentner 2016). Pour une accélération du sol a , cette relation est donnée par :

$$AI = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_f} a^2(t) dt \quad (4. 30)$$

- **Fonction de modulation de Jennings et al. (1968)**

La fonction de Jennings et al. (1968) (Figure 4. 3) s'écrit :

$$\zeta(t) = \begin{cases} (t/t_0)^2 & 0 \leq t \leq t_0 \\ 1 & t_0 < t \leq t_n \\ \exp[\alpha \cdot (t-t_n)^\beta] & t_n < t \leq T \end{cases} \quad (4. 31)$$

Les paramètres α et β déterminent l'allure de la pente après t_n .

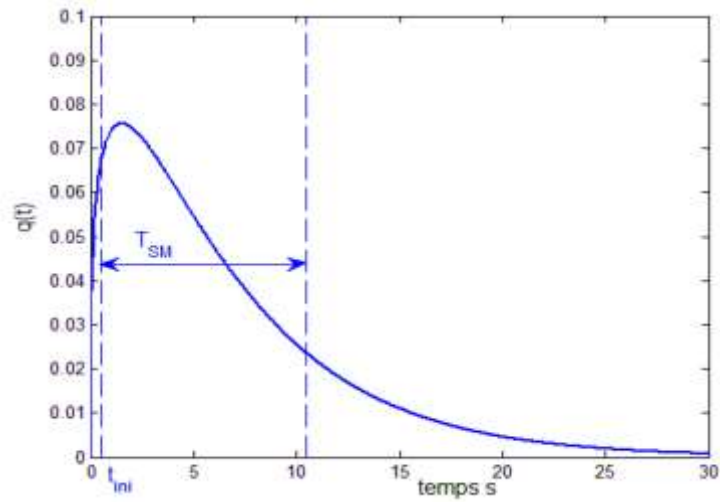


Figure 4. 2. Fonction de modulation Gamma pour $t_{ini} = 0.5$ s, $T_{SM} = 10$ s et $I_a = 0.5$ (Zentner 2016).

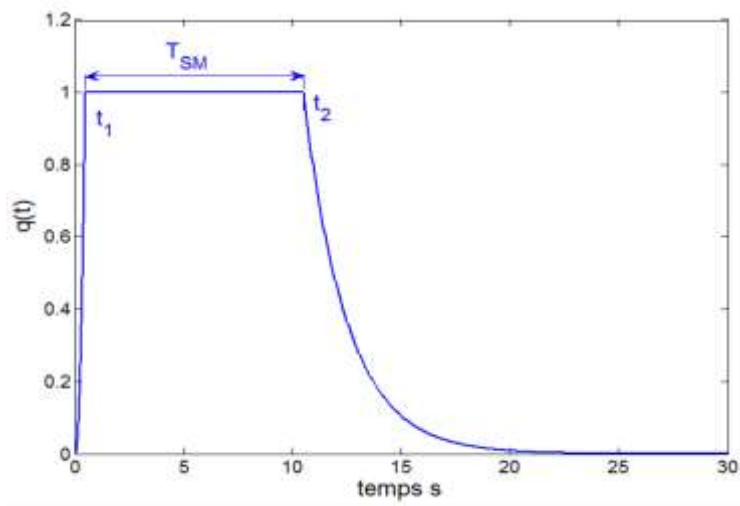


Figure 4. 3. Exemple de fonction de modulation temporelle de Jennings et al. (1968) pour $T = 10$ s (Zentner 2016).

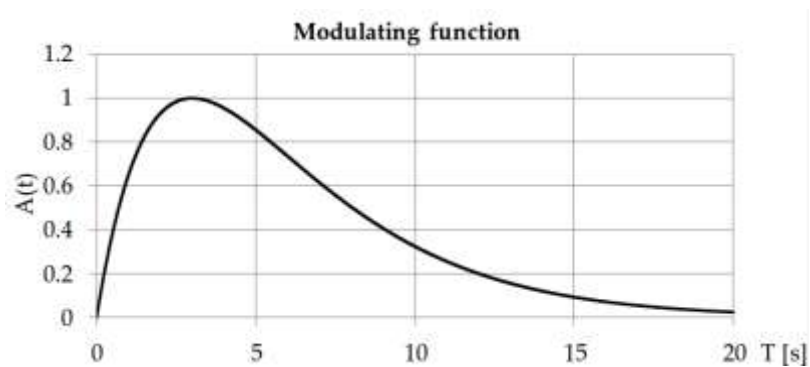


Figure 4. 4. Fonction de modulation temporelle de Bogdanoff-Goldberg-Bernard pour $a_1 = 0.906$ et $a_2 = 1/3$ (Deodatis 1996).

- **Fonction de modulation de Bogdanoff-Goldberg-Bernard (1961)**

Cette fonction est donnée par Bogdanoff et al. (1961) et reprise par Deodatis (1996) :

$$A_j(\omega, t) = A_j(t) = a_1 \left(t - \frac{\lambda_{jl}}{V} \right) \exp \left[-a_2 \left(t - \frac{\lambda_{jl}}{V} \right) \right] \text{ pour } t > \frac{\lambda_{jl}}{V} ; j=1,2,\dots,m. \quad (4.32)$$

Avec :

λ_{jl} est la distance de chaque point j .

V est la vitesse de propagation d'ondes sismique.

a_1 et a_2 sont des paramètres de la fonction.

Les valeurs usuelles de ces deux paramètres sont $a_1 = 0.906$ et $a_2 = 1/3$ (Figure 4. 4).

5.2.3. Discussion sur le choix adéquat pour introduire la non-stationnarité

La prise en considération de la nature non-stationnaire du mouvement sismique est conditionnée par le choix de l'approche de simulation. En effet, pour une simulation conditionnelle des mouvements sismiques, les deux techniques d'introduire la non-stationnarité sont valables. Néanmoins, l'utilisation de la segmentation du signal cible donne des résultats plus rassurants et cela malgré la lourdeur des calculs. La difficulté réside, tout d'abord, dans le choix de la dimension des segments afin de préserver les caractéristiques physiques de l'accélérogramme cible. Après simulation, les segments doivent être joints et là réside une autre difficulté majeure. En effet, la jonction des segments doit respecter un nombre de règles pour avoir une continuité et compatibilité tout le long des signaux sismiques simulés. Quelques méthodes existent dans la littérature afin de contourner cette difficulté.

En réalité, la division du signal sismique peut être déterminée directement par observation de sorte que les amplitudes et le nombre de passages par zéro de chaque segment sont relativement similaires (Zerva 2009), ou bien en utilisant l'approche de (Konakli et Der Kiureghian 2012) qui consiste à subdiviser l'accélération en segments conservant des caractéristiques statistiques presque invariables dans le temps.

Pour lier les accélérations simulées et construire les évolutions temporelles des accélérations non-stationnaires, la continuité des accélérations simulées doit être vérifiée

et par conséquent l'intégrabilité. Par ailleurs, Cette intégrabilité ne doit pas aboutir à des erreurs dans les évolutions temporelles non-stationnaires des vitesses et des déplacements. L'allure de ces évolutions doit être également réaliste.

A cet effet, il convient de souligner la méthode élaborée par Benmansour (2013). Cette méthode ingénieuse est une formulation mathématique qui sert à lier les segments des signaux sismiques après simulation et corrige le problème d'intégrabilité des accélérations simulées dans le même temps.

Dans le cas d'une simulation conditionnelle, opter pour la modulation dans l'espace temporelle est faisable et permet d'aboutir à des résultats raisonnables (Derbal 2005).

Opter pour l'approche inconditionnelle nous mène à l'application d'une fonction de modulation dans le temps. Les mouvements sismiques simulés sont compatibles avec le signal cible. En effet, la comparaison des densités spectrales de puissance donne des résultats très satisfaisantes (Konakli et Der Kiureghian 2012).

Dans le cas d'une simulation inconditionnelle, l'utilisation de la méthode de segmentation peut être réalisé en dérivant un accélérogramme à partir de la densité spectrale de puissance cible. Cela peut être réalisé en simulant le mouvement sismique à une distance nulle. L'efficacité de cette méthode reste à prouver.

5.3. Prise en compte de la variabilité spatiale et temporelle du mouvement sismique

En fonction de l'approche de simulation adoptée, la définition la densité spectrale de puissance du mouvement sismique cible est la première étape à entreprendre. Ensuite, le modèle de cohérence est introduit selon le choix opéré (modèle analytique, empirique ou semi-empirique). L'étape suivante consiste à calculer les fonctions de transfert (amplification) des sites. A la fin de la simulation des signaux sismiques, l'effet de passage d'onde est introduit sous forme de retard temporel.

5.3.1. Densité spectrale de puissance

En fonction de l'approche de simulation, la densité spectrale de puissance du mouvement sismique cible doit être définie. Cependant, si le signal de référence est un accélérogramme, sa densité spectrale de puissance est facilement calculée.

Dans le cas d'une simulation inconditionnelle, la définition de la densité spectrale de puissance du mouvement sismique cible se fait en réalisant un choix parmi ceux présentés dans la littérature. L'accélération sismique en champ libre est modélisée par des mouvements sismiques stationnaires de bruit blanc. Ensuite, pour tenir compte du contenu fréquentiel du mouvement du sol sismique, le bruit blanc filtré avec les spectres Kanai-Tajimi (Kanai 1957; Tajimi 1960) et Ruiz et Penzien (1969) est fréquemment utilisé dans les analyses analytiques de vibrations aléatoires. Housner and Jennings (1964) ont développé une méthode pour générer des processus aléatoires gaussiens stationnaires filtrés avec des fonctions de densité spectrale de puissance dérivées de la moyenne des spectres de vitesse non amortis des accélérations enregistrées. Ces modèles stationnaires tiennent compte des propriétés du site ainsi que de la fréquence dominante du mouvement du sol.

Au niveau de la présente technique de simulation, le choix est porté sur la fonction de densité spectrale de puissance filtrée de Kanai-Tajimi. En effet, le mouvement sismique de référence au substratum rocheux est défini par la fonction de densité spectrale de puissance Kanai-Tajimi filtrée (Tajimi 1960) :

$$S_g(\omega) = |H_p(\omega)|^2 S_0(\omega) = \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + (2\omega_f \omega \xi_f)^2} \cdot \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \Gamma \quad (4.33)$$

Avec :

$|H_p(\omega)|^2$ est un filtre passe-haut (Ruiz et Penzien 1969). $S_0(\omega)$ est la fonction de densité spectrale de puissance Kanai-Tajimi (Tajimi 1960). 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. En effet, ces paramètres caractérisent le mouvement sismique cible en accélération maximale (PGA), le déplacement maximal (PGD) et la durée du signal.

Bien qu'il existe dans la littérature plusieurs travaux de recherche aboutissant à des paramètres de la fonction de densité spectrale de puissance Kanai-Tajimi filtrée, les plus utilisés sont donnés par le tableau 4. 3 (Der Kirurghian 1980; Bi et al. 2010; Bi et Hao 2012a; Wang et al. 2016).

En outre, des chercheurs ont tenté de fournir des valeurs de ces paramètres en fonction du type du site (la nature du sol). Nous citons à titre d'exemple, les travaux de Ellingwood and Batts, (1982) (cité par Deodatis (1996)), Kiureghian et Neuenhofer (1992) et Dumanogluid et Soyluk (2003) qui ont conclu aux paramètres donnés par les tableaux 4. 1 et 4. 2, respectivement.

La figure 4. 5 illustre l'évolution de cette fonction de densité spectrale de puissance en adoptant les paramètres de DSP1 donnés par le tableau 4. 3. Le mouvement sismique cible aura une accélération maximale de 0.2 g, le déplacement maximal de 0.082 m et une durée de 20 s (Bi et al. 2010; Bi et Hao 2012).

Tableau 4. 1. Paramètres de la fonction de densité spectrale de puissance Kanai-Tajimi filtrée selon Ellingwood and Batts, (1982) (cité par Deodatis (1996)).

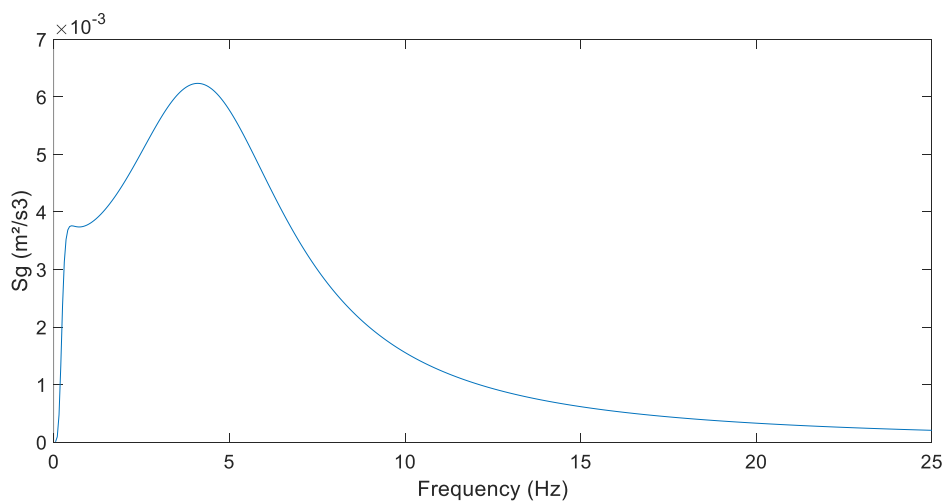
Type du site	ω_g (Hz)	ξ_g	ω_f (Hz)	ξ_f	Γ (cm ² /s ³)
Roche ou sol compact	8π	0.6	0.8π	0.6	62.3
Sols profonds sans cohésion	5π	0.6	0.8π	0.6	99.7
Sols meuble ou très meuble (Argile et sable)	2.4π	0.85	0.24π	0.85	184.5

Tableau 4. 2. Paramètres de la fonction de densité spectrale de puissance Kanai-Tajimi filtrée selon Kiureghian and Neuenhofer (1992) et Dumanogluid and Soyluk (2003).

Type du site	ω_g (Hz)	ξ_g	ω_f (Hz)	ξ_f	Γ (cm ² /s ³)
Sols compacts (denses)	15	0.6	1.5	0.6	17.7
Sols meubles (moyens)	10	0.4	1.0	0.6	26.3
Sols très meuble (souples)	5	0.2	0.5	0.6	36.9

Tableau 4. 3. Paramètres les plus utilisés de la fonction de densité spectrale de puissance Kanai-Tajimi filtrée.

	ω_g (Hz)	ξ_g	ω_f (Hz)	ξ_f	Γ (m ² /s ³)	PGA	PGD	T(s)
DSP1	10π	0.6	0.5π	0.6	0.0034	0.2g	0.082m	20
DSP2	6π	0.6	0.5π	0.6	0.00565	0.2g	/	20
DSP3	10π	0.6	0.5π	0.6	0.022	0.5g	/	20
DSP4	10π	0.6	0.5π	0.6	0.0078	0.3g	/	20
DSP5	10π	0.6	0.5π	0.6	0.0031	0.2g	0.082m	40

**Figure 4. 5.** Fonction de densité spectrale de puissance Kanai-Tajimi filtrée correspondante aux paramètres de DSP1 (Tableau 4. 3).

5.3.2. L'effet d'incohérence

La fonction d'inter-densité spectrale entre deux mouvements $S_{jk}(\omega)$. Elle est reliée aux fonctions de densité spectrale de puissance $S_j(\omega)$ et $S_k(\omega)$ correspondantes au processus

stationnaires $g_j(t)$ et $g_k(t)$, respectivement par la fonction de cohérence (Équation (1. 1)). Cette fonction d'inter-densité spectrale $S_{jk}(\omega)$ est donnée par l'équation (4. 13).

En utilisant la technique de simulation présentée ci-dessus, les mouvements sismiques spatialement variables peuvent être simulés en choisissant un modèle de cohérence parmi une dizaine de modèles déjà prédéfinis dans le programme. D'autres modèles de cohérence dans le programme de simulation peuvent être facilement intégrés.

5.3.3. L'effet de passage d'onde

L'effet de passage d'onde est introduit en post simulation 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 . Elle est exprimée par l'équation (1. 70).

5.3.4. L'effet de site

Cet effet reflète la variabilité spatiale des propriétés du sol de fondation. Par conséquent, pour un site donné, les caractéristiques géotechniques et physiques du sous-sol composant ce site, sa composition géologique ainsi que la nature de l'excitation sismique caractériseront sa réponse sismique. Cette dernière est souvent liée à l'amplification des mouvements sismique suite à une résonance. Plus précisément, cela est nettement perceptible dans le cas où la fréquence propre du site est proche ou coïncide avec la fréquence de l'excitation sismique.

La prise en considération de l'effet de site dans la simulation des mouvements sismiques se fera selon deux considérations. La première a été inspirée de la réglementation parasismique qui stipule que les sites doivent être approchés par un site de paramètres prédéfinis. En effet, les règlements parasismiques fournissent une classification de site. Sur la base cette classification, des spectres de réponse sont calculés.

Les règlements parasismiques donnent une classification des sites de fondation en plusieurs classes. Des paramètres prédéfinis sont affectés pour chacun de ces classes de site, principalement en termes de vitesse de propagation des ondes de cisaillement. Par conséquent, en fonctions des paramètres réels du site, le choix doit être porté à une classe de site définie par le règlement parasismique.

Sur la base de ce principe, le modèle de simulation des mouvements sismiques variables dans l'espace prend en considération l'effet de site qui est modélisé comme étant un site composé par une seule couche de sol défini par des paramètres prédéfinis. Le sol de fondation peut être défini par des paramètres différents d'un appui à un autre c.à.d. que sous chaque appui de la structure, on peut considérer des sites différents. Cette considération de l'effet de site a été incorporée dans la technique de simulation des mouvements sismiques en utilisant la formulation adéquate.

La théorie de propagation des ondes présentée par Wolf (1985) est adoptée dans ce travail pour prendre en considération les effets locaux de site. Pour un site composé par plusieurs couches de sol, la propagation unidimensionnelle des ondes fournit la formulation adéquate.

En exploitant la formulation définie par les équations (3. 29) à (3. 31), correspondante à l'effet de site défini par un sol monocouche ainsi que la formulation conduite par les équations (3. 32) à (3. 38), l'effet de site est modélisé par l'intégration de la fonction de transfert dans la fonction d'inter-densité spectrale. Plus précisément, le vecteur de la fonction de transfert est couplé avec la matrice de densité spectrale de puissance pour donner la matrice d'inter-densité spectrale. Cette dernière comportera trois éléments à savoir, la matrice de densité spectrale de puissance, la matrice de cohérence et le vecteur d'amplification défini par la fonction de transfert.

Considérant deux points j' et k' , situés au substratum rocheux. Leurs projections verticales à la surface sont les points j et k , respectivement.

En considérant la réponse élastique, les fonctions de densité spectrale de puissance et les fonctions d'inter-densité spectrale sont définies par :

$$S_j(\omega) = |H_j(i\omega)|^2 S_g(\omega) ; j = 1, 2, \dots, n \quad (4. 34)$$

$$S_{jk}(\omega) = H_j(i\omega)H_k^*(i\omega)S_{j'k'}(i\omega) ; j \neq k \text{ et } j' \neq k' \quad (4. 35)$$

L'indice « * » représente le conjugué complexe.

$H_j(i\omega)$ et $H_k(i\omega)$ sont les fonctions de transfert au points j et k , respectivement.

$S_g(\omega)$ est la fonction de densité spectrale de puissance à la base rocheuse.

$S_{j'k'}(i\omega)$ est la fonction d'inter-densité spectrale à la base rocheuse. Elle dépend de la fonction de densité spectrale de puissance $S_g(\omega)$ et la fonction de cohérence $\gamma_{jk}(d_{jk}, i\omega)$.

En décomposant la fonction d'inter-densité spectrale à la base rocheuse, les équations (4. 34) et (4. 35) deviennent :

$$S_j(\omega) = |H_j(i\omega)|^2 S_g(\omega) ; j = 1, 2, \dots, n \quad (4. 36)$$

$$S_{jk}(\omega) = H_j(i\omega) H_k^*(i\omega) S_g(\omega) \gamma_{jk}(d_{jk}, i\omega) ; j \neq k \text{ et } j' \neq k' \quad (4. 37)$$

5.4. Synthèse de la technique de simulation de mouvements sismiques spatialement variables

L'organigramme suivant résume les étapes de la technique de simulation des mouvements sismiques spatialement variables. L'approche de simulation inconditionnelle est choisie à titre d'exemple. Le logiciel de programmation Matlab est utilisé pour accomplir l'ensemble de ces étapes suivantes :

1. Introduire les positions (ou coordonnées) des points où les mouvements sismiques seront simulés (nombre des points de 1 à n).
2. Formulation de la fonction de densité spectrale de puissance filtrée de Kanai-Tajimi $S_g(\omega)$ décrite par l'équation (4. 33).
3. Choix des paramètres de la fonction de densité spectrale de puissance filtrée de Kanai-Tajimi en fonction du PGA et de la durée du signal cible : ω_f , ξ_f , ω_g , ξ_g et Γ (Tableaux 4. 1, 4. 2 et 4. 3).
4. Formation du vecteur de la fonction de densité spectrale de puissance filtrée de Kanai-Tajimi $S_g(\omega)$.
5. Formulation de la fonction de cohérence $\gamma_{j'k'}(d_{j'k'}, \omega)$ défini par l'équation (1. 1).
6. Choix du modèle de cohérence (une dizaine de modèles prédéfinis)
7. Formation de la matrice de cohérence.
8. Formation de la matrice d'inter-densité spectrale du mouvement sismique au substratum rocheux formulée par l'équation (4. 20).

9. Formulation de la fonction de transfert décrite par les équations (3. 29) à (3. 31) ou (3. 32) à (3. 38).
10. Choix des paramètres des sites sous chaque point à la surface et ceux du substratum rocheux.
11. Formation de la matrice d'inter-densité spectrale du mouvement sismique à la surface formulée par les équations (4. 36) et (4. 37).
12. Décomposition de la matrice d'inter-densité spectrale du mouvement sismique à la surface en utilisant la décomposition de Cholesky exprimée par l'équation (4. 21).
13. Simulation des processus stochastiques stationnaires $g_j(t)$ à partir des éléments de la matrice $L(\omega)$ comme illustrée par l'équation (4. 22).
14. Introduire la non-stationnarité aux mouvements sismiques simulés en les multipliant par la fonction de modulation choisie (Équations (4. 29), (4. 31) et (4. 32)).
15. Introduire le décalage temporel, caractérisant l'effet de passage d'onde, en fonction de la distance entre les points et la vitesse apparente de propagation des ondes (Équation (1. 70)).
16. Calcul et comparaison des densités spectrales de puissance des mouvements sismiques simulés.

Afin de mieux résumer la technique développée de simulation des mouvements sismiques spatialement variables, nous avons regroupé les principales étapes à effectuer dans un organigramme illustré sur la figure 4. 6.

6. Vérification de la technique de simulation des mouvements sismiques spatialement variables

Afin de procéder à la validation de la technique de simulation de mouvements sismiques spatialement variables, une série de simulations a été effectuée. En outre, plusieurs cas d'étude seront présentés dans le chapitre suivant.

Dans ce chapitre, une application numérique est présentée. L'exemple de vérification est schématisé par trois points, distant de 50 m, situé sur un site plat. Considérons trois points situés à la surface 1, 2 et 3 ; leurs projections au substratum rocheux sont 1', 2' et 3' respectivement. La figure 4. 7 illustre cet exemple.

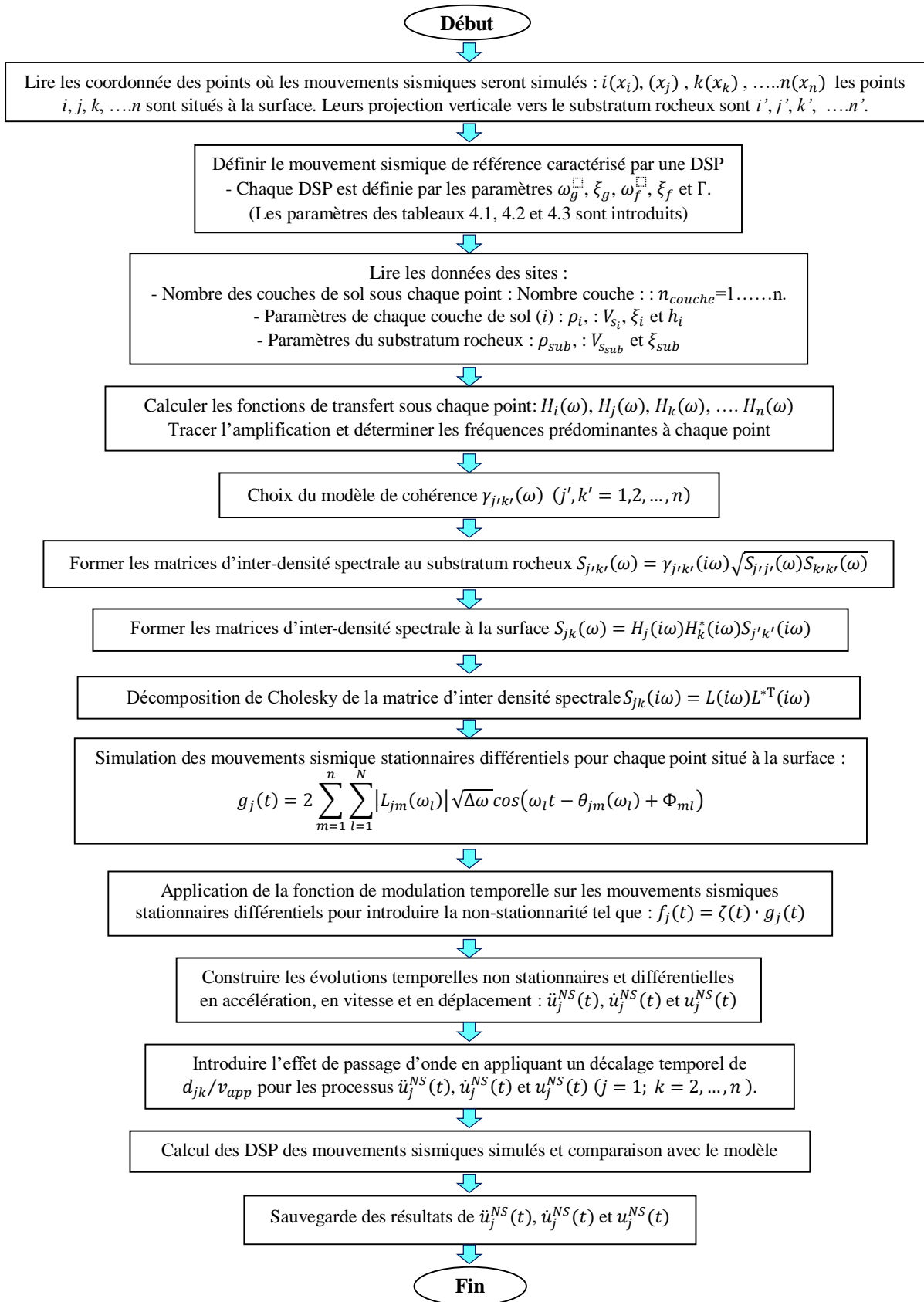


Figure 4. 6. Technique développée de simulation des mouvements sismiques spatialement variables.

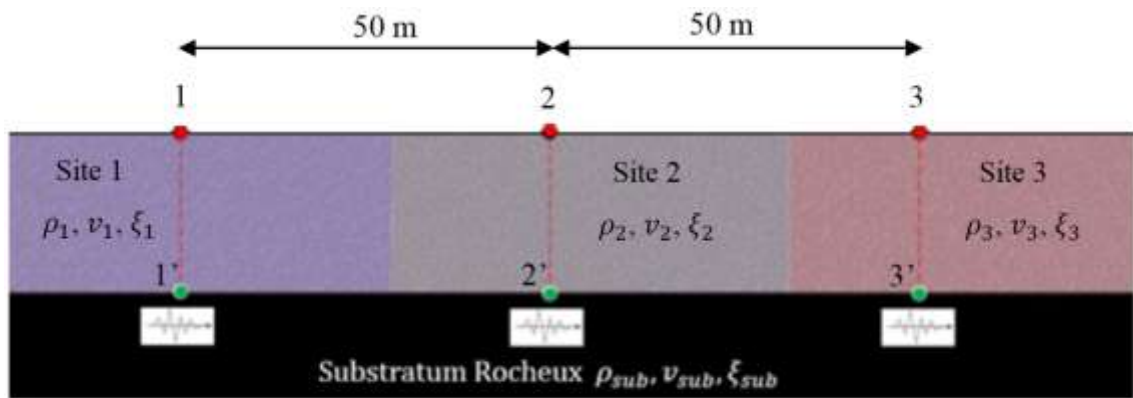


Figure 4. 7. Schéma de l'exemple de vérification.

Dans cet exemple, nous allons opter pour une simulation inconditionnelle. Ainsi, la fonction de densité spectrale de puissance de Kanai-Tajimi sera adoptée en choisissant les paramètres de DSP2 du tableau 4. 3. Pour rappel, les valeurs de ces paramètres ω_g (Hz) = 6π , $\xi_g = 0.6$, ω_f (Hz) = 0.5π , $\xi_f = 0.6$, $\Gamma = 0.00565 \text{ m}^2/\text{s}^3$ correspondent à une accélération maximale de 0.5 g et une durée du signal de 20 s (Hao et al. 1989; Kiureghian et Neuenhofer 1992; Bi et al. 2010). Cette fonction de densité spectrale est illustrée sur la figure 4. 8.

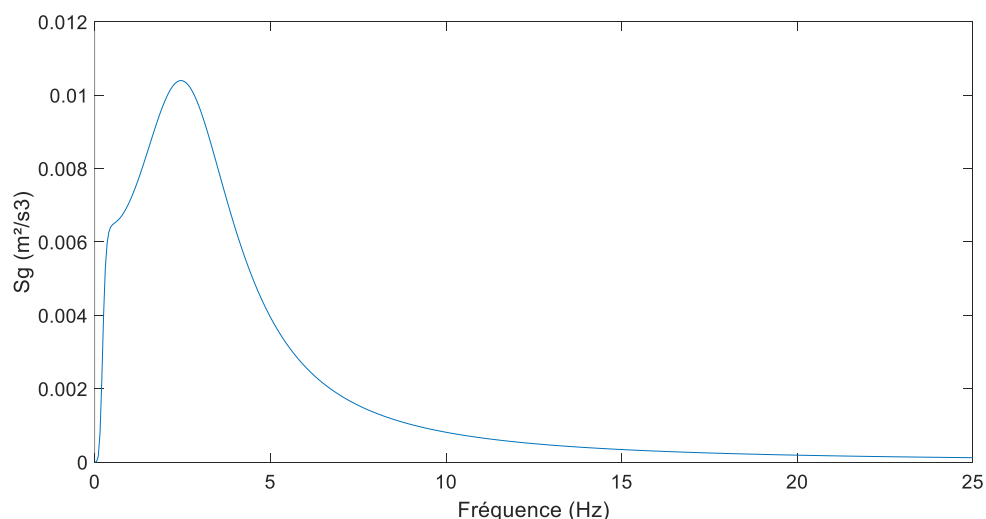


Figure 4. 8. Fonction de densité spectrale de puissance Kanai-Tajimi filtrée adoptée.

Le modèle de Sobczyk (Sobczyk 1991) est utilisé pour définir l'incohérence entre les points étudiés situés à la base rocheuse. Il est donné par l'équation suivante :

$$\gamma_{1'2'}(i\omega) = |\gamma_{1'2'}(i\omega)| e^{\frac{-i\omega d_{1'2'}}{v_a}} = e^{-\beta d_{1'2'}} e^{-\alpha(\omega)\sqrt{d_{1'2'}}\left(\frac{\omega}{2\pi}\right)^2} e^{\frac{-i\omega d_{1'2'}}{v_a}} \quad (4.38)$$

Avec :

$\alpha = 60^\circ$ est l'angle incident des ondes arrivant au site. $\beta = 5 \cdot 10^{-4}$ est un coefficient qui reflète le niveau d'incohérence et $v_a = 1768 \text{ m/s}$ est la vitesse apparente des ondes sismiques (Bi et al. 2010).

Dans ce qui suit, les paramètres du substratum rocheux et des sites adoptés pour la simulation des mouvements sismiques spatialement variables sont donnés par le tableau 4. 5. Dans ce cas, l'amplification du site est illustrée sur la figure 4. 9.

Tableau 4. 4. Fréquences prédominantes et amplifications des sites étudiés.

	Site 1	Site 2	Site 3
Amplification	3.655	5.321	2.831
Fr (Hz)	2.4	0.80	3.55
F_{k=1} (Hz)	2.5	0.83	3.75

Tableau 4. 5. Paramètres des sites et du substratum rocheux adoptés.

Site	Description	Paramètre	Valeur
Substratum rocheux	/	ρ_{sub}	3000 KN/m ³
		v_{sub}	1500 m/s
		ξ_{sub}	5%
Site 1	Meuble	ρ_1	1800 KN/m ³
		v_1	300 m/s
		ξ_1	5%
Site 2	Très meuble	ρ_2	1500 KN/m ³
		v_2	100 m/s
		ξ_2	5%
Site 3	Compact	ρ_3	2000 KN/m ³
		v_3	450 m/s
		ξ_3	5%

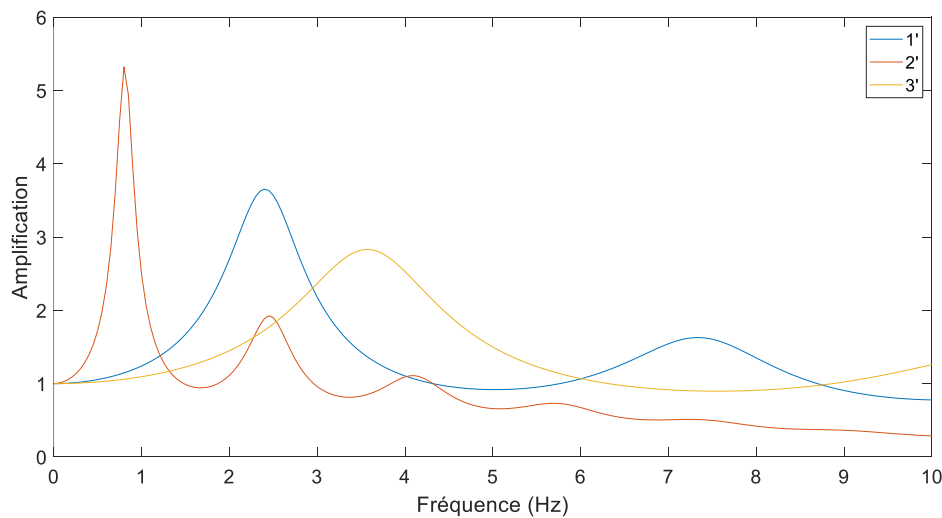


Figure 4. 9. Amplification des sites étudiés.

Nous commençons par calculer les fréquences prédominantes et amplifications des sites étudiés. Une comparaison est établie entre les fréquences issues du programme de simulation et ceux calculées théoriquement en utilisant la formule $f_k = v_s k / 4h$ avec $k = 1$. Les résultats sont exprimés dans le tableau 4. 4. On peut conclure que les fréquences prédominantes calculées par le programme et celle théoriques sont quasi-identiques.

Premièrement, la simulation des signaux sismiques est effectuée sans tenir compte de la variabilité spatiale du mouvement sismique, c.à.d. en négligeant les effets d'incohérence, du passage d'onde et de l'amplification du site. Les mouvements simulés sont supposés complètement cohérents, c'est-à-dire uniformes. Cette étape sert à valider la technique de simulation des signaux sismiques. Les signaux sismiques simulés en accélération, en vitesse et en déplacement sont illustrés sur les figures 4. 10, 4. 11 et 4. 12.

A partir de ces figures, une correspondance parfaite est trouvée entre les signaux simulés en accélération, en vitesse et en déplacement.

Une accélération maximale de 0.24 g, une vitesse maximale de 0.25 m/s et un déplacement maximum de à 0.10 m sont calculés pour les trois signaux distants de 50 m.

Les comparaisons des densités spectrales des mouvements sismiques non-stationnaires et stationnaires simulés avec le modèle de densité spectrale sont illustrées sur les figures 4. 13 et 4. 14, respectivement. Une parfaite correspondance est constatée.

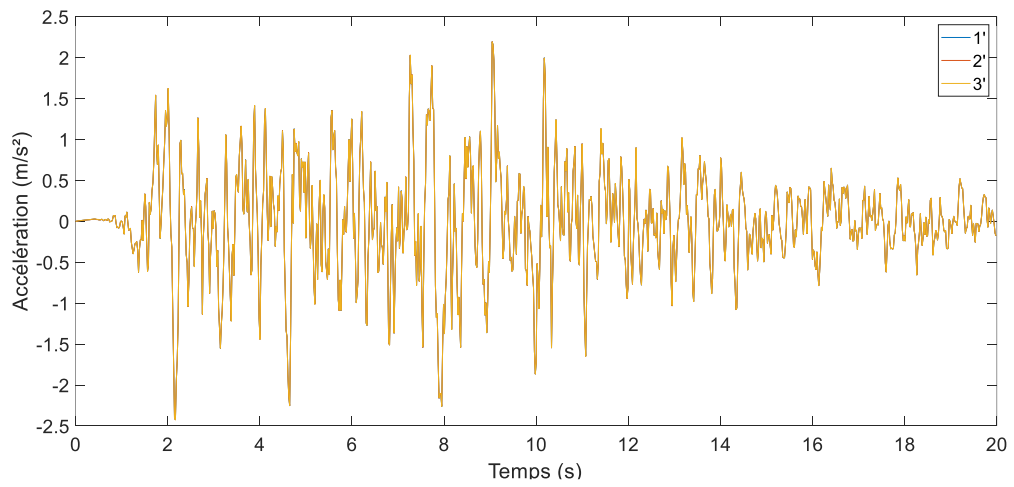


Figure 4. 10. Mouvements sismiques uniformes simulés en accélération.

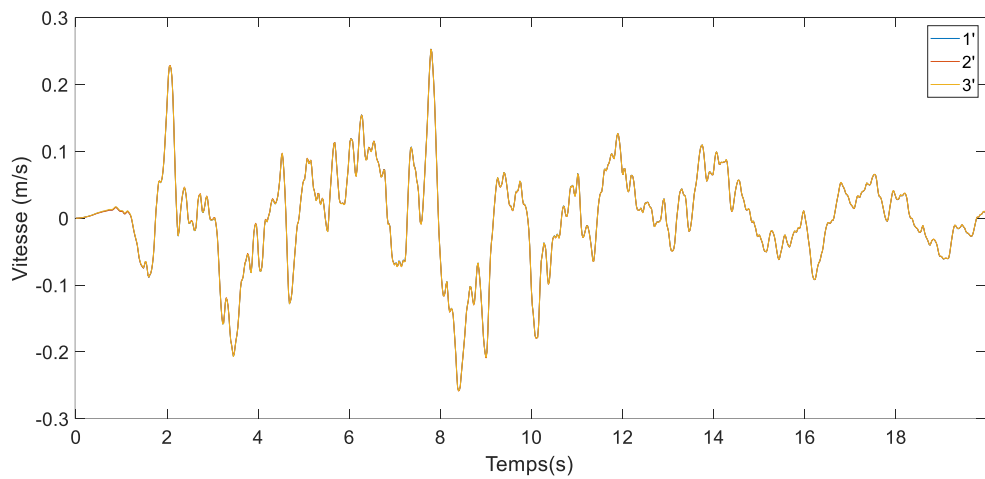


Figure 4. 11. Mouvements sismiques uniformes simulés en vitesse.

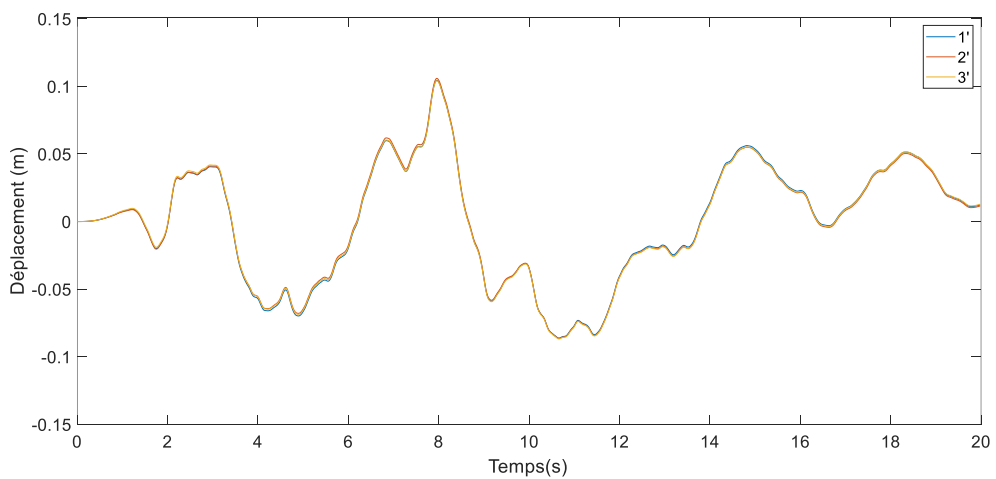


Figure 4. 12. Mouvements sismiques uniformes simulés en déplacement.

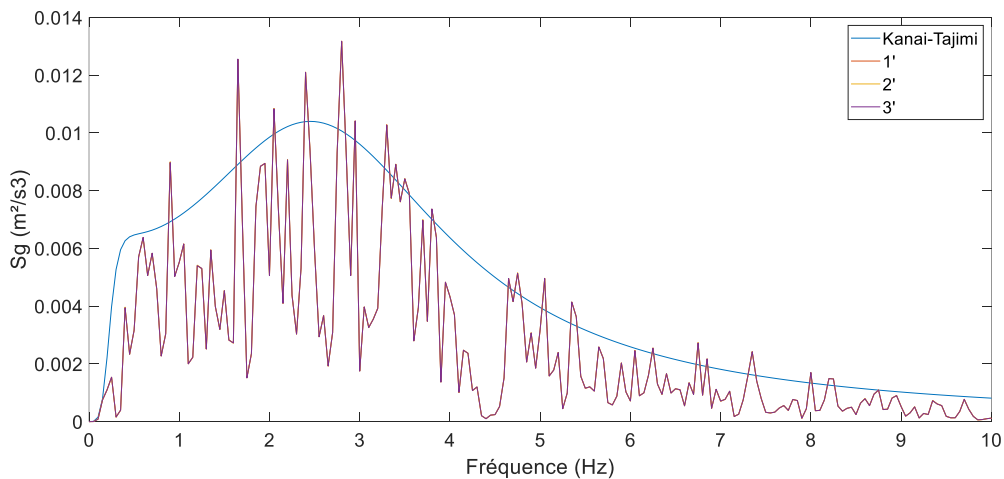


Figure 4. 13. Comparaison des densités spectrales des mouvements sismiques non-stationnaires simulés avec le modèle de densité spectrale.

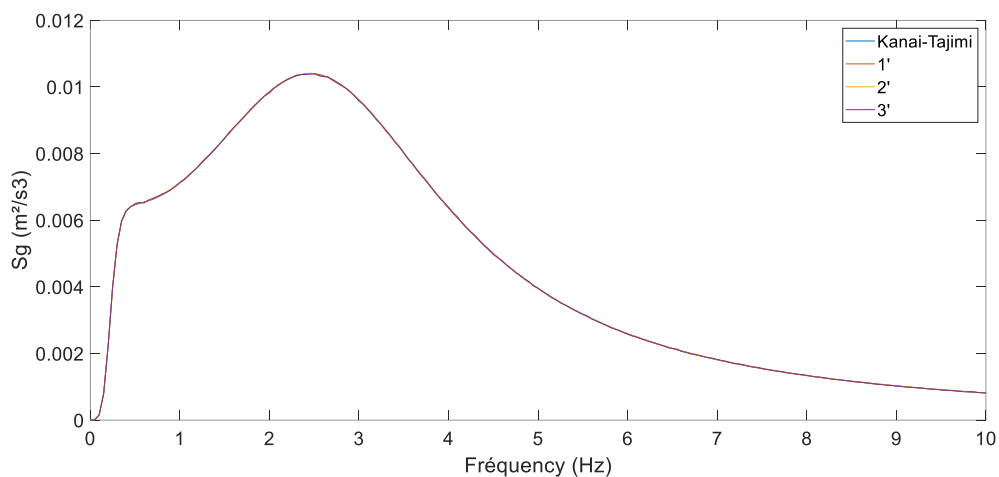


Figure 4. 14. Comparaison des densités spectrales des mouvements sismiques stationnaires simulés avec le modèle de densité spectrale.

Ensuite, les signaux sont simulés au niveau du substratum rocheux, c'est-à-dire en tenant compte des effets d'incohérence et de passage d'onde. L'effet de site est négligé dans ce cas. Les évolutions dans le temps de l'accélération, de la vitesse et du déplacement simulés sont illustrées sur les figures 4. 15, 4. 16 et 4.17, respectivement.

Les accélérations simulées au site 2' et 3' ont un PGA de 0.27 g et 0.25 g, respectivement. Les déplacements simulés au site 2' et 3' ont un PGD de 0.11 m et 0.12 m, respectivement. Alors que le signal simulé sur le site 1' garde les mêmes PGA et PGD que les mouvements sismiques uniformes.

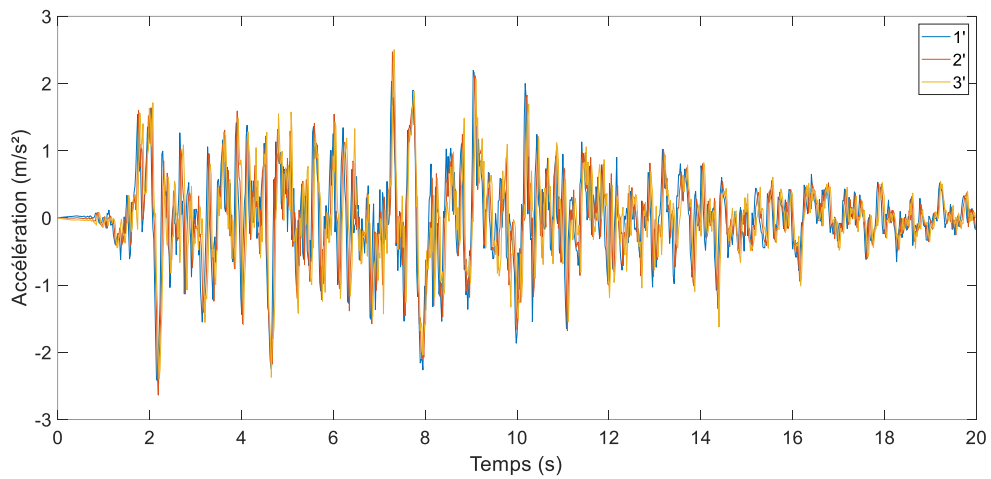


Figure 4. 15. Mouvements sismiques spatialement variables simulés en accélération au substratum rocheux.

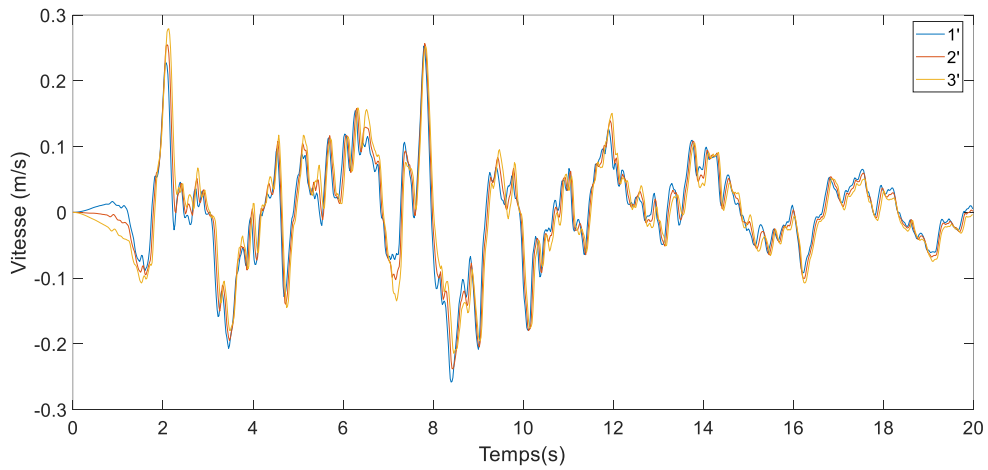


Figure 4. 16. Mouvements sismiques spatialement variables simulés en vitesse au substratum rocheux.

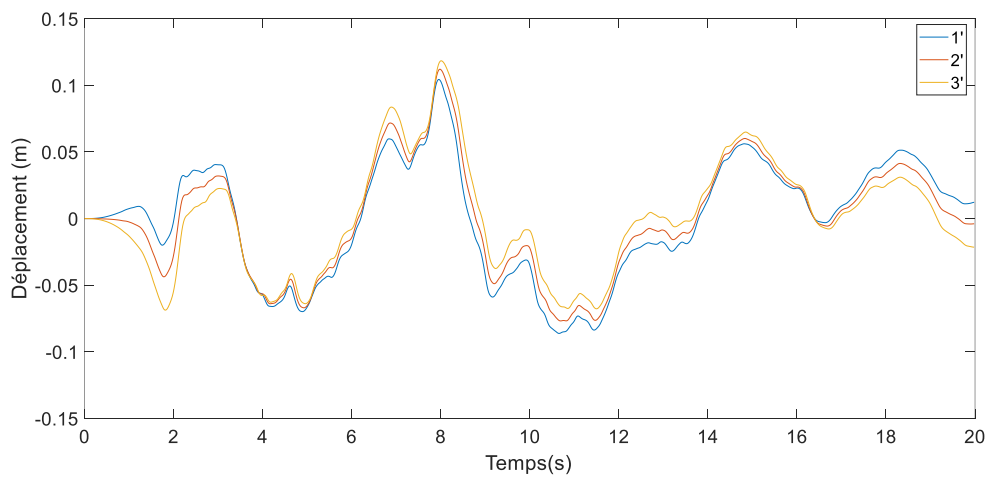


Figure 4. 17. Mouvements sismiques spatialement variables simulés en déplacement au substratum rocheux.

Les densités spectrales de puissance des accélérations non-stationnaires et stationnaires simulées au substratum rocheux sont comparées au modèle de densité spectrale de puissance filtré de Kanai-Tajimi et sont illustrée sur les figures 4. 18 et 4. 19 respectivement. Les trois densités spectrales des signaux simulés sont comparables avec le modèle de Kanai-Tajimi.

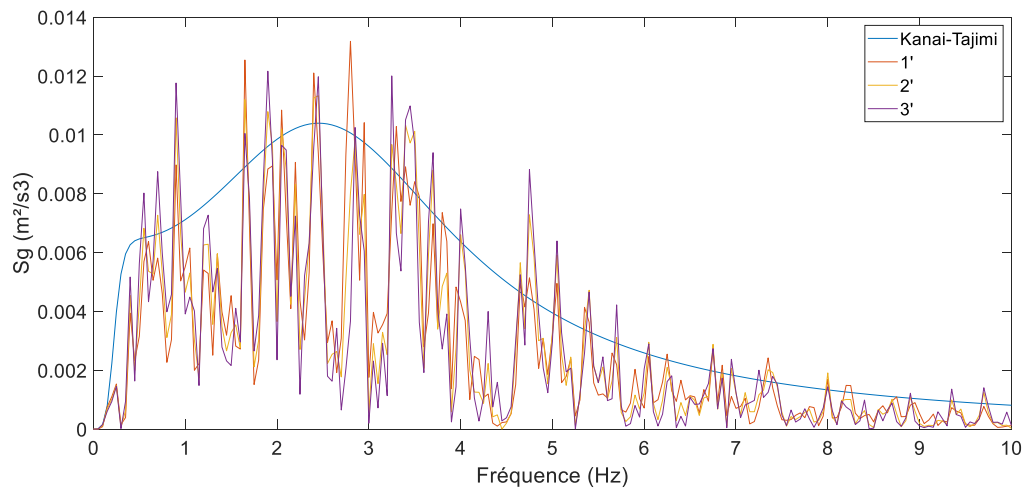


Figure 4. 18. Comparaison des densités spectrale des mouvements sismiques non-stationnaires simulés au substratum rocheux avec le modèle de densité spectrale.

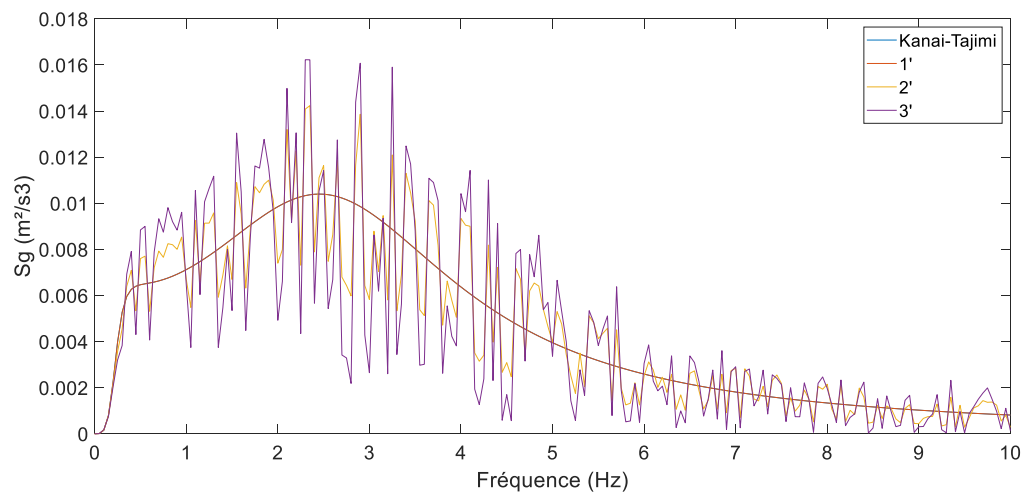


Figure 4. 19. Comparaison des densités spectrale des mouvements sismiques stationnaires simulés au substratum rocheux avec le modèle de densité spectrale.

Finalement, les mouvements sismiques simulés au substratum rocheux sont projetés à la surface du sol par amplification en fonction des paramètres des sites et de la profondeur

de la couche de sol sous chaque point. Les accélérations, vitesses et déplacements simulés à la surface du sol sont illustrés sur les figures 4. 20, 4. 21 et 4. 22, respectivement.

Les accélérations simulées aux points 1, 2 et 3 ont un PGA de 0.41 g, 0.40 g et 0.50 g, respectivement. Les déplacements simulés aux points 1, 2 et 3 ont des PGD de 0.20 m, 0.22 m et 0.14 m, respectivement. L'effet de l'amplification du site sur les mouvements sismiques à la surface est clairement visible.

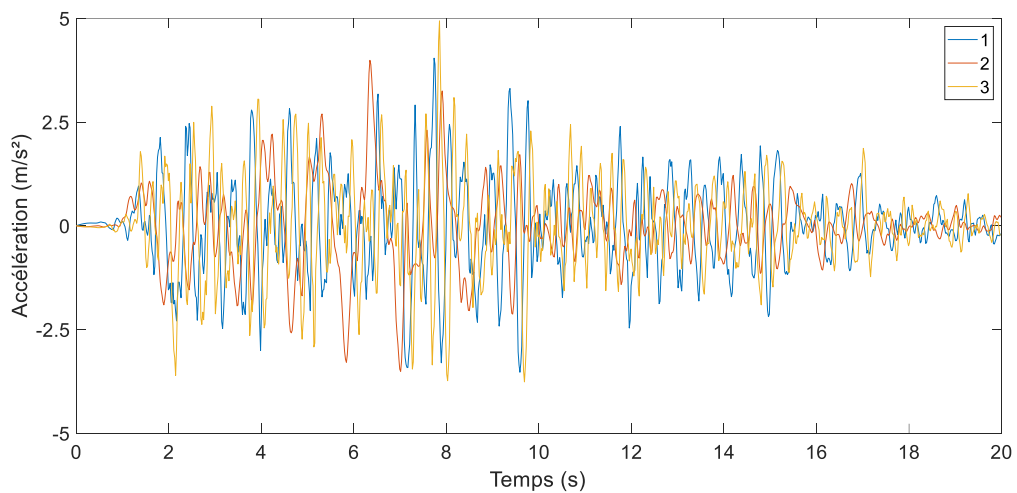


Figure 4. 20. Mouvements sismiques spatialement variables simulés en accélération à la surface.

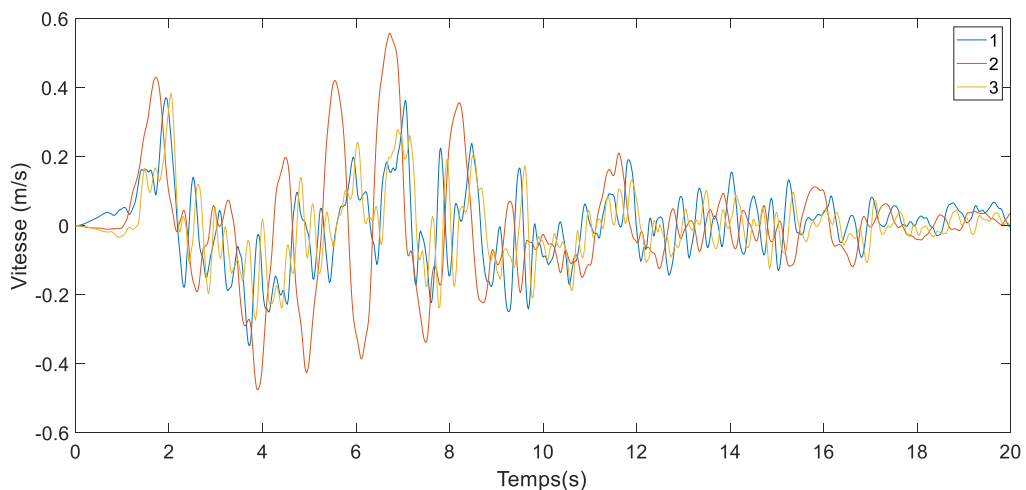


Figure 4. 21. Mouvements sismiques spatialement variables simulés en vitesse à la surface.

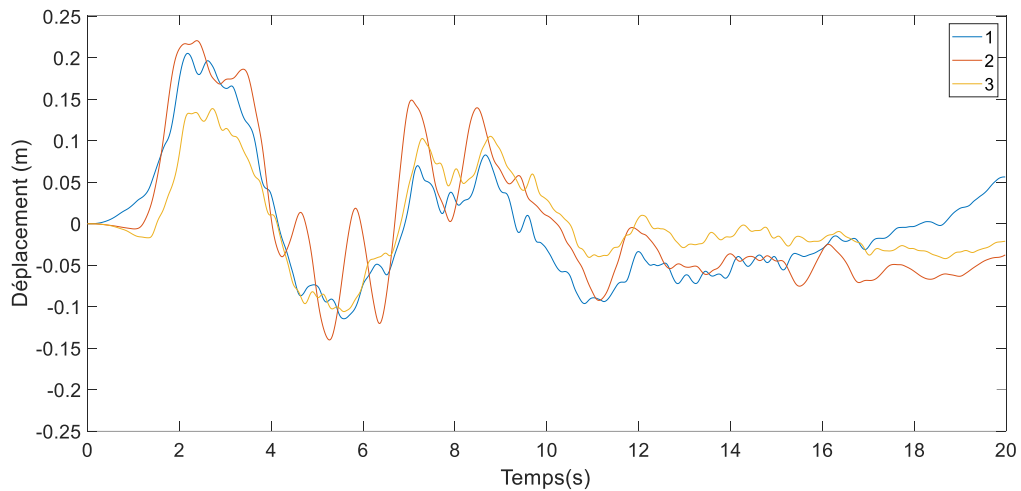


Figure 4. 22. Mouvements sismiques spatialement variables simulés en déplacement à la surface.

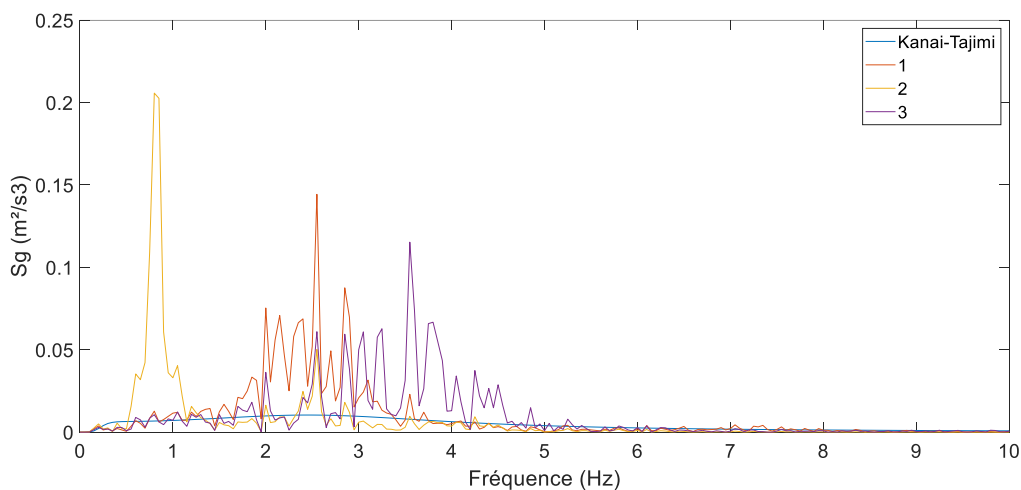


Figure 4. 23. Comparaison des densités spectrales des mouvements sismiques non-stationnaires simulés à la surface avec le modèle de densité spectrale.

Comme le montre les figures 4. 23 et 4. 24, la densité spectrale des accélérations non-stationnaires et stationnaires simulées de la surface sont comparées au modèle de densité spectrale de puissance filtrée de Kanai-Tajimi. Les trois densités spectrales des signaux simulés sont supérieures au modèle Kanai-Tajimi avec des fréquences prédominantes différentes.

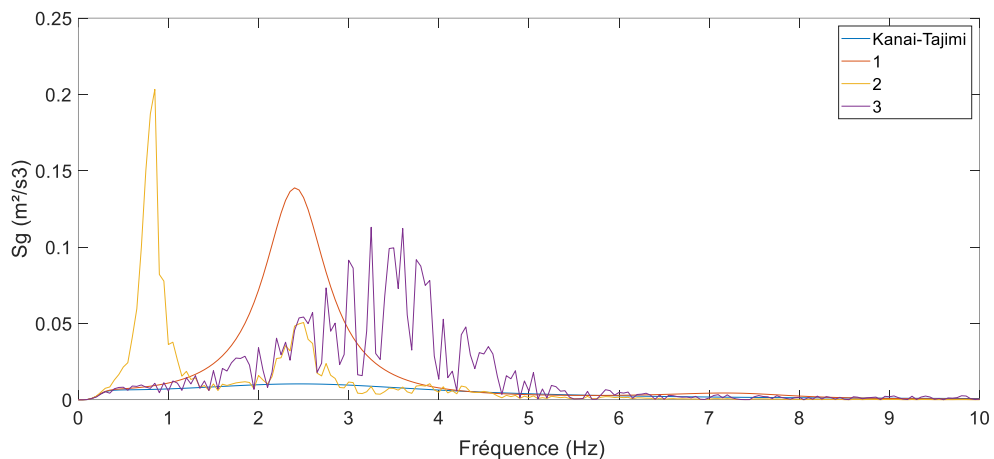


Figure 4. 24. Comparaison des densités spectrales des mouvements sismiques stationnaires simulés à la surface avec le modèle de densité spectrale.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, un aperçu sur quelques méthodes de simulation des mouvements sismiques spatialement variables a été fourni. Parmi ces méthodes de simulation, un intérêt particulier a été porté à celles traitant l'effet de site.

Ensuite, les approches de simulation des mouvements sismiques ont été décrites. Il convient de rappeler que l'approche conditionnelle, basée sur un accélérogramme cible, présente un inconvénient majeur. En effet, la variabilité observée dans les mouvements sismiques simulés augmente avec la distance, cependant, cette variabilité pour une simulation inconditionnelle est uniforme. Cette dernière propriété est très recherchée lors de l'analyse statistique de la réponse sismique des structures.

La technique de simulation des mouvements sismiques a été présentée en commençant par décrire la simulation des mouvements stationnaires, puis l'intégration de la non-stationnarité aux mouvements sismiques simulés. Finalement, la prise en compte de la variabilité spatiale et temporelle du mouvement sismique a été détaillée.

Le logiciel de programmation Matlab a été utilisé pour mener les multiples étapes de cette technique de simulation des mouvements sismiques spatialement variables. Un organigramme, décrivant les différentes étapes à entreprendre dans le cas d'une simulation inconditionnelle, a été présenté.

A la fin de ce chapitre, une série de simulations des signaux sismiques a été réalisée dont un exemple de simulation inconditionnelle. Un examen des évolutions temporelles des accélérations, vitesses et déplacements simulés et de la comparaison des densités spectrales avec le modèle de DSP adopté a été réalisé.

Nous avons conclu que le mouvement sismique peut varier sous des excitations sismiques différentielles en adoptant que les effets d'incohérence et de passage d'onde. Cependant, la variation devient considérable dès que l'effet de site est intégré, en plus des autres effets de la variabilité spatiale du mouvement sismique. Par conséquent, on peut conclure que le fait de négliger l'effet de site conduit à une sous-estimation des excitations sismiques.

Dans le chapitre suivant des cas d'études de ponts sont étudiés. En effet, deux phases sont entreprises. La première partie consiste à simuler les mouvements sismiques spatialement variables en adoptant plusieurs cas de simulation. Tandis que la deuxième partie concernera l'application des chargements sismiques simulés aux structures de ponts. L'influence de ces chargements différentiels sera examinée.

Chapitre 5.

Analyse de la variabilité spatiale des mouvements sismiques avec prise en compte de l'effet de site : Simulations et réponses dynamiques

1. Introduction

La technique de simulation des mouvements sismiques spatialement variables a été présentée dans le quatrième chapitre. Cette technique de simulation prend en compte la variabilité spatiale du mouvement sismique avec tous ses facteurs à savoir les effets d'incohérence, de passage d'onde et les conditions géologiques locales du site. Dans ce travail, un intérêt particulier est porté sur l'effet de site défini par les variations des conditions locales du sol. Une série de vérification de la technique de simulation des mouvements sismiques variables dans l'espace a été réalisée. Un exemple numérique est déjà présenté dans le chapitre précédent en adoptant une simulation inconditionnelle. D'autres applications de simulation de mouvements sismiques spatialement variables seront traitées où plusieurs cas de chargement sismiques seront adoptés.

Les cas d'étude présentés dans ce chapitre consistent à entreprendre deux phases. Au niveau de la première, les mouvements sismiques seront simulés en adoptant un ou plusieurs facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique. En effet, plusieurs cas de chargements sismiques vont être simulés.

La deuxième phase consiste à appliquer ces cas de chargements sismiques à des modèles tridimensionnels de structures étendues. D'autres études concernent également des structures moyennement courtes. Dans cette deuxième phase, les réponses dynamiques des structures sont analysées et comparées. Une estimation de l'influence de chaque facteur est établie.

La variabilité spatiale du mouvement sismique sera prise en considération dans la technique de simulation des signaux sismiques spatialement variables. En effet, les modèles de cohérence les plus utilisés sont numérotés et intégrés dans le programme de simulation. Un simple choix de numéro définira le modèle de cohérence étudié. De cette manière, le modèle de cohérence est pris en compte dans le programme de simulation.

Quant à l'effet de passage d'onde, il s'agit de procéder à un décalage temporel à la fin de simulation aux signaux sismiques simulés. Ce décalage appelé aussi retard dépend de la distance entre les points où les signaux sismiques doivent être simulés et de la vitesse apparente de propagation des ondes sismiques.

Le troisième facteur de la variabilité spatiale du mouvement sismique qui est l'effet de site est modélisé en adoptant deux considérations. La première se base sur la classification des sites donnée par les codes parasismiques, où des paramètres prédéfinis sont affectés à chaque classe de site, principalement en termes de vitesse de propagation des ondes de cisaillement (l'annexe B présente les classifications de quelques codes parasismiques ainsi qu'une classification très utilisée en littérature). Par conséquent, en fonction des paramètres réels du site, le choix doit être approché, ensuite orienté vers une classe de site définie par les codes parasismiques. En se basant sur ce principe, le modèle de simulation des signaux sismiques variables prend en compte l'effet de site modélisé comme étant un sol monocouche caractérisé par des paramètres prédéfinis.

Les codes parasismiques présentent un inconvénient majeur où un seul type de site pourra être choisi pour l'ensemble des appuis de la structure étudiée. Par contre, dans la technique de simulation présentée, les appuis de la structure étudiée pourront avoir différents types de sites. Plus précisément, si les conditions géologiques changent d'un appui à un autre, cette variation pourra être prise en considération dans le programme de simulation.

La deuxième considération de l'effet de site est une modélisation d'un sol multicouche. C'est-à-dire que le cas réel sera étudié conformément aux résultats de la reconnaissance géotechnique réalisée in-situ. En effet, le calcul de la fonction de transfert est fait pour chaque couche et dépend du nombre de couches à considérer. Une formulation simplifiée pour la pratique de calcul parasismique par les ingénieurs doit être investie.

2. Choix de l'approche de simulation et définition des cas de simulation des mouvements sismiques

Nous avons vu que l'approche de simulation inconditionnelle, caractérisée sur une densité spectrale de puissance, présente un avantage majeur, celui où la variabilité observée est uniforme dans l'ensemble des sites où les signaux sismiques devraient être simulés. Par contre, l'approche conditionnelle, basée sur un accélérogramme cible, donne lieu à une variabilité qui accroît avec la distance, ce qui présente un inconvénient lors de l'analyse statistique des réponses dynamiques des structures. En effet, plusieurs chercheurs ont

insisté sur le fait que les signaux sismiques artificiels sont très bénéfiques pour l'analyse dynamique des structures étendues (Konakli et Der Kiureghian 2011, 2012). Pour cette raison très persuasive, l'approche inconditionnelle sera adoptée dans les applications numériques et les cas d'études présentés dans ce chapitre.

En utilisant la technique de simulation décrite dans le quatrième chapitre, les mouvements sismiques artificiels sont simulés en accélération et en déplacement. Des cas de simulation en prenant en compte la variabilité spatiale du mouvement sismique sont choisis afin de distinguer l'influence de chaque facteur de cette variabilité. La combinaison de tous les facteurs de la variabilité spatiale sismique est également adoptée. Une quantification de l'impact de ces facteurs induisant cette variabilité est très souhaitée, en particulier celle qui est reliée à l'effet de site.

Il convient de noter que le cas de simulation uniforme, où tous les points auront le même mouvement sismique est également utilisé pour des raisons de validation de la technique de simulation et de comparaison. En effet, quatre cas de simulation sont considérés :

- Le premier cas néglige la variabilité spatiale du mouvement sismique 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'impact 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 variabilité spatiale du mouvement sismique. C'est le cas de chargement sismique le plus réaliste. Dans ce cas, les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique sont combinés.

Le tableau 5.1 schématise les cas de simulation à réaliser.

Tableau 5. 1. Cas de simulation des signaux sismiques.

N°	Cas de chargement sismique	Variabilité spatiale du mouvement sismique		
		Incohérence des ondes sismiques	Passage d'onde	Effet de site
1	Uniforme	O	O	O
2	Négligeant l'effet de site	X	X	O
3	Ne considérant que l'effet de site	O	O	X
4	Considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique	X	X	X
X : Facteur considéré		O : Facteur négligé		

3. Modélisation de l'effet de site par un sol monocouche

Dans cette partie, des applications numériques sont présentées. En utilisant la technique de simulation développée dans le chapitre 5, les mouvements sismiques spatialement variables sont simulés en adoptant l'approche inconditionnelle. La fonction de densité spectrale de puissance filtrée de Kanai-Tajimi est utilisée où différents signaux sismiques de référence pourront être calculés. L'effet de site est modélisé par un sol monocouche. Les caractéristiques du sol seront inspirées de classification donnée par le code parasismique algérien des ouvrages d'art (RPOA) (MTP 2010).

Il convient de noter que chaque application comportera plusieurs simulations en fonction des cas traités : le cas uniforme, le cas adoptant les facteurs de l'incohérence et de passage d'onde, le cas de l'effet de site seul et bien sûr le dernier cas où tous les facteurs de la variabilité sont combinés.

Il convient également de rappeler que la non-stationnarité est introduite par application de la fonction de modulation temporelle de Jennings et al. (1968).

Dans le cadre de validation du programme de simulation des signaux sismiques spatialement variables, plusieurs applications ont été réalisées, Néanmoins, nous nous limiterons à présenter deux applications de simulation (d'autres applications sont présentée dans l'annexe C). La première consiste à simuler, pour un portique de pont, les mouvements sismiques correspondants à ses deux supports, distants de 100 m. Au niveau de la seconde application, la demande sismique d'un pont supporté par trois piles distantes de 100 m, sera étudiée.

Nous avons également procédé à l'analyse de la réponse dynamique de trois ponts (deux ponts ferroviaires en béton armé et le pont à haubans de Mila) sous chargement sismique différentiel. Ces études comportent deux étapes. Au niveau de la première, les mouvements sismiques spatialement variables sont simulés en fonction de la configuration du site adoptée et de la distance de séparation entre les appuis des ponts.

3.1. Simulation du chargement sismique d'un portique de pont supporté par deux piles

Cette première application est basée sur un portique de pont. Elle consiste à simuler des mouvements sismiques spatialement variables à deux points situés à la surface qui représentent les extrémités inférieures des piles.

3.1.1. Caractéristiques géométriques de l'exemple

Considérant un portique de pont supporté par deux piles. La travée entre ces deux piles a une longueur de 100 m. Les deux points, correspondants aux extrémités inférieures des piles, j et k sont localisés à la surface. Leurs projection verticale au substratum rocheux sont j' et k' , respectivement (Figure 5. 1).

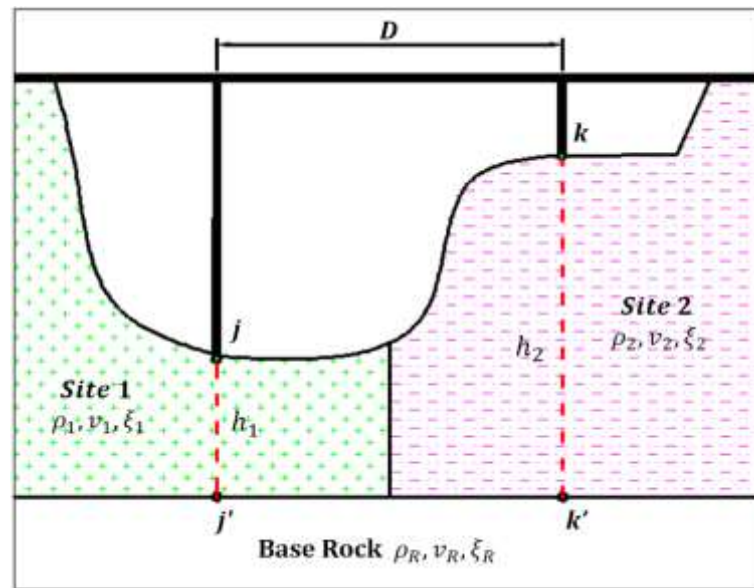


Figure 5. 1. Vue schématique du portique de pont implanté sur un site monocouche.

3.1.2. Densité spectrale de puissance de cible

Comme mentionné ci-dessus, La fonction de densité spectrale de puissance filtrée de Kanai-Tajimi est adoptée (Équation (4. 33)). Les paramètres de cette fonction sont donnés par DSP1 (Voir tableau 4. 3) qui correspondent à $\omega_f = 0.5\pi$, $\xi_f = 0.6$, $\omega_g = 10\pi$, $\xi_g = 0.6$, $\Gamma = 0.034 \text{ m}^2/\text{s}^3$. En utilisant ces valeurs, le mouvement sismique de référence correspond à une accélération maximale (PGA) de 0.2 g, un déplacement maximal (PGD) de 0.082 m et une durée de 20 s. La densité spectrale de puissance des mouvements sismiques au substratum rocheux est illustrée sur la figure 5. 2.

3.1.3. Caractéristiques des sites

Les sites sont composés d'un sol monocouche sur le substratum rocheux avec des caractéristiques et des épaisseurs différentes sous chaque appui. Sur la base de la classification des sites donnée par le code parasismique algérien des ouvrages d'art (MTP 2010), la moyenne des vitesses de propagation des ondes de cisaillement est adoptée dans la définition des paramètres des sites de cette application (Annexe B). Les paramètres du substratum rocheux et des sites choisis, à savoir, la densité ρ , la vitesse de propagation des ondes de cisaillement v_s , et le coefficient d'amortissement ξ sont donnés par le

tableau 5. 2. Les indices R, F, M et S représentent le substratum rocheux, un sol compact (Firm), un sol meuble (medium) et un sol très meuble (soft), respectivement.

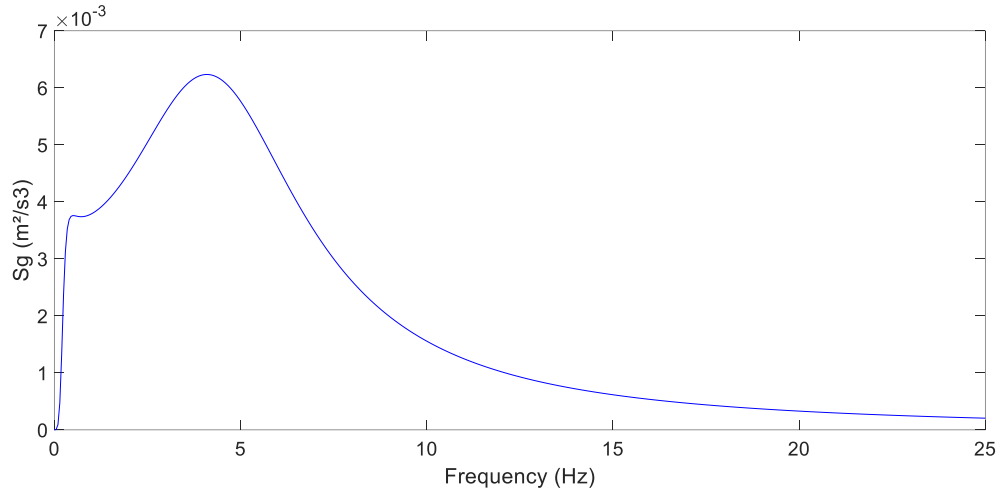


Figure 5. 2. Densité spectrale de puissance des mouvements sismiques au substratum rocheux.

Tableau 5. 2. Paramètres du substratum rocheux et des sites adoptés.

Site	Description	Paramètre	Valeur
Substratum rocheux	/	ρ_R	3000 KN/m ³
		v_R	1500 m/s
		ξ_R	5%
Site S2	Compact	ρ_F	2000 KN/m ³
		v_F	450 m/s
		ξ_F	5%
Site S3	Meuble	ρ_M	1800 KN/m ³
		v_M	300 m/s
		ξ_M	5%
Site S4	Très meuble	ρ_S	1500 KN/m ³
		v_S	150 m/s
		ξ_S	5%

3.1.4. Choix du modèle de Cohérence

Le modèle de Sobczyk (1991) est choisi pour définir l'incohérence entre les points j' et k' , situés au substratum rocheux. Ce modèle est décrit par les équations (1. 40) et (1. 41). Sachant que l'angle incident des ondes sismique $\alpha = \pi/3$, le coefficient $\beta = 5 \cdot 10^{-4}$ et la vitesse apparent des ondes sismiques $v_{app} = 1768 \text{ m/s}$ (Bi et al. 2010).

3.1.5. Etude paramétrique en fonction de l'épaisseur de la couche de sol et du type du site

L'effet de l'épaisseur de la couche de sol sur l'amplification des mouvements sismiques simulés est examiné. A cet égard, cinq différentes épaisseurs variant de 0 à 50 m et trois types de site, à savoir, un site compact, un site meuble et un site très meuble, sont adoptés.

Pour chaque type de site, les évolutions de l'amplitude de l'amplification en fonction de la fréquence, définies également comme des fonctions de transfert, sont illustrées sur les figures 5. 3, 5. 4 et 5. 5. Sur ces figures, la variation de la profondeur pour un même type de site donne lieu à des fonctions de transfert différentes.

Les fréquences calculées par la technique de simulation, notées F_r , et ceux calculées théoriquement en utilisant la formule $f_k = v_s k / 4h$ avec $k = 1$, notées $F_{k=1}$, sont donné par les tableaux 5. 3, 5. 4 et 5. 5. Une parfaite concordance est constatée lors de la comparaison de ces fréquences.

En considérant un site compact sous les deux piles du portique de pont, les fréquences prédominantes F_r et $F_{k=1}$ pour différentes épaisseurs de la couche de sol sont données par le tableau 5. 3. L'amplitude de l'amplification pour un sol compact est de 2.83 (Figure 5. 3).

Tableau 5. 3. Fréquences prédominantes en considérant un sol compact.

Epaisseur (m)	0	10	20	30	50
F_r (Hz)	0	10.70	5.35	3.55	2.20
$F_{k=1}$ (Hz)	0	11.25	5.62	3.75	2.25

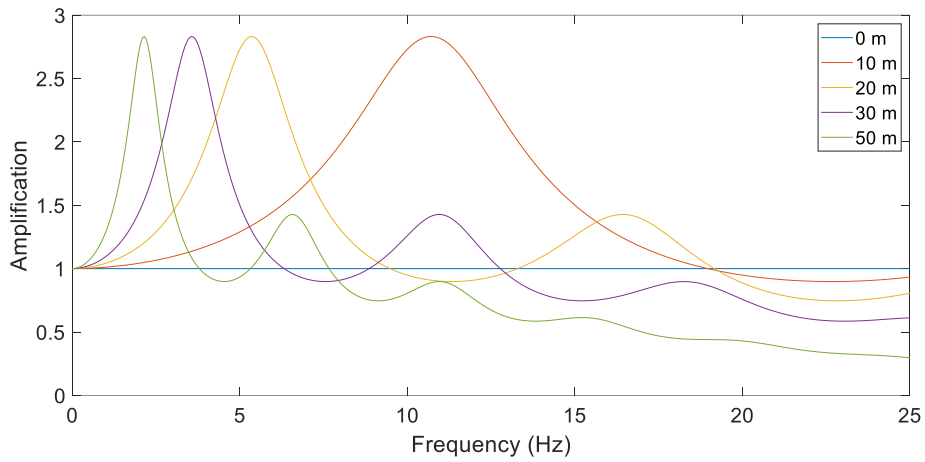


Figure 5. 3. Fonctions de transfert pour un site compact en fonction de l'épaisseur de la couche de sol.

Tandis que adopter un site meuble sous les points j et k , les fréquences prédominantes F_r et $F_{k=1}$ pour différentes épaisseurs de la couche de sol sont données par le tableau 5. 4. L'amplitude de l'amplification pour un site meuble est de 3.66 (Figure 5. 4).

Tableau 5. 4. Fréquences prédominantes en considérant un site meuble.

Epaisseur (m)	0	10	20	30	50
F_r (Hz)	0	7.20	3.60	2.40	1.45
$F_{k=1}$ (Hz)	0	7.50	3.75	2.50	1.50

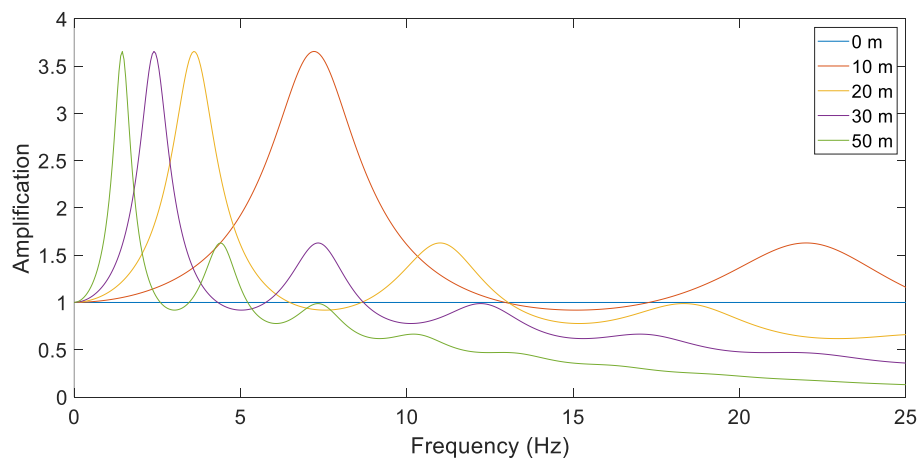


Figure 5. 4. Fonctions de transfert pour un site meuble en fonction de l'épaisseur de la couche de sol.

Considérons un site très meuble sous les points j et k , situés à la surface, les fréquences prédominantes F_r et $F_{k=1}$ pour différentes épaisseurs de la couche de sol sont données par le tableau 5. 5. L'amplitude de l'amplification pour un site très meuble est de 4.91 (Figure 5. 5).

Tableau 5. 5. Fréquences prédominantes en considérant un site très meuble.

Épaisseur (m)	0	10	20	30	50
F_r (Hz)	0	3.65	1.80	1.20	0.75
$F_{k=1}$ (Hz)	0	3.75	1.87	1.25	0.75

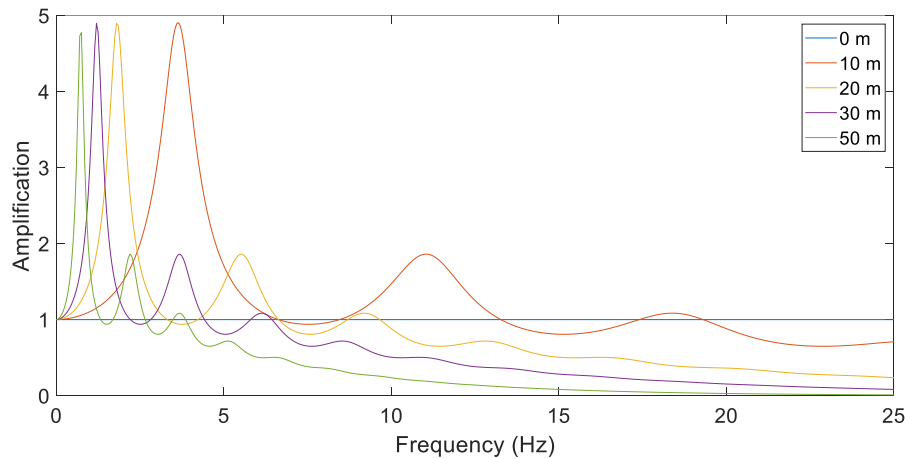


Figure 5. 5. Fonctions de transfert pour un site très meuble en fonction de l'épaisseur de la couche de sol.

A partir des figures 5. 3, 5. 4 et 5. 5, nous concluons que plus l'épaisseur de sol est grande plus le site est souple et plus la fréquence prédominante est petite.

Cette conclusion est appuyée par les figures 5. 6 et 5. 7, où la première figure représente l'amplitude de l'amplification pour un site très meuble au point j et un site meuble au point k avec une épaisseur de de 10 m et 20 m respectivement. La seconde figure représente l'amplitude de l'amplification pour un site très meuble au point j et un site compact au point k avec une épaisseur de de 10 m et 30 m respectivement. Dans ces deux cas, les fréquences prédominantes sont quasi-identiques (Tableaux 5. 6 et 5. 7).

Tableau 5. 6. Fréquences prédominantes
(point j : très meuble, $h=10$ m ; point k : meuble, $h=20$ m).

Sites	Très meuble	Meuble
Épaisseur (m)	10	20
F_r (Hz)	3.65	3.60
$F_{k=1}$ (Hz)	3.75	3.75

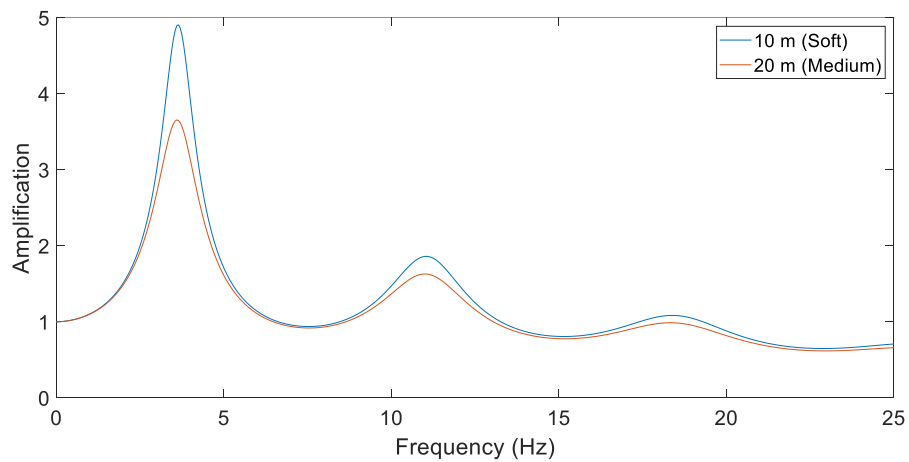


Figure 5. 6. Fonctions de transfert pour un site très meuble au point j avec une épaisseur : $h=10$ m et un site meuble au point k avec une épaisseur : $h=20$ m.

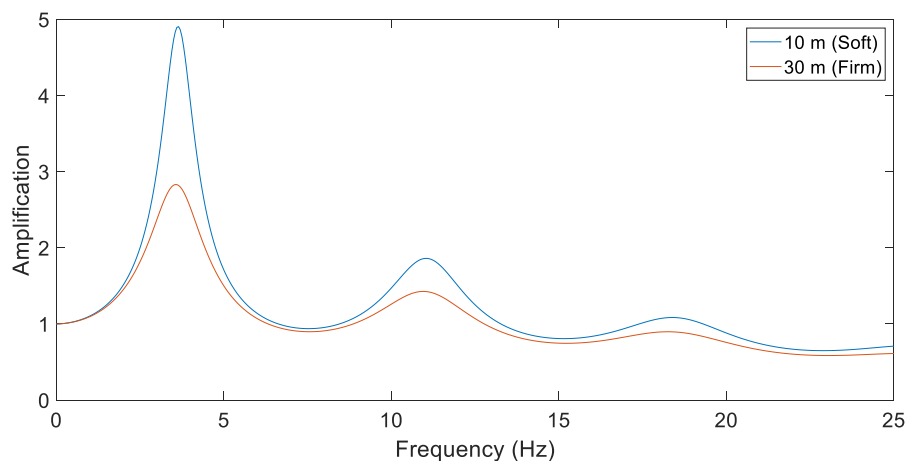


Figure 5. 7. Fonctions de transfert pour un site très meuble au point j avec une épaisseur : $h=10$ m et un site compact au point k avec une épaisseur : $h=30$ m.

Tableau 5. 7. Fréquences prédominantes
(point j : très meuble, $h=10$ m ; point k : compact, $h=30$ m).

Sites	Très meuble	Meuble
Epaisseur (m)	10	30
F_r (Hz)	3.65	3.55
$F_{k=1}$ (Hz)	3.75	3.75

3.1.6. Choix de sites adoptés pour la simulation des mouvements sismiques

Dans l'exemple étudié, différents sites sont adoptés sous les fondations des deux piles du portique du pont étudié. Ainsi, les paramètres correspondants à cette configuration sont récapitulés par le tableau 5. 8. Dans ce cas, la fonction de transfert est illustrée sur la figure 5. 8.

En premier lieu, la simulation des signaux sismiques est établie sans tenir compte de la variabilité spatiale du mouvement sismique, c.à.d. en négligeant les effets d'incohérence, du passage d'onde et de l'amplification du site. Les mouvements sismiques simulés sont supposés complètement cohérents (uniformes). Cette étape sert à valider la technique de simulation des mouvements sismiques.

Tableau 5. 8. Paramètres des sites adoptés pour l'exemple étudié.

	Description	Paramètres	Valeur
Site 1	Meuble	ρ_1	1800 KN/m^3
		v_1	300 m/s
		ξ_1	5%
		h_1	10 m
Site 2	Compact	ρ_2	2000 KN/m^3
		v_2	450 m/s
		ξ_2	5%
		h_2	30 m

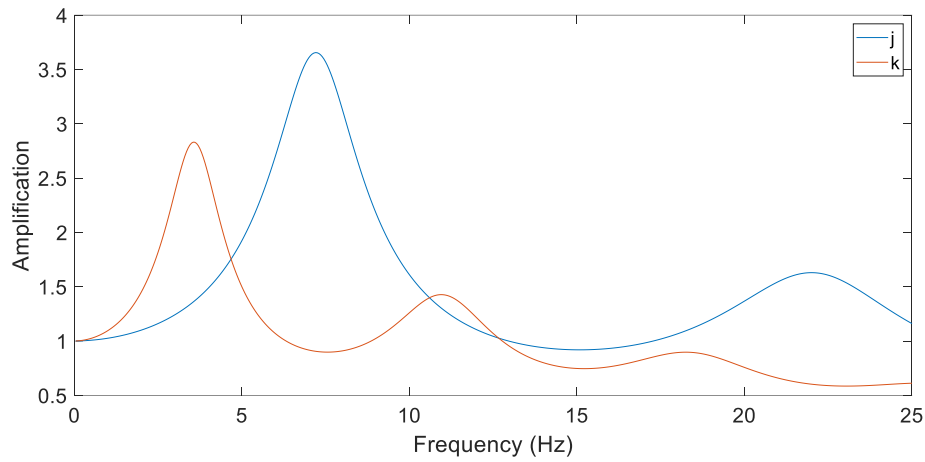


Figure 5. 8. Fonctions de transfert de l'exemple étudié.

Dans ce qui suit, les paramètres des sites adoptés pour la simulation des mouvements sismiques spatialement variables sont donnés par le tableau 5. 8. Dans ce cas, l'amplitude de l'amplification du site est illustrée sur la figure 5. 8.

Les mouvements sismiques simulés en accélération et en déplacement sont illustrés sur les figures 5. 9 et 5. 10, respectivement. A partir de ces figures, une parfaite correspondance est constatée entre les signaux simulés en accélération avec un PGA de 0.23 g et en déplacement avec un PGD de 0.089 m.

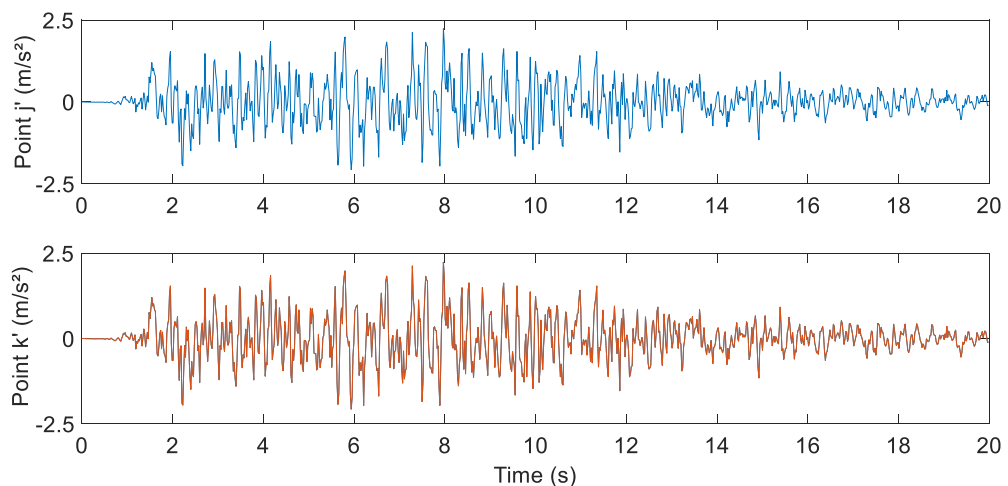


Figure 5. 9. Mouvements sismiques uniformes simulés en accélération.

Ensuite, les signaux sismiques sont simulés au niveau du substratum rocheux, c.à.d. en tenant compte des effets de l'incohérence et de passage d'onde. L'effet de site est négligé dans ce cas. Les accélérations et déplacements simulés sont illustrés sur les figures 5. 11 et 5. 12, respectivement.

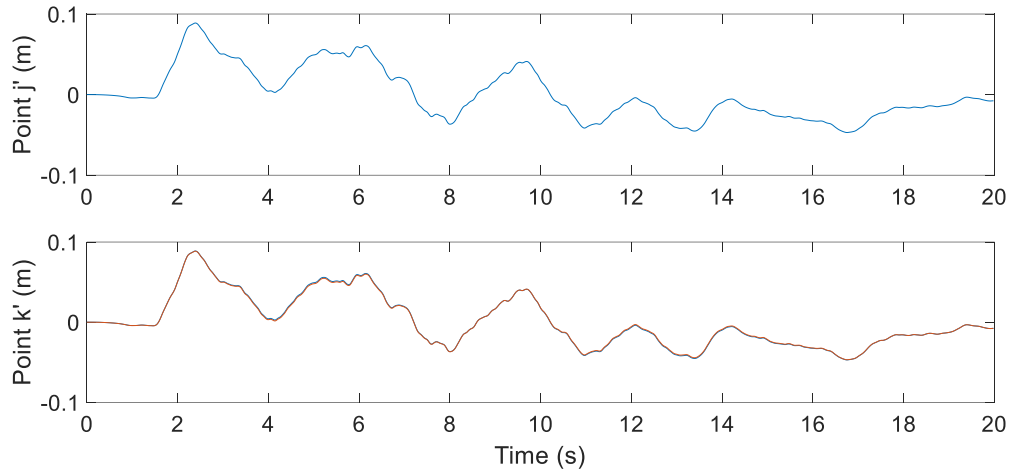


Figure 5. 10. Mouvements sismiques uniformes simulés en déplacement.

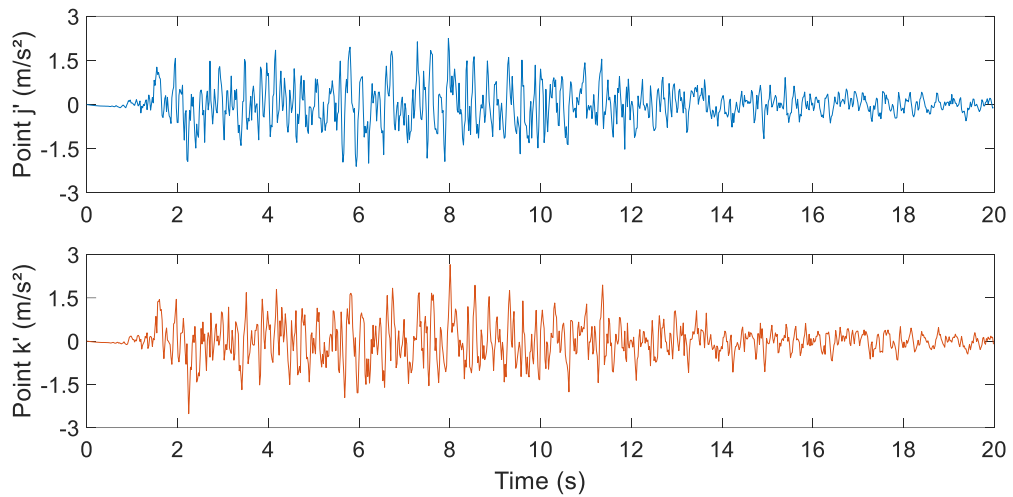


Figure 5. 11. Mouvements sismiques simulés en accélération au substratum rocheux.

Les accélérations et déplacements simulés au point k' ont un PGA de $0.27 g$ et un PGD de $0.100 m$, respectivement. Alors que, le signal simulé sur le point j' garde les mêmes PGA et PGD que les mouvements sismiques uniformes, ce qui est logique.

La comparaison de la densité spectrale de puissance des accélérations simulées au substratum rocheux et modèle de densité spectrale de puissance filtré de Kanai-Tajimi est illustrée sur la figure 5. 13. Les deux densités spectrales des signaux simulés affichent une bonne concordance avec le modèle adopté de Kanai-Tajimi.

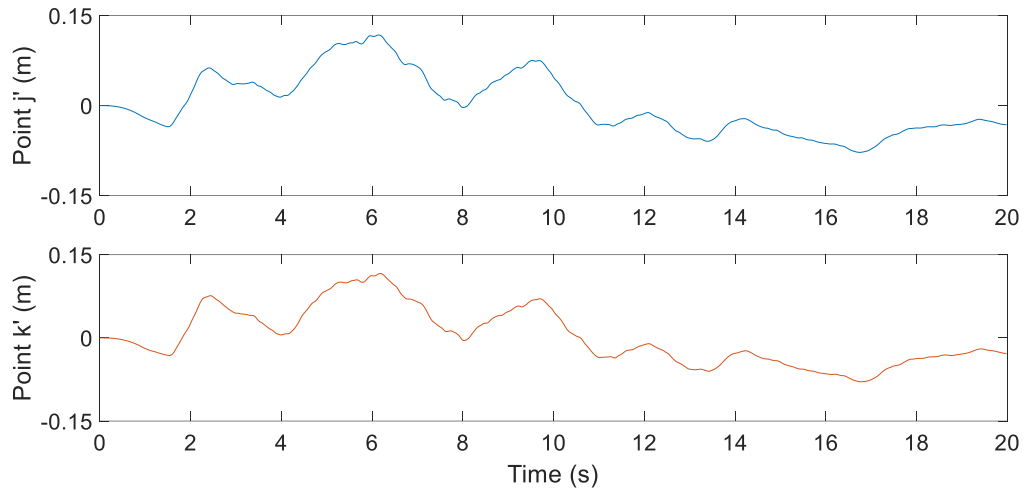


Figure 5. 12. Mouvements sismiques simulés en déplacement au substratum rocheux.

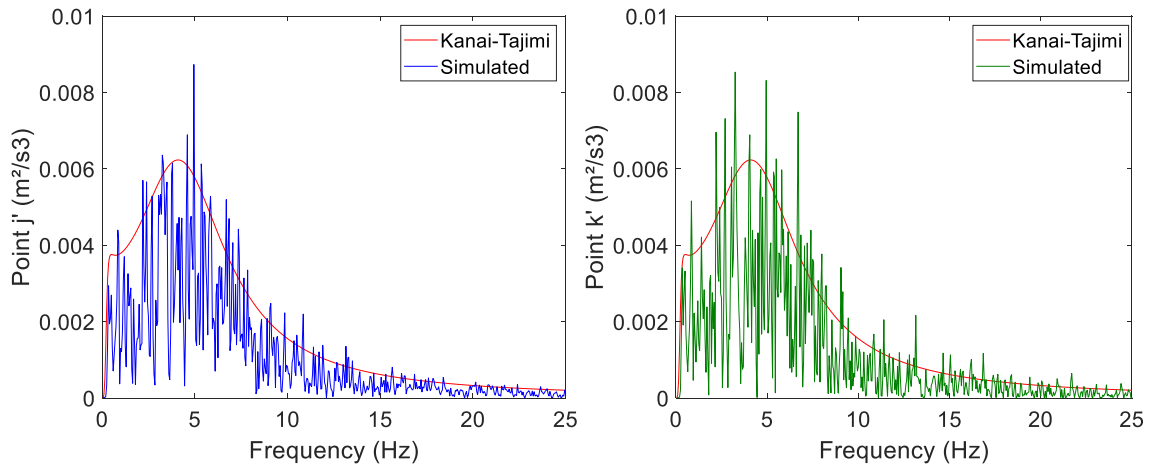


Figure 5. 13. Comparaison de la densité spectrale de puissance des accélérations simulées au substratum rocheux et le modèle de Kanai-Tajimi.

Finalement, les mouvements sismiques simulés au substratum rocheux sont projetés à la surface du sol par amplification en fonction des paramètres de site et de l'épaisseur de la

couche de sol sous chaque pile. Les accélérations et déplacements simulés à la surface du sol sont illustrés sur les figures 5. 14 et 5. 15, respectivement.

Le mouvement sismique simulé au point j a un PGA de 0.46 g et un PGD de 0.119 m . Au point k , le PGA est égal à 0.45 g et le PGD de 0.116 m . L'effet de l'amplification du site sur les mouvements sismiques à la surface est clairement visible dans ce cas.

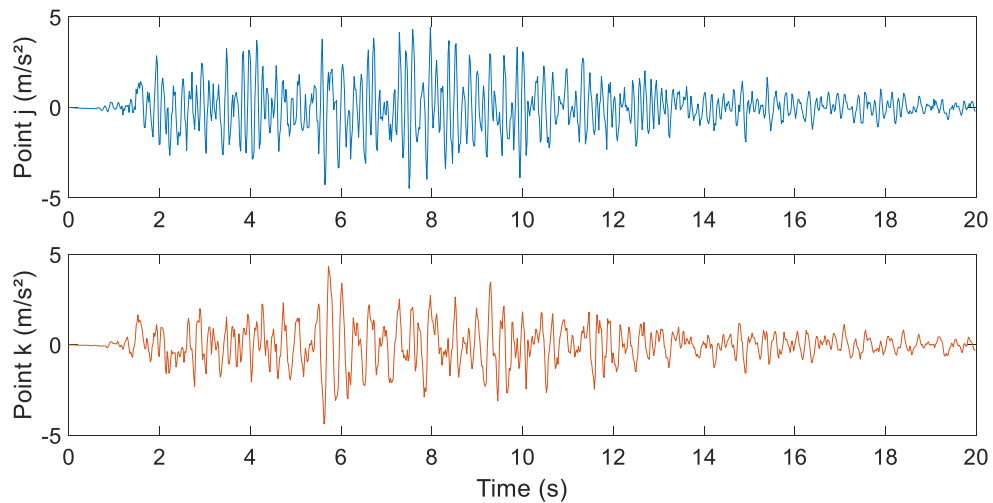


Figure 5. 14. Mouvements sismiques simulés en accélération à la surface.

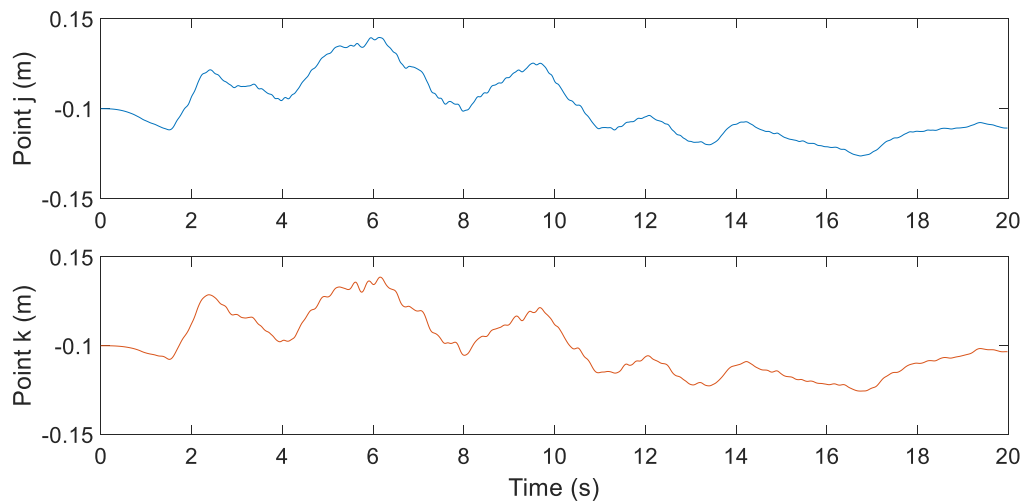


Figure 5. 15. Mouvements sismiques simulés en déplacement à la surface.

Sur la figure 5. 16, la densité spectrale de puissance des accélérations simulées à la surface du sol est comparée au modèle de Kanai-Tajimi. Les deux densités spectrales des accélérations simulées aux points j et k sont supérieures au modèle de Kanai-Tajimi avec des fréquences prédominantes différentes.

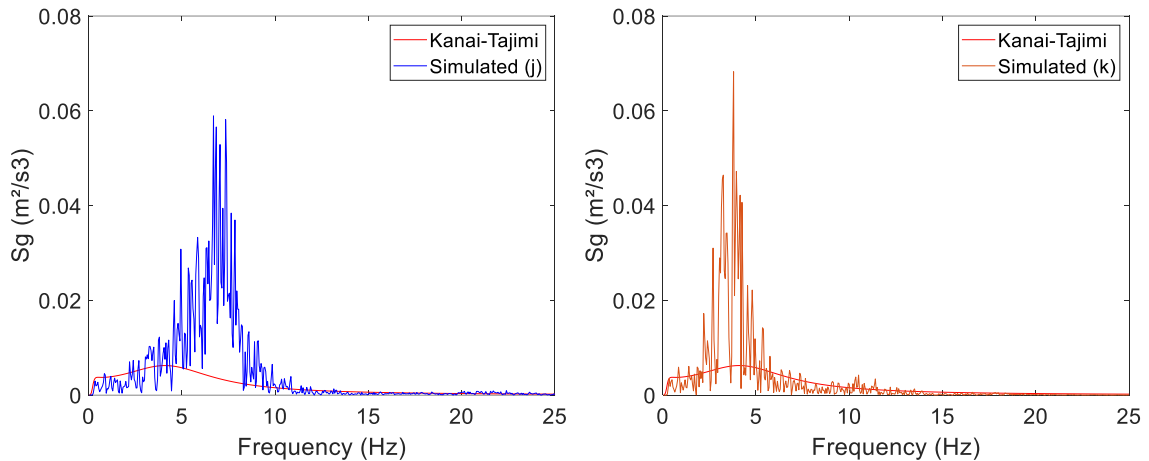


Figure 5. 16. Comparaison de la densité spectrale de puissance des accélérations simulées à la surface avec le modèle de Kanai-Tajimi.

3.2. Simulation du chargement sismique d'un portique de pont supporté par trois piles

3.2.1. Présentation du modèle

Le schéma proposé est une structure de pont supporté par trois piles. Les deux travées entre les piles ont une longueur de 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 e C_b respectivement (Figure 5. 17).

3.2.2. Densité spectrale de puissance de cible

Les paramètres de la fonction de densité spectrale de puissance Kanai-Tajimi filtrée correspondent à DSP1 décrite par le tableau 4. 3. L'accélération maximale (PGA) qui correspondant à ces valeurs est 0.2 g, le déplacement maximal (PGD) est de 0.082 m et

la durée du signal est 20 s. Cette fonction de densité spectrale a été présentée précédemment par la figure 5. 2.

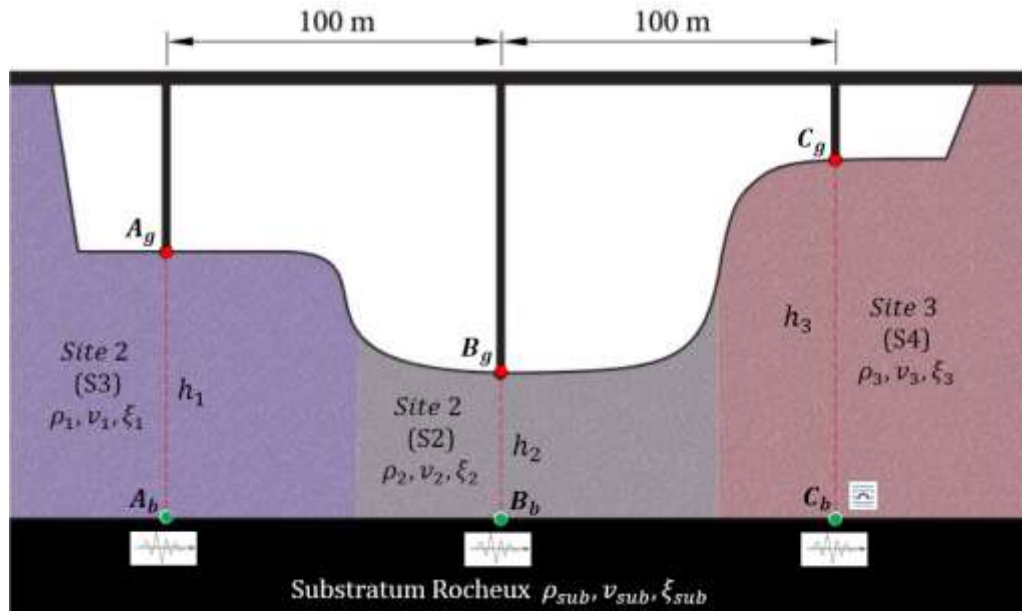


Figure 5. 17. Schéma d'un pont implanté à différents sites monocouches.

3.2.3. Caractéristiques des sites

En se basant sur la classification des sites décrite par le code parasismique algérien des ouvrages d'art (RPOA) (MTP 2010), trois types de site ont été choisis (Annexe B). 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 5. 9.

3.2.4. Amplification des sites

Les fonctions de transfert des trois points A_g, B_g et C_g situés à la surface sont illustrées sur la figure 5. 18. D'après cette figure, 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.

Tableau 5. 9. Paramètres des sites adoptés.

Site 1 (S3 : Site meuble)				Site 2 (S2 : Site compact)			
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 : Site très meuble)				Substratum rocheux			
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	/

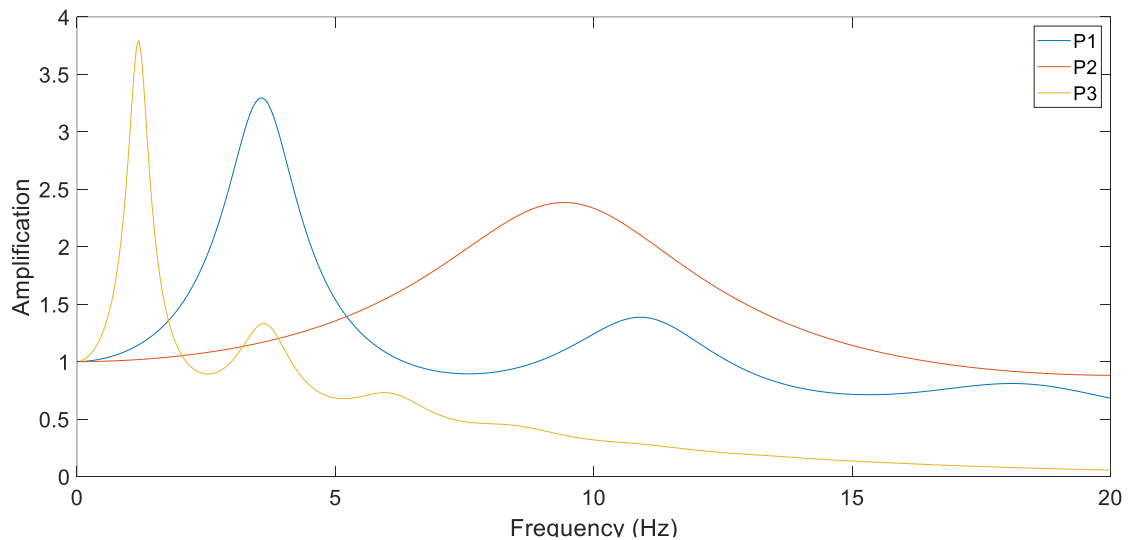


Figure 5. 18. Fonctions de transfert au niveau des points à la surface.

3.2.5. Choix du modèle de Cohérence

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 et al. (1989) et il est donné par les équations (1. 35) et (1. 36 a, b). Les paramètres adoptés de ce modèle ont

été calculés à partir des données sismiques de l'évènement 45 enregistré par le réseau dense SMART-1.

3.2.6. Résultats et interprétations

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 (décrits par le tableau 5. 1).

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 sur les figures 5. 19 et 5. 20 pour l'accélération et le déplacement, respectivement. Ces figures montrent que les trois signaux simulés coïncident. L'accélération maximale (PGA) est 0.262 g et le déplacement maximal (PGD) est égale à 0.111 m. nous remarquons que ces valeurs sont proches du PGA et PGD cibles définis ci-dessus.

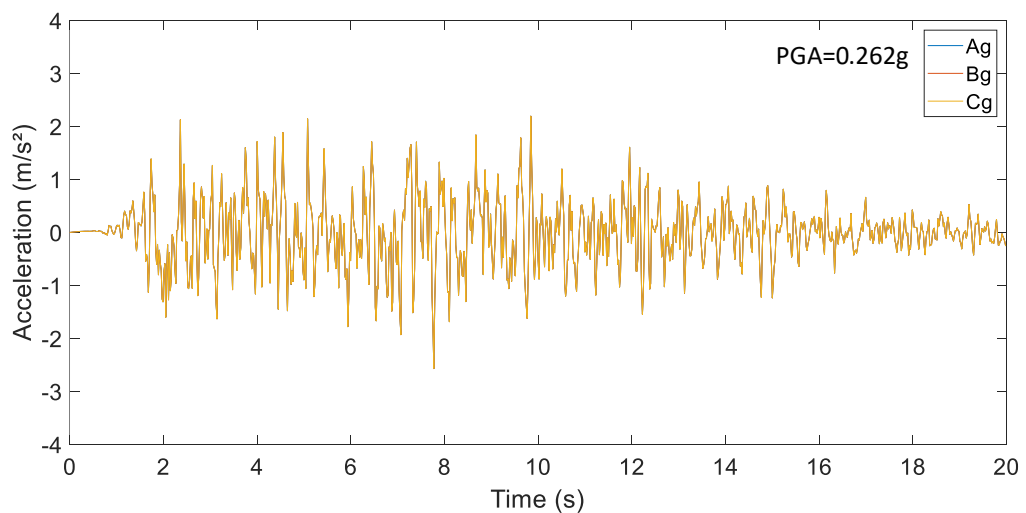


Figure 5. 19. Accélérations simulées dans le cas uniforme.

La comparaison des densités spectrales de puissance des signaux générés avec la fonction de densité spectrale filtrée de Kanai-Tajimi filtrée cible est illustrée sur les figures 5. 21

et 5. 22. Elle montre que les densités spectrales de puissance des mouvements simulés correspondent au spectre cible.

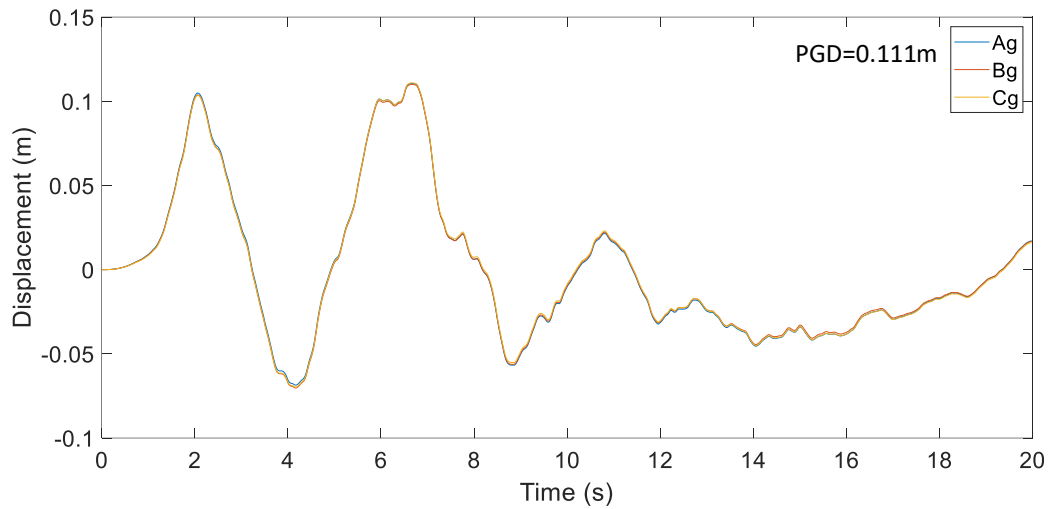


Figure 5. 20. Déplacements simulés dans le cas uniforme.

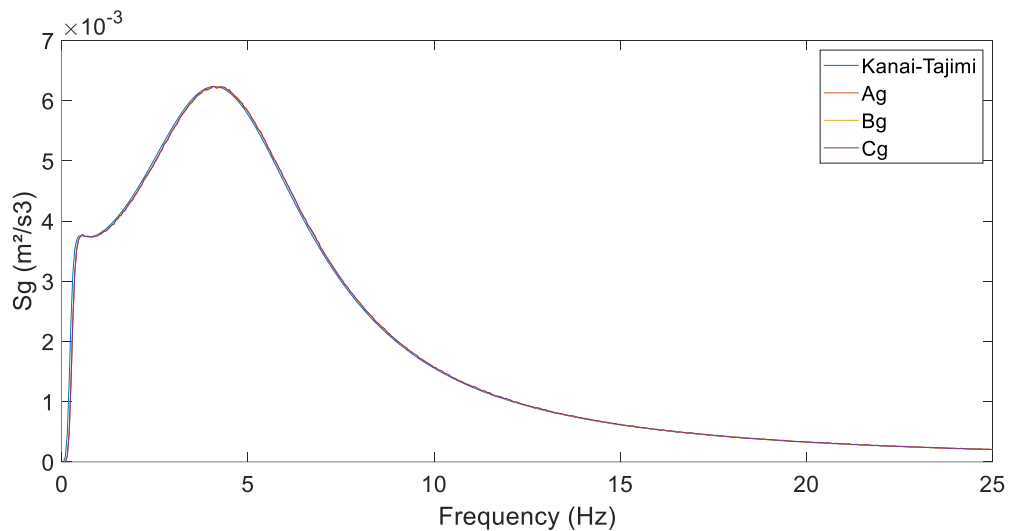


Figure 5. 21. Comparaison de densités spectrale de puissance (signaux sismiques stationnaires).

Les résultats du second cas de simulation (l'effet de site est négligé) décrits en accélérations et en déplacements sont illustrés sur les figures 5. 23 et 5. 24, respectivement. Le signal en accélération au point B_b développe un PGA maximal égale

à 0.283 g 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.

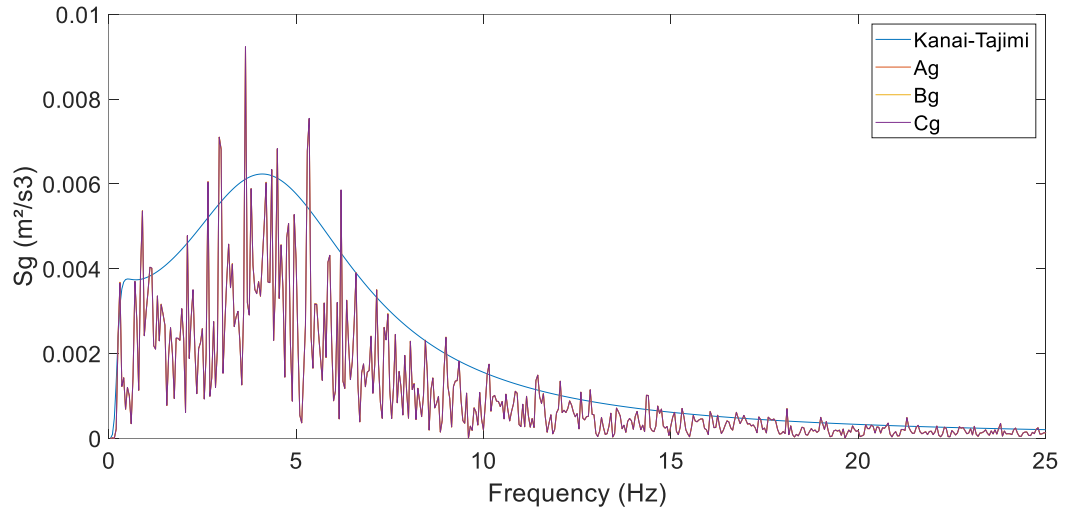


Figure 5. 22. Comparaison de densités spectrale de puissance (signaux sismiques non-stationnaires).

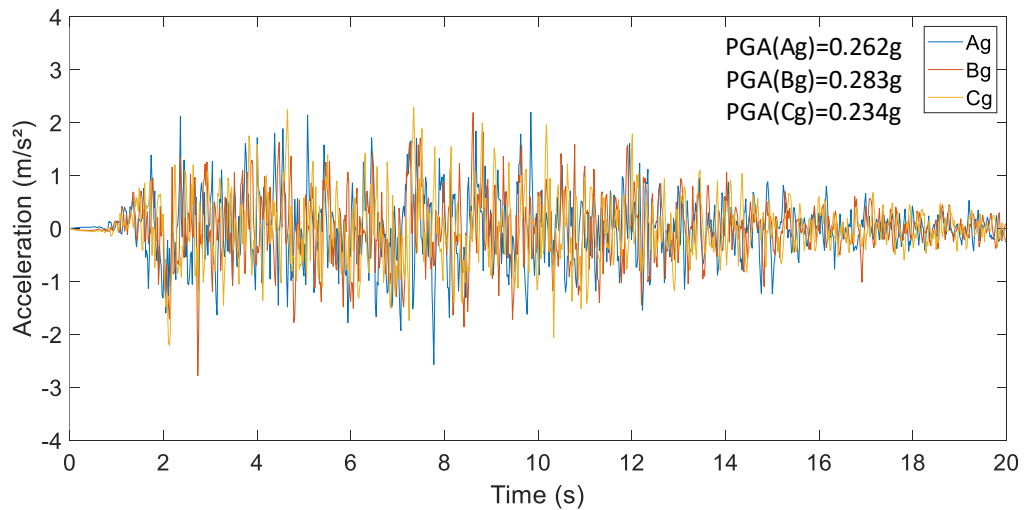


Figure 5. 23. Accélérations simulées dans le cas négligeant l'effet de site.

Les densités spectrales de puissance des signaux générés sont calculées et comparés avec la fonction de densité spectrale filtrée de Kanai-Tajimi (Figure 5. 25). Ces densités spectrales sont légèrement supérieures au spectre cible.

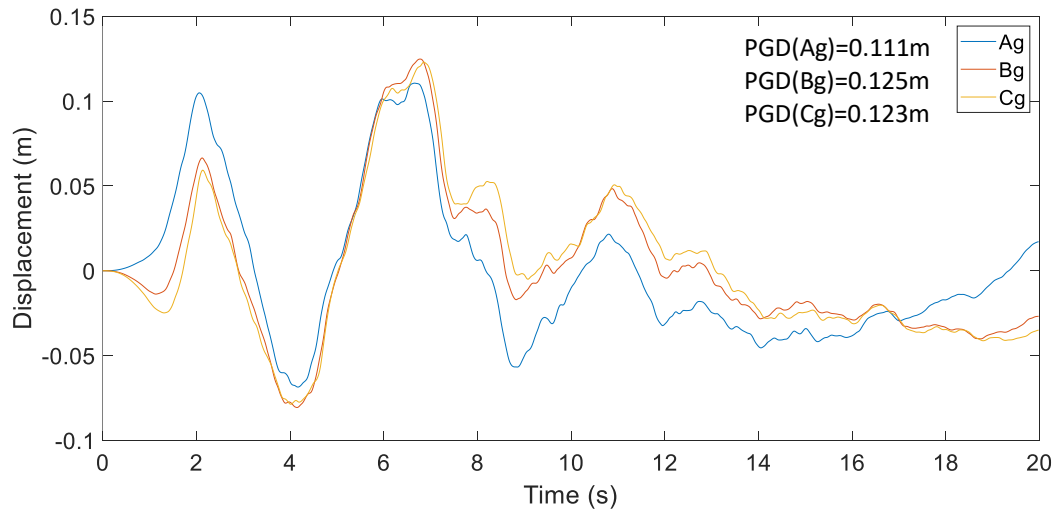


Figure 5. 24. Déplacements simulés dans le cas négligeant l'effet de site.

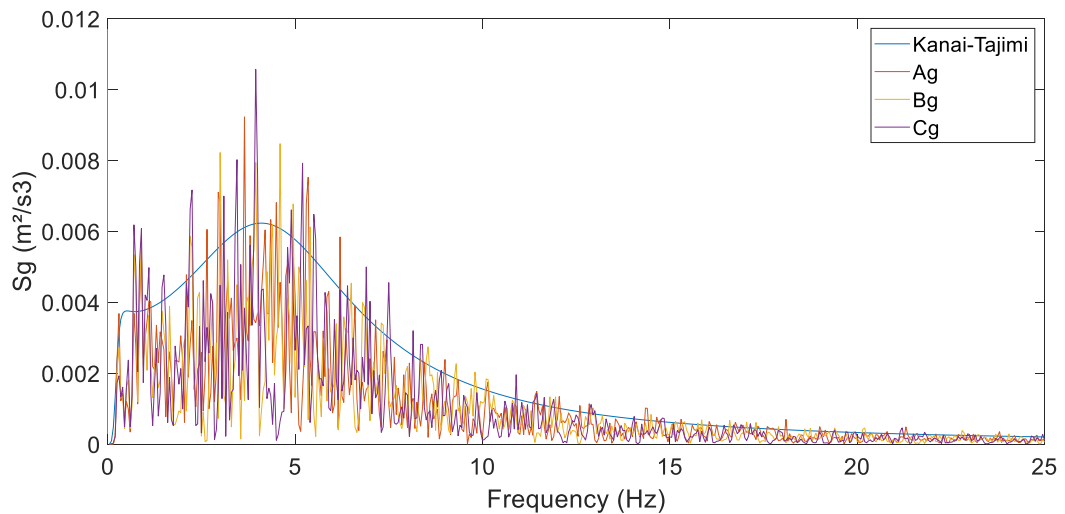


Figure 5. 25. Comparaison de densités spectrale de puissance dans le cas négligeant l'effet de site (signaux sismiques non-stationnaires).

Les figures 5. 26 et 5. 27 illustrent les accélérations et déplacements simulés en n'adoptant que l'effet de site. Le PGA maximum est de $0.346 g$ enregistré pour B_b et le PGD maximum de $0.140 m$, est enregistré au point C_b .

Dans ce cas de simulation, les densités spectrales de puissance calculées des signaux simulés sont supérieures à la densité spectrale filtrée de Kanai-Tajimi (Figure 5. 28).

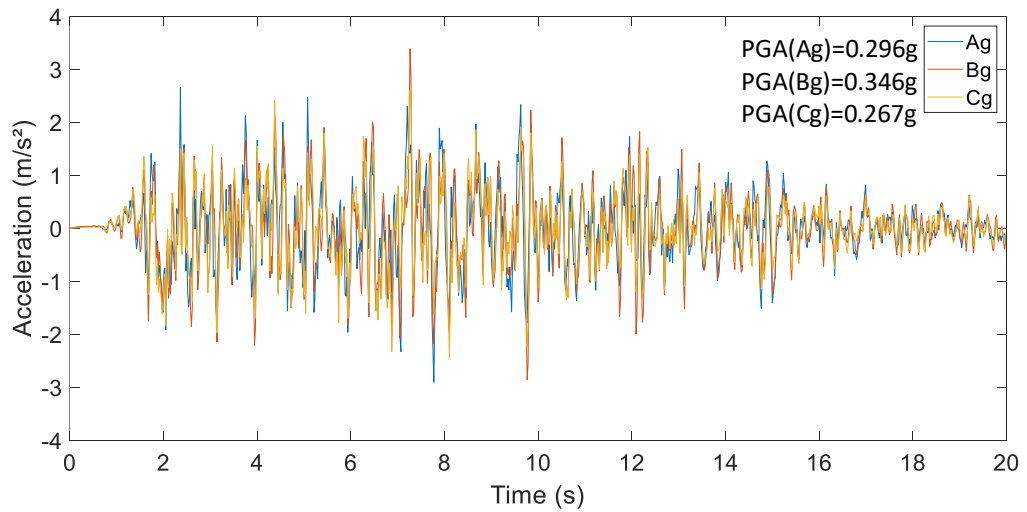


Figure 5. 26. Accélérations simulées en n'adoptant que l'effet de site.

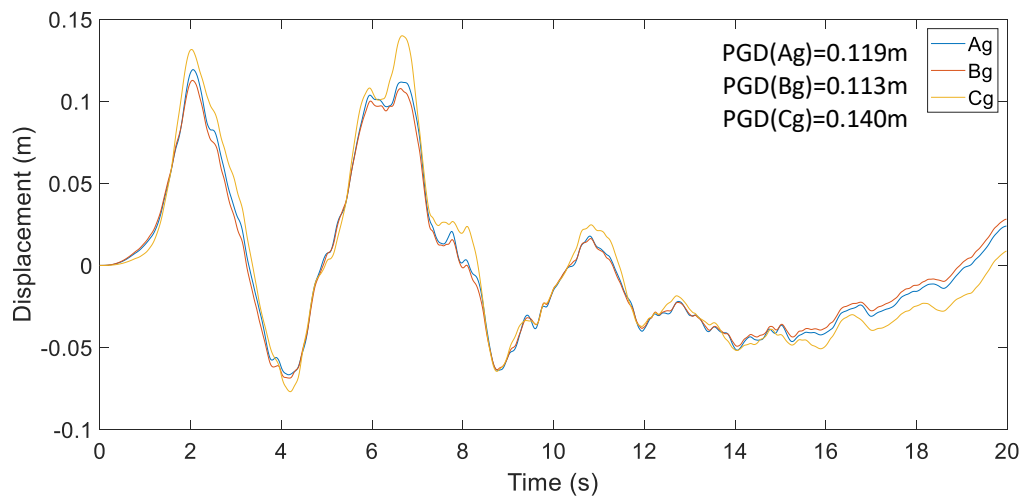


Figure 5. 27. Déplacements simulés en n'adoptant que l'effet de site.

Les résultats illustrés sur les figures 5. 29 et 5. 30 sont issus du cas de simulation qui prend en considération tous les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique. 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 0.343 g mesuré pour B_b . Un PGD maximal, égale à 0.152 m, est enregistré au point C_b .

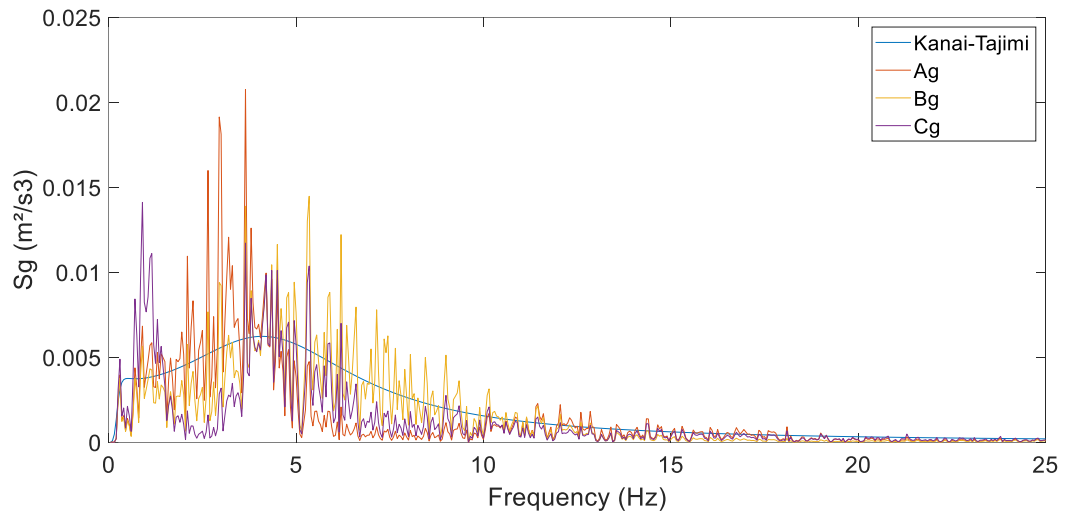


Figure 5. 28. Comparaison de densités spectrales de puissance en adoptant que l'effet de site (signaux sismiques non-stationnaires).

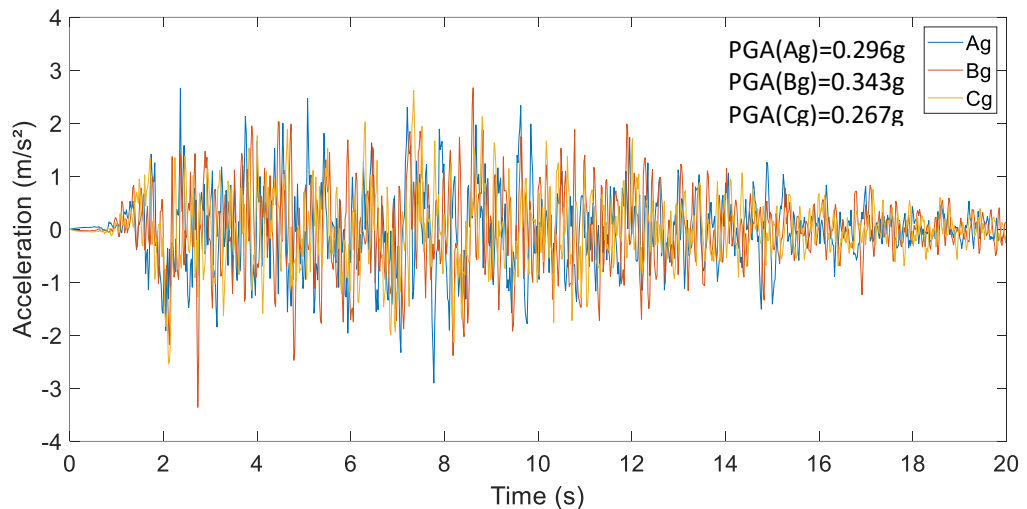


Figure 5. 29. Accélérations simulées dans le cas considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique.

Sachant que l'analyse sismique des structures étendues en adoptant l'effet de la variabilité spatiale du mouvement sismique est souvent, réalisée en imposant des déplacements à la base. 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.

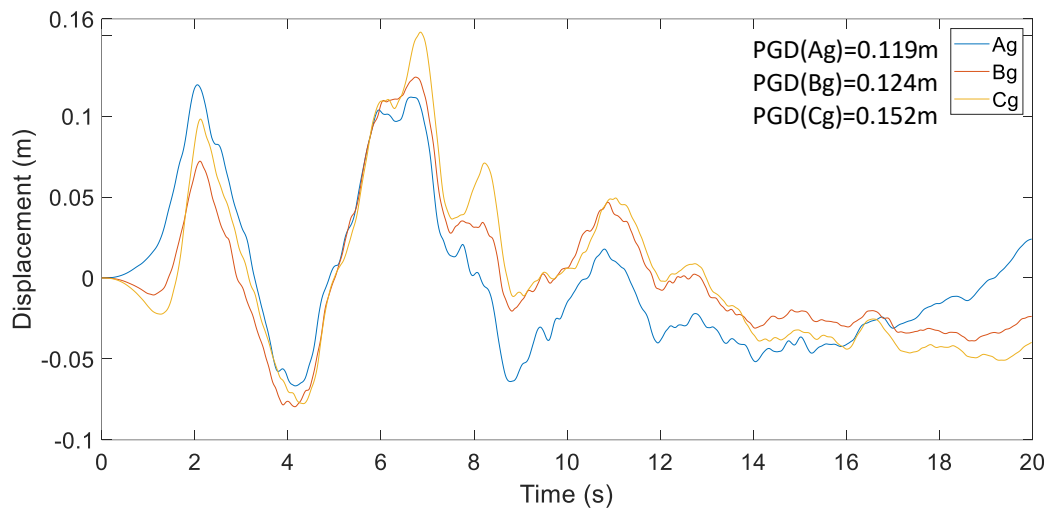


Figure 5. 30. Déplacements simulés dans le cas considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique.

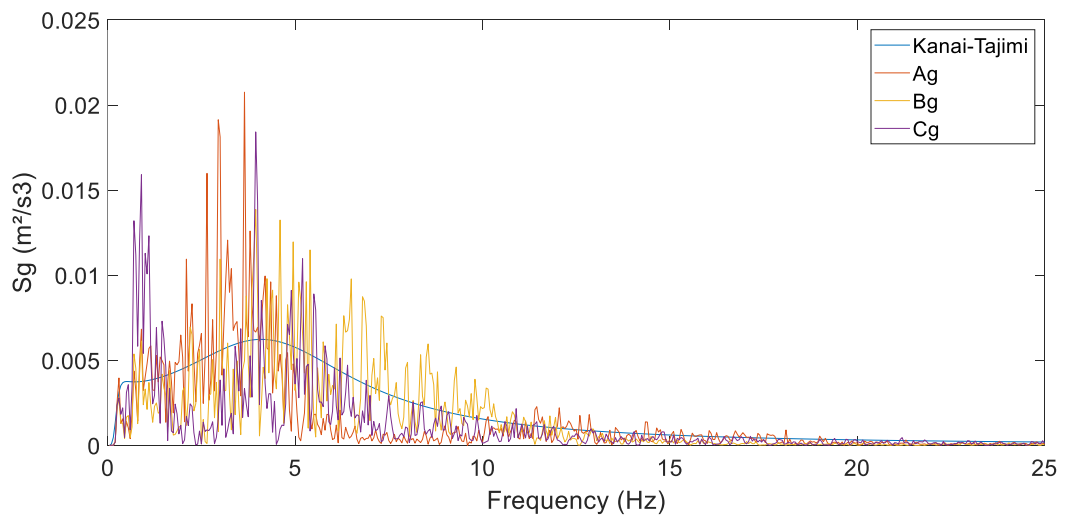


Figure 5. 31. Comparaison de densités spectrales de puissance dans le cas négligeant l'effet de site (signaux sismiques non-stationnaires).

Dans le cas de simulation où l'ensemble des facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique ont été pris en considération, les signaux sismiques générés développent des densités spectrales de puissance supérieures au modèle de Kanai-Tajimi mais suivent la même enveloppe (Figure 5. 31).

A l'issus des résultats de ces quatre cas de simulation des signaux sismiques, les déplacements simulés maximales correspondent au cas qui tient en compte de tous les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique. Tandis que le cas uniforme donne lieu aux 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 variabilité sismique sont considérés.

3.3. Cas d'étude d'un viaduc ferroviaire de 160 m de longueur

3.3.1. Géométrie du viaduc ferroviaire

Le viaduc ferroviaire fait partie de la nouvelle ligne à grande vitesse, située au nord-ouest de l'Algérie. Sa typologie est un tablier continu à quatre travées de 35 m de long (Figure 5. 32), composé de poutres en acier d'une hauteur de 2.30 m supportant une dalle de béton d'épaisseur moyenne de 40 cm, reposant sur des piles de section pleine (Figure 5. 33 a). Le viaduc est courbé d'une longueur totale de 140 m et d'un rayon de courbure de 5000 m. C'est un viaduc avec deux tabliers indépendants et trois piles dont la hauteur varie entre 11.90 m et 17.90 m. Les piles ont une section de 4×4 m². Les dimensions détaillées de cette section sont données sur la figure 5. 33 b.

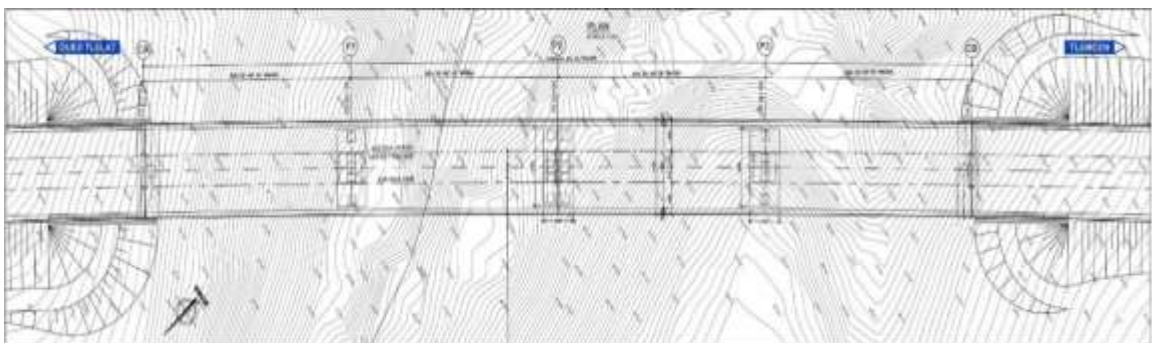
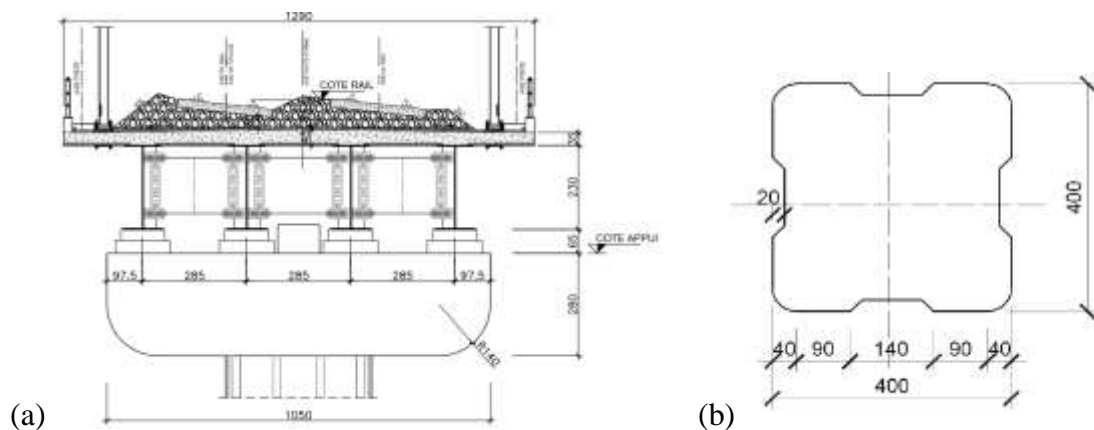


Figure 5. 32. Vue en plan du viaduc.

Les charges permanentes supportées par le tablier sont calculées et données par le tableau 5. 10. La résistance à la compression choisie pour l'analyse dynamique de la structure du viaduc est de 35 MPa pour les piles et de 30 MPa pour la dalle du tablier.

Tableau 5. 10. Charges permanentes appliquées au tablier.

Charge	Value (KN/ml)
Bordure	3.75
Trottoir	5.76
Rail UIC 60	2.40
Traverse	9.60
Ballast	114.70
Etanchéité	17.05

**Figure 5. 33.** Sections des éléments structuraux (en cm)

a. Section du tablier ; b. Section des piles.

3.3.2. Modèle du viaduc en éléments finis

Afin d'effectuer une analyse dynamique du viaduc, un modèle 3D en éléments finis a été réalisé en utilisant le logiciel CsiBridge (Figure 5. 34). Le tablier, composé de poutres en acier et d'une dalle de béton, est modélisé par élément surfacique (Shell) supporté par des éléments linéaires (Frame). Toutes les analyses dynamiques ont été effectuées en considérant un coefficient d'amortissement de 5%.

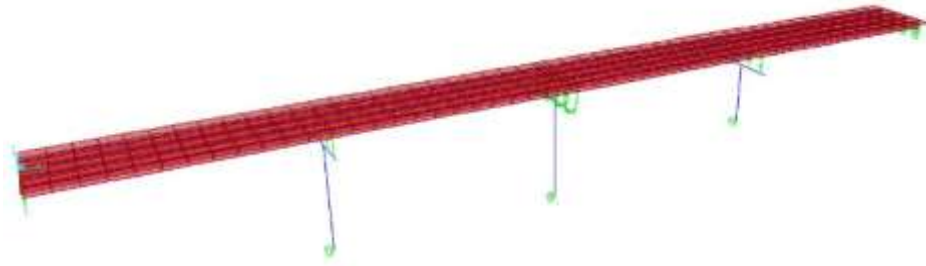


Figure 5. 34. Modèle tridimensionnel en éléments finis du viaduc.

3.3.3. Analyse modale du viaduc

La première étape est de procéder à l'analyse modale du modèle du viaduc. Le tableau 5. 11 donne à titre indicatif la période des quatre premiers modes de vibration. Ces derniers sont également illustrés sur la figure 5. 35.

Les deux premiers modes propres de vibration désignent un déplacement transversal selon l'axe Y. Ceci est principalement dû au fait que l'action sismique la plus vulnérable est dans cette direction.

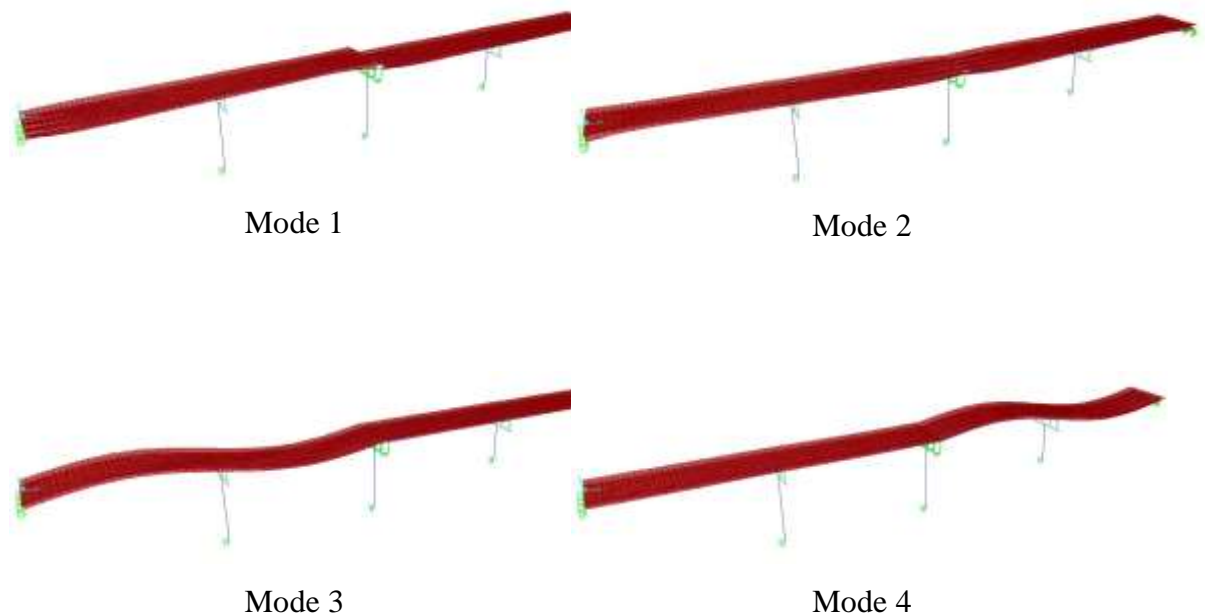


Figure 5. 35. Déformées des quatre premiers modes de vibration.

Tableau 5. 11. Périodes des quatre premiers modes de vibration.

Mode	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Période (s)	0.7299	0.6825	0.4529	0.4188

3.3.4. Modèle de configuration du site

La fondation du site est modélisée par sol monocouche avec des caractéristiques différentes à chaque appui. La figure 5. 36 illustre ce modèle, dans lequel i, j, k, l et m sont les points d'appuis de la structure situés à la surface du sol. Les points correspondants situés au substratum rocheux sont i', j', k', l' et m' , respectivement.

Le tableau 5. 12 donne les paramètres des sites adoptés où ρ_x, v_x, ξ_x et h_x ($x = 1, \dots, 5$) sont les densités, les vitesses des ondes de cisaillement, les coefficients d'amortissement et les profondeurs de la couche de sol sous chaque support, respectivement. Les paramètres correspondants du substratum rocheux sont $\rho_R = 30 \text{ KN/m}^3, v_R = 1500 \text{ m/s}$ et $\xi_R = 5\%$ (Bi et Hao 2012).

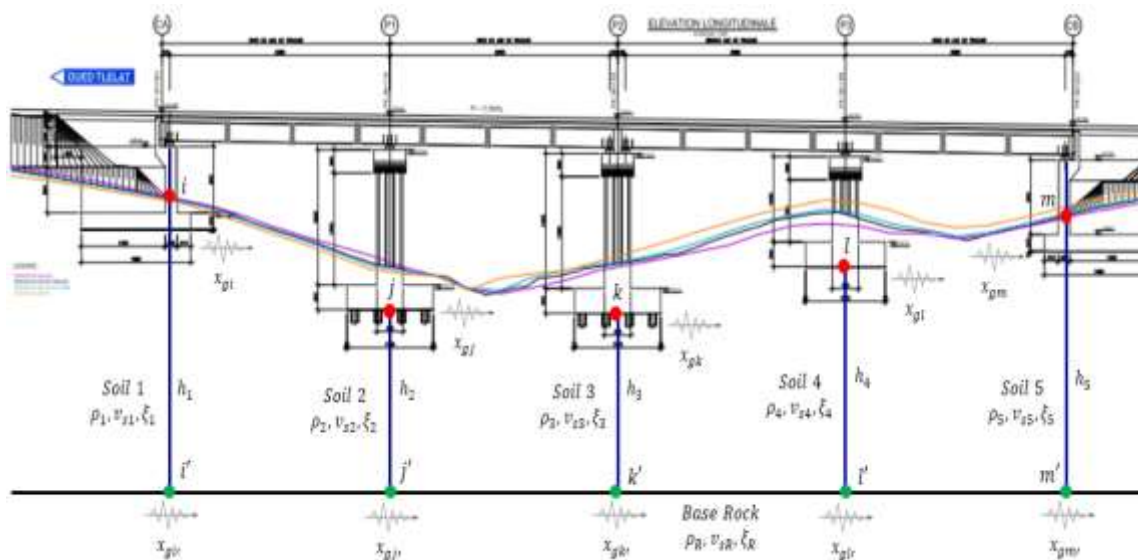
**Figure 5. 36.** Vue longitudinale du viaduc implanté sur des sites monocouches.

Tableau 5. 12. Paramètres des sols de fondation du viaduc.

Localisation	Notation	Paramètres	Valeur
Entre i et i'	Sol 1	ρ_1	2000 KN/m ³
		v_1	450 m/s
		ξ_1	5%
		h_1	56 m
Entre j et j'	Sol 2	ρ_2	1500 KN/m ³
		v_2	250 m/s
		ξ_2	5%
		h_2	30 m
Entre k et k'	Sol 3	ρ_2	1500 KN/m ³
		v_2	300 m/s
		ξ_2	5%
		h_2	29 m
Entre l et l'	Sol 4	ρ_2	1400 KN/m ³
		v_2	230 m/s
		ξ_2	5%
		h_2	37 m
Entre m et m'	Sol 5	ρ_2	1800 KN/m ³
		v_2	350 m/s
		ξ_2	5%
		h_2	54 m

3.3.5. Densité spectrale de puissance du mouvement sismique de référence

Considérant que le mouvement sismique aux points i' , j' , k' , l' et m' , situés au substratum rocheux (Figure 5. 36) ont la même intensité en terme de densité spectrale de puissance. La fonction de densité spectrale de puissance filtrée Kanai-Tajimi est utilisée pour définir la densité spectrale de puissance au substratum rocheux (Équation (4. 33)).

Les paramètres de cette fonction, décrits par DSP3 donné par le tableau 4. 3, correspondent à $\omega_f = 0.25 \times 2\pi \text{ Hz}$, $\xi_f = 0.6$, $\omega_g = 5 \times 2\pi \text{ Hz}$, $\xi_g = 0.6$ et $\Gamma = 0.022 \text{ m}^2/\text{s}^3$ (Bi et al. 2010). L'accélération maximale (PGA) qui correspondant à ces valeurs est 0.5 g et la durée du signal est 20 s. Les figures 5. 37 et 5. 38 illustrent la

densité spectrale de puissance de l'accélération et du déplacement au substratum rocheux respectivement.

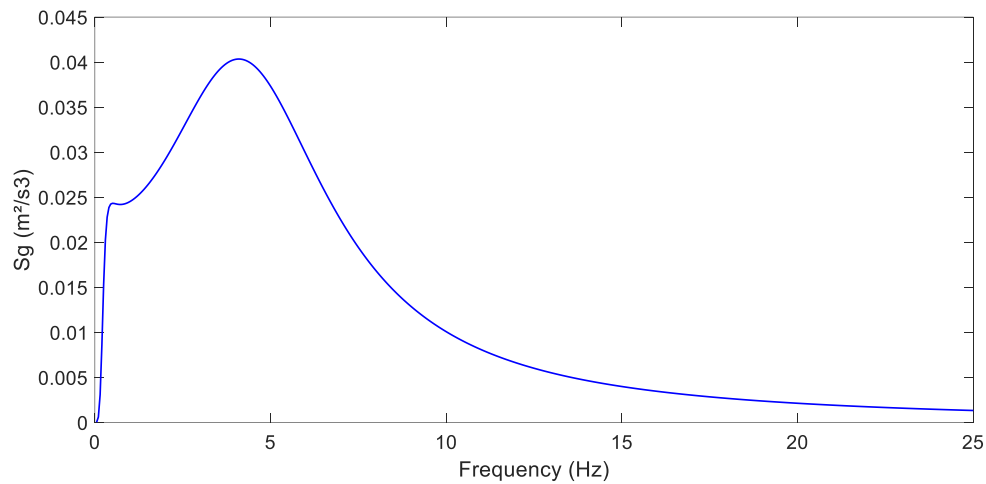


Figure 5. 37. Fonction de densité spectrale de puissance de mouvement sismique de référence au substratum rocheux (en accélération).

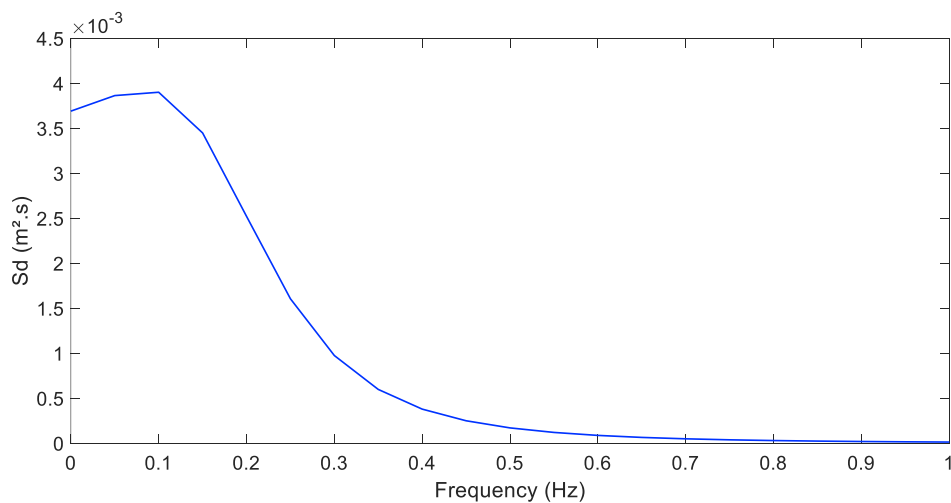


Figure 5. 38. Fonction de densité spectrale de puissance de mouvement sismique de référence au substratum rocheux (en déplacement).

3.3.6. Modèle de Cohérence adopté

Le modèle de Sobczyk (1991), décrit par les équations (1. 40) et (1. 41), est adopté pour décrire la cohérence entre les mouvements sismiques au substratum rocheux.

3.3.7. Amplification des sites

Les fonctions de transfert pour les cinq appuis du viaduc sont illustrées sur la figure 5. 39. Cette figure compare les fonctions de transfert des points i , j , k , l et m situés à la surface du sol avec des différentes profondeurs des couches de sol et multiples sites. Cela indique que la fréquence dominante d'un sol dépend de la profondeur des couches, de sa rigidité et de sa densité.

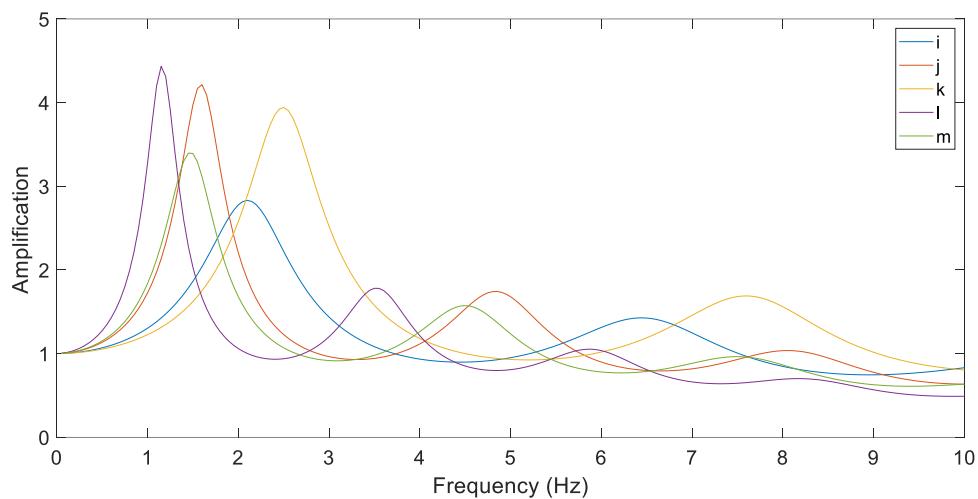


Figure 5. 39. Amplification des sites aux points i , j , k , l et m situés à la surface.

3.3.8. Simulation des chargements sismiques différentiels

En adoptant l'effet de la variabilité spatiale du mouvement sismiques, l'analyse dynamique des structures étendues est réalisée en appliquant des déplacements imposés à la base (Derbal 2005; Benmansour 2013). En effet, les chargements sismiques différentiels ont été simulés en déplacement et seront appliqués sous forme de séries temporelle aux extrémités inférieures des piles (contact sol-structure). Quatre cas de chargement sismique sont considérés (décrits par le tableau 5. 1) :

- i) Chargement sismique en tenant compte de tous les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique, ii) Chargement sismique en négligeant l'effet du site c.à.d. en ne considérant que les effets d'incohérence et de passage d'onde, iii) Chargement sismique en ne considérant que l'effet du site et iv) Chargement sismique uniforme.

En adoptant ces cas de chargement sismique, les mouvements sismiques non-stationnaires, simulés à la surface du sol (points i , j , k , l et m) sont illustrés sur les figures 5. 40 à 5. 43.

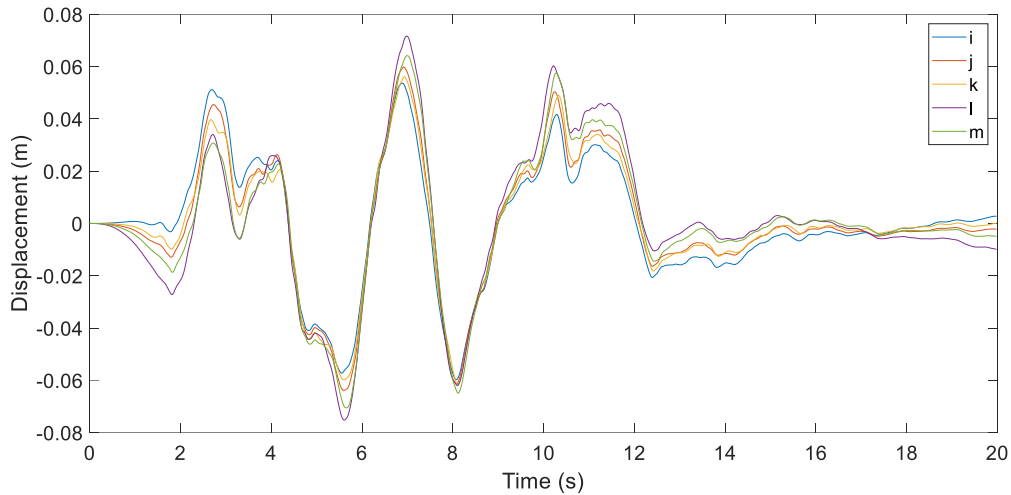


Figure 5. 40. Chargement sismique simulé en termes de déplacements en considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale sismique.

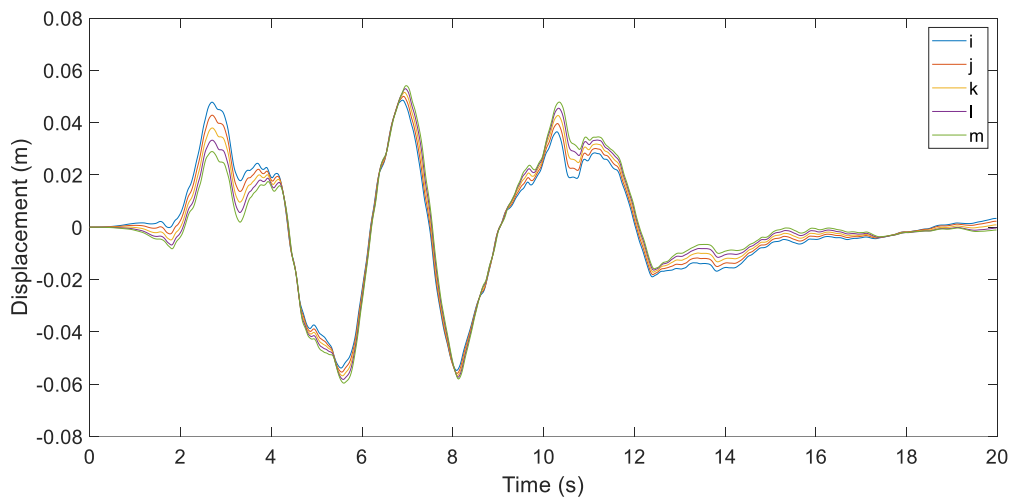


Figure 5. 41. Chargement sismique simulé en termes de déplacements en négligeant l'effet de site.

Au niveau de la figure 5. 40, nous observons que les déplacements simulés du premier cas de chargement, c.à.d. en tenant compte de tous les facteurs de variabilité spatiale du

mouvement sismique, ont des valeurs élevées et présentent une distribution croissante en fonction de la distance. Alors que pour le second cas de chargement sismique qui néglige les effets locaux du site, les déplacements simulés sont moins importants que ceux du premier cas de chargement sismique (Figure 5. 41).

Dans ce cas, Nous avons remarqué également que les déplacements simulés dans le second cas c.à.d. en négligeant l'effet de site (Figure 5. 41) et ceux simulés à partir du cas de chargement sismique uniforme (Figure 5. 43) sont similaires en termes d'ordre de grandeur.

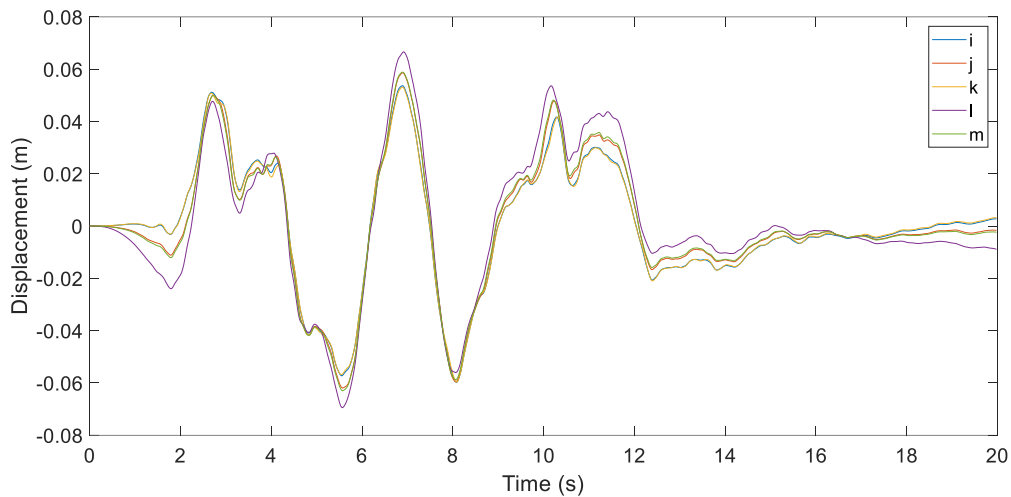


Figure 5. 42. Chargement sismique simulé en termes de déplacements en ne considérant que l'effet de site.

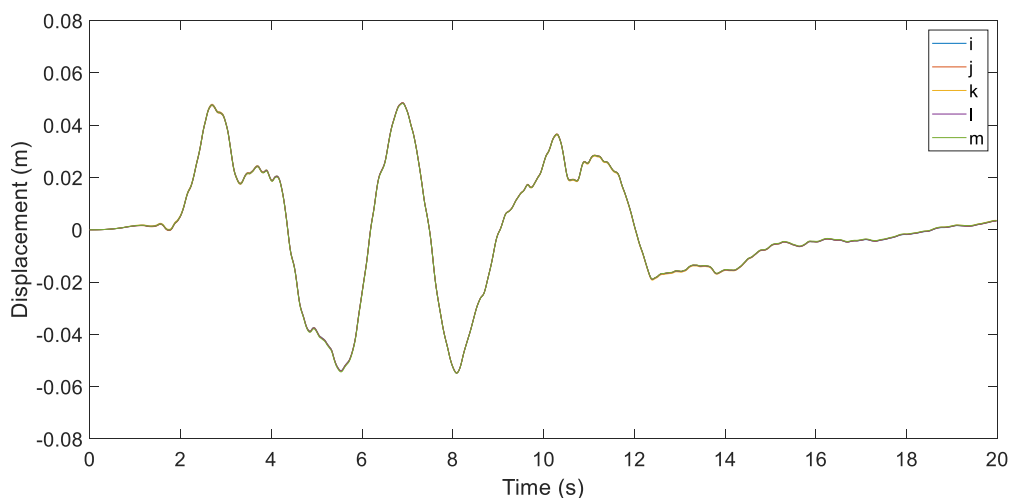


Figure 5. 43. Chargement sismique uniforme simulé en termes de déplacements.

Nous remarquons que les déplacements simulés (illustrés sur la figure 5. 42), issus du troisième cas de chargement sismique, celui qui ne considère que l'effet de site, sont supérieurs à ceux simulés (illustrés sur la figure 5. 41), issus du second cas de chargement sismique, celui qui néglige l'effet de site.

En effet, il est clair que l'effet de site seul peut fournir un chargement sismique plus élevé que celui ne considérant que les effets d'incohérence et de passage d'onde. A cet effet, en termes de chargement sismique, il est clair que le fait de négliger les conditions locales du site, c.à.d. ne considérer que les effets d'incohérence et de passage d'onde, conduit à une sous-estimation du chargement sismique qui sera appliqué à la structure.

3.3.9. Analyse dynamique du viaduc

Plusieurs analyses dynamiques du modèle du viaduc sont effectuées à l'aide du signal en déplacement. Les déplacements simulés sont appliqués à la base de chaque support de viaduc.

Dans ce qui suit, nous adoptons une notation pour distinguer les différentes analyses dynamiques du viaduc. En effet, les résultats issus de l'analyse dynamique, où tous les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique sont adoptés, sont notés par "WSE" (avec effet de site). L'analyse dynamique, où l'effet de site est négligé, donne des résultats qui sont notés "WOSE" (sans effet de site). Tandis que la notation "SE_only" (effet de site seul) correspond aux résultats de l'analyse dynamique qui considère uniquement les conditions locales du site. Finalement, les résultats issus d'un chargement uniforme sont notés "UNIF".

Les résultats de l'analyse dynamique du viaduc, soumis aux quatre cas de chargement sismiques, sont comparés en termes de moment fléchissant et d'effort tranchant au niveau des piles. Les valeurs maximales des moments fléchissants et des efforts tranchants obtenus à chaque pile sont illustrées sur les figures 5. 44 à 5. 47.

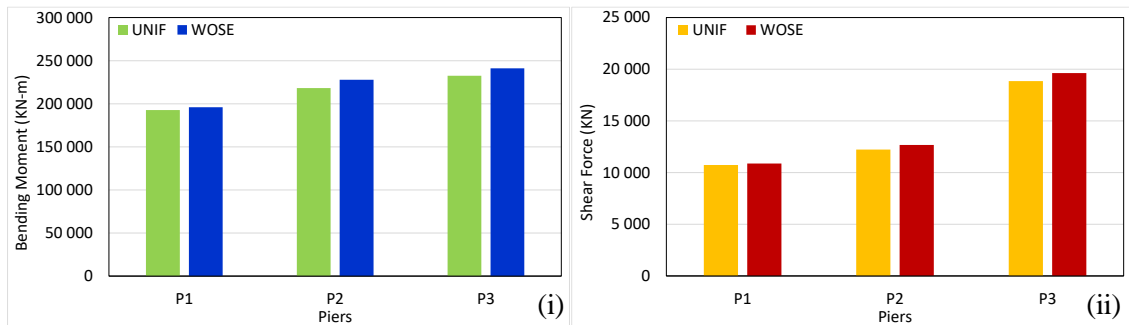


Figure 5. 44. Comparaison de la réponse dynamique maximale des piles sous un chargement sismique différentiel en négligeant l'effet de site et un chargement sismique uniforme. i) Moments fléchissants, ii) Efforts tranchants.

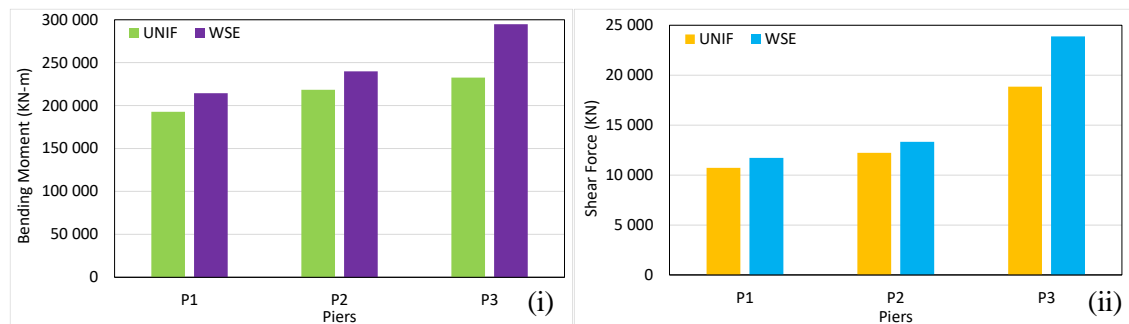


Figure 5. 45. Comparaison de la réponse dynamique maximale des piles sous un chargement sismique différentiel tenant en compte de l'effet de site et un chargement sismique uniforme. i) Moments fléchissants, ii) Efforts tranchants.

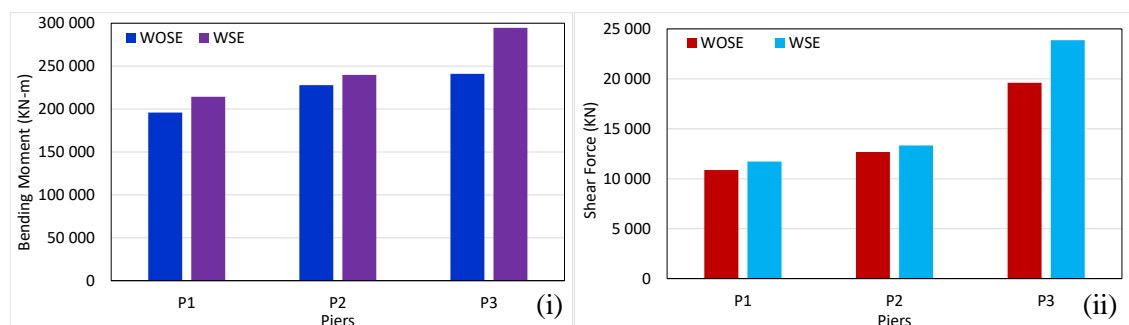


Figure 5. 46. Comparaison de la réponse dynamique maximale des piles sous les chargements sismiques différentiel en négligeant et en considérant l'effet de site. i) Moments fléchissants, ii) Efforts tranchants.

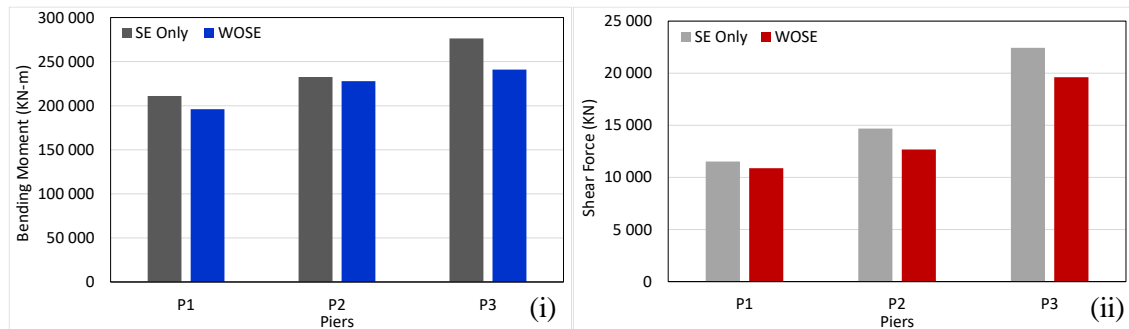


Figure 5. 47. Comparaison de la réponse dynamique maximale des piles sous les chargements sismiques différentiel en négligeant l'effet de site et celui en ne considérant que l'effet de site. i) Moments fléchissants, ii) Efforts tranchants.

En premier lieu, les résultats issus de l'analyse dynamique du viaduc sous un chargement sismique qui ne considère que les effets d'incohérence et de passage d'onde (WOSE), sont comparés à ceux donnés par un chargement sismique uniforme (UNIF). Les moments fléchissant issus des résultats WOSE sont similaires à ceux issus des résultats UNIF. Une légère variation de l'ordre de 2% à 5% est constatée pour les trois piles (Figure 5. 44 i). Le même constat est établi pour d'effort tranchant (Figure 5. 44 ii).

En second lieu, les efforts internes fournis par la structure du viaduc issus des résultats WSE sont comparés à ceux développés sous un chargement sismique uniforme (UNIF). En effet, les moments fléchissant issus des résultats WSE sont supérieurs à ceux issus des résultats UNIF. L'augmentation à la première et deuxième pile (P1 et P2) est d'environ 10%. Tandis que pour la troisième pile (P3), une augmentation significative apparaît avec un taux de 22% (Figure 5. 45 i). Les mêmes variations ont été observées en comparant les efforts tranchants pour les trois piles (Figure 5. 45 ii).

La phase suivante consiste à comparer les résultats WOSE avec WSE. La figure 5. 46 montre que, pour les trois piles, les moments fléchissant issus des résultats WSE sont supérieurs à ceux donnés de la combinaison WOSE. La variation des moments fléchissant et des efforts tranchants est d'environ 5% pour la première pile (P1) et 8% pour la deuxième pile (P2). Ce taux monte à 18% pour la dernière pile P3 (Figure 5. 46 i et ii).

Finalement, les résultats WOSE sont comparés à ceux SE_only afin de quantifier l'apport de l'effet de site par rapport aux effets d'incohérence et de passage d'onde. En effet, les

moments fléchissant tirés des résultats SE_only sont supérieurs à ceux tirés des résultats WOSE. Plus précisément, nous avons constaté une augmentation d'environ 13% pour la troisième pile (P3). Alors que pour la première pile (P1), cette augmentation diminue pour atteindre les 7%. La variation des moments fléchissant à la deuxième pile (P2) est négligeable (Figure 5. 47 i). La comparaison des efforts tranchants issus des deux résultats SE_only et WOSE donne le même constat des moments fléchissant. Dans ce cas, l'augmentation des efforts tranchants est d'environ 5% pour la pile P1 et 13% pour les piles P2 et P3 (Figure 5. 41 ii).

Nous avons constaté que lors d'une analyse sismique sous un chargement sismique différentiel, la réponse dynamique est très sensible aux variations des déplacements imposés à la base. Dans ce cas d'étude, il est évident que l'adoption d'un chargement sismique différentiel en ne considérant que les effets d'incohérence et de passage d'onde ne reflète pas la demande sismique et conduit à une sous-estimation des efforts internes.

3.4. Cas d'étude du pont à haubans de Mila

3.4.1. Géométrie du pont à haubans

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 5. 48). 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.

Les pylônes sont en forme de H, constitués chacun de deux fûts verticaux cylindriques en partie basse au-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 (Figure 5. 48).

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 relient 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 (Kibboua 2006).



Figure 5. 48. Vue d'ensemble du pont à haubans.

3.4.2. Modèle du pont en éléments finis

Un modèle tridimensionnel en élément finis a été réalisé en utilisant le logiciel CsiBridge. Le tablier est supporté par les piles par l'intermédiaire des appareils d'appuis. Ces derniers ont été modélisés par des éléments de liaison (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. 49).

3.4.3. Analyse modale du pont à haubans

Les quatre premiers modes propres de vibration sont illustrés sur la figure 5. 50. Les périodes correspondants à ces modes sont 2.459 s, 2.248 s, 1.958 s et 1.536 s, respectivement.

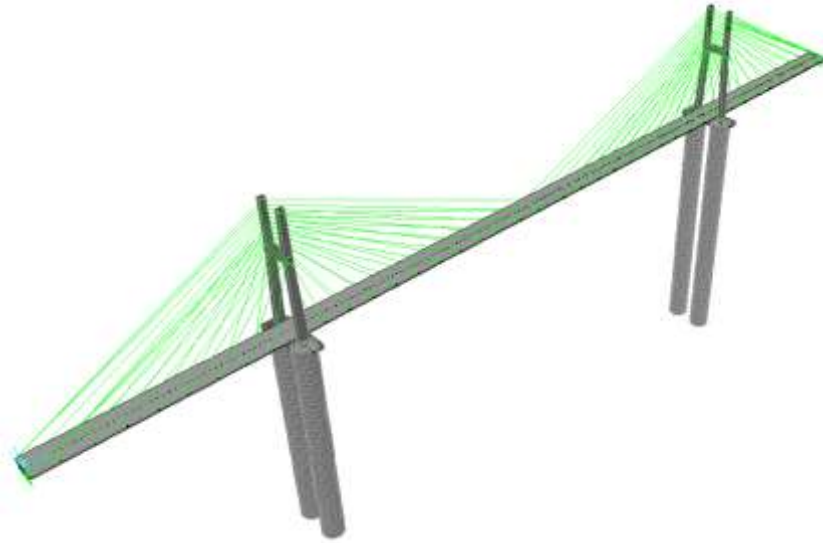


Figure 5. 49. Modèle en éléments finis du pont à haubans de Mila.

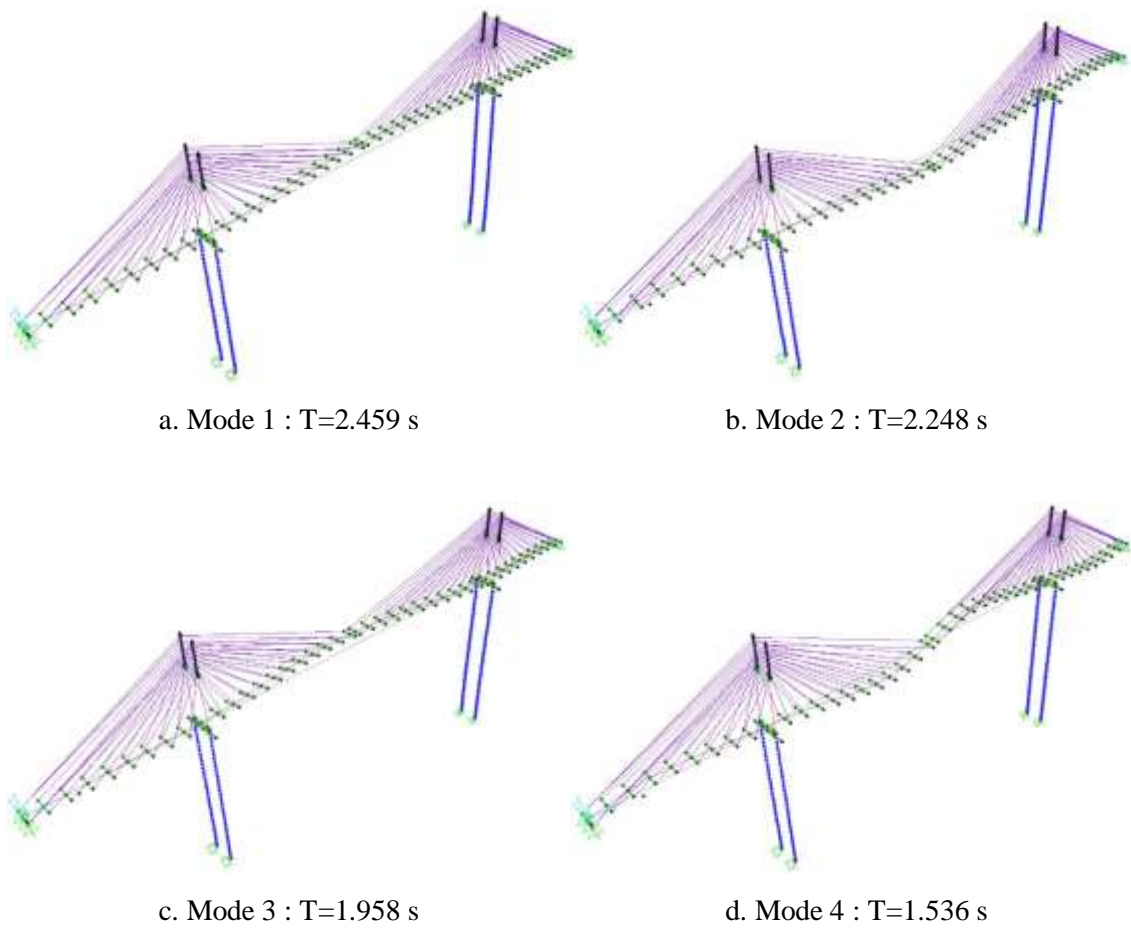


Figure 5. 50. Déformées des quatre premiers modes de vibration du pont à haubans.

3.4.4. Modèle de configuration du site

Le modèle du pont étudié est illustré sur la figure 5. 51, 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 et 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 les supports A, P1, P2, P3 et B (Tableau 5. 13). Les paramètres correspondants au substratum rocheux sont $\rho_R = 25 \text{ KN/m}^3$, $v_R = 1500 \text{ m/s}$ et $\xi_R = 5\%$.

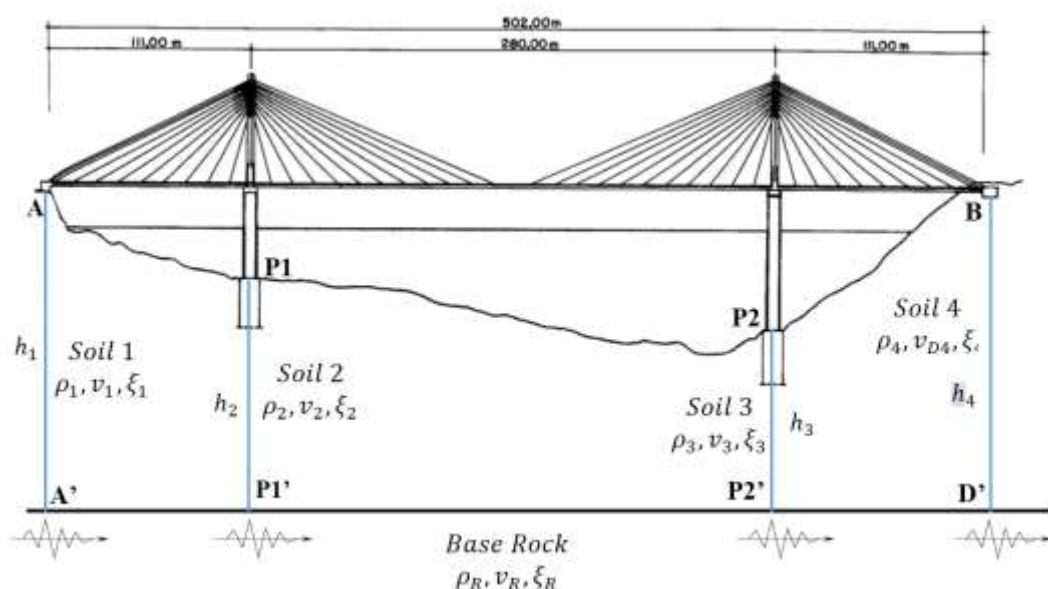


Figure 5. 51. Vue longitudinale du pont et du sol de fondation.

Tableau 5. 13. Paramètres adoptés des sites.

Site 1 (S3 : Site meuble)				Site 2 (S2 : Site compact)			
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)
2000	450	5	51	1500	250	5	38
Site 3 (S4 : Site très meuble)				Site 4 (S4 : Site très meuble)			
ρ_3 (KN/m^3)	v_3 (m/s)	ξ_3 (%)	h_3 (m)	ρ_3 (KN/m^3)	v_3 (m/s)	ξ_3 (%)	h_3 (m)
1500	300	5	29	1800	350	5	48

3.4.5. Densité spectrale de puissance du mouvement sismique de référence

La fonction de densité spectrale de puissance filtrée Kanai-Tajimi est utilisée pour définir le mouvement sismique de référence au substratum rocheux (Équation (4. 33)). Les paramètres de cette fonction sont décrits par DSP3 donné par le tableau 4. 3. Cette fonction est illustrée sur la figure 5. 37

3.4.6. Choix du modèle de Cohérence

Le modèle de Sobczyk (1991), décrit par les équations (1. 40) et (1. 41), est choisi pour décrire la cohérence entre les mouvements sismiques au substratum rocheux.

3.4.7. Amplification des sites

Les fonctions de transfert des quatre supports du pont sont illustrées sur la figure 5. 52.

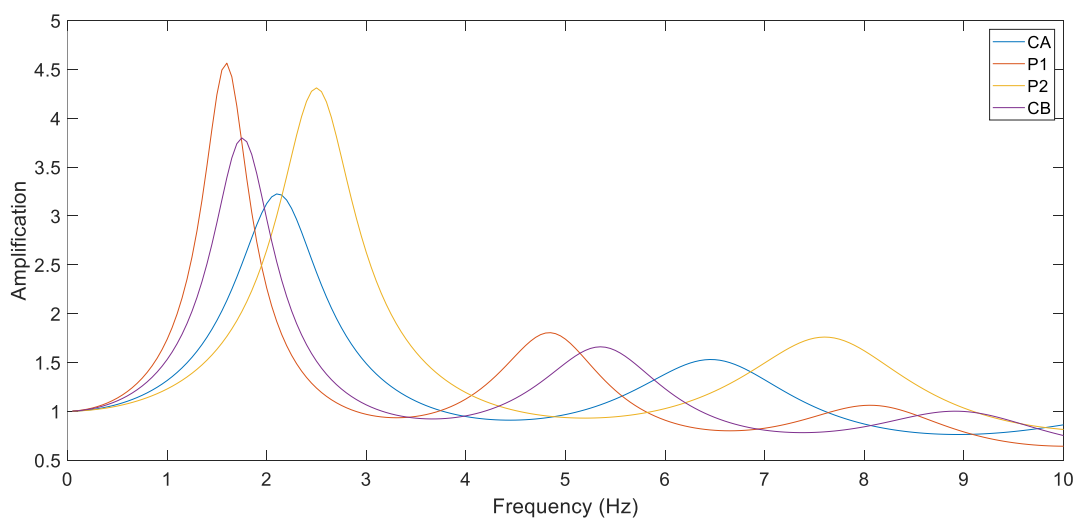


Figure 5. 52. Fonctions de transfert au niveau des supports.

3.4.8. Simulation des chargements sismiques différentiels

Les chargements sismiques différentiels sont appliqués sous forme de séries temporelles de déplacements au niveau des liaisons sol-piles. Ces déplacements ont été simulés en utilisant la technique de simulation dans le quatrième chapitre (Figures 5. 53 et 5. 54).

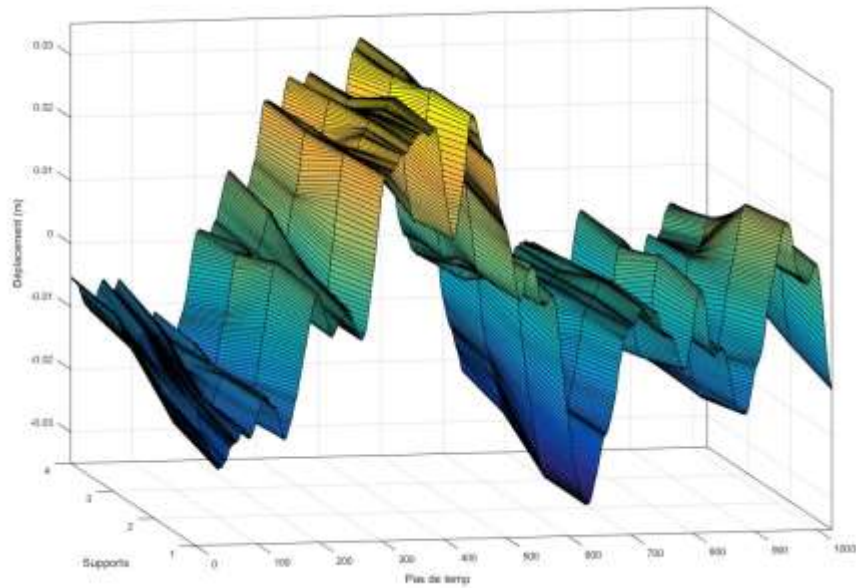


Figure 5. 53. Déplacements générés pour le cas différentiel (les effets d'incohérence, de passage d'onde et de site sont pris en compte).

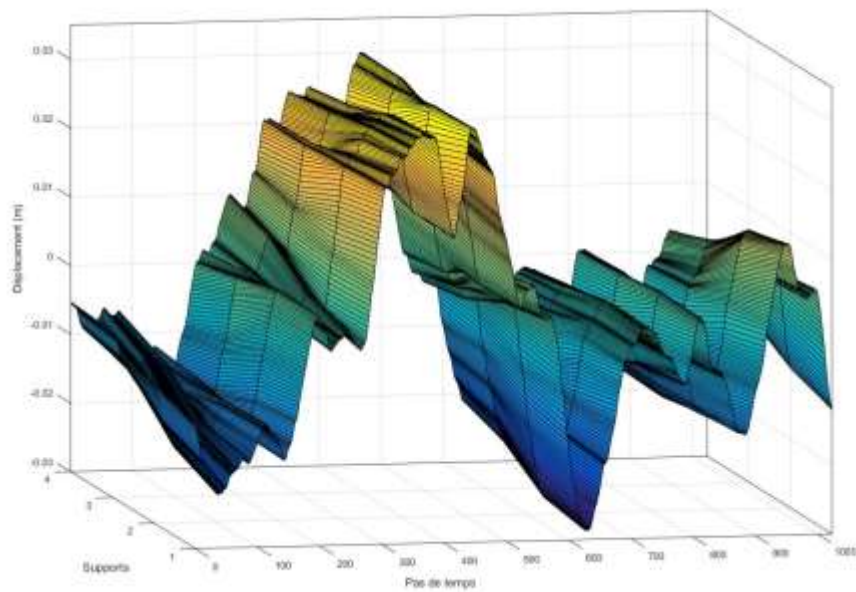


Figure 5. 54. Déplacements générés pour le cas différentiel (effet de site négligé).

3.4.9. Analyse dynamique du pont à haubans

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 dynamiques ont été réalisées. La première considère que le chargement sismique est uniforme (notée UNIF) c.à.d. que le chargement sismique simulé pour le premier support du pont est appliqué pour tous l'ensemble des supports. Au niveau de la seconde analyse dynamique (notée DIFF CS), chaque support a son propre chargement sismique. Ensuite, une autre analyse dynamique est menée sous un chargement différentiel mais en négligeant l'effet de site (notée DIFF C). Les résultats de ces analyses dynamiques, sous les trois cas de chargement sont comparés en termes de moments fléchissants et effort tranchant (Figures 5. 55 à 5. 57).

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

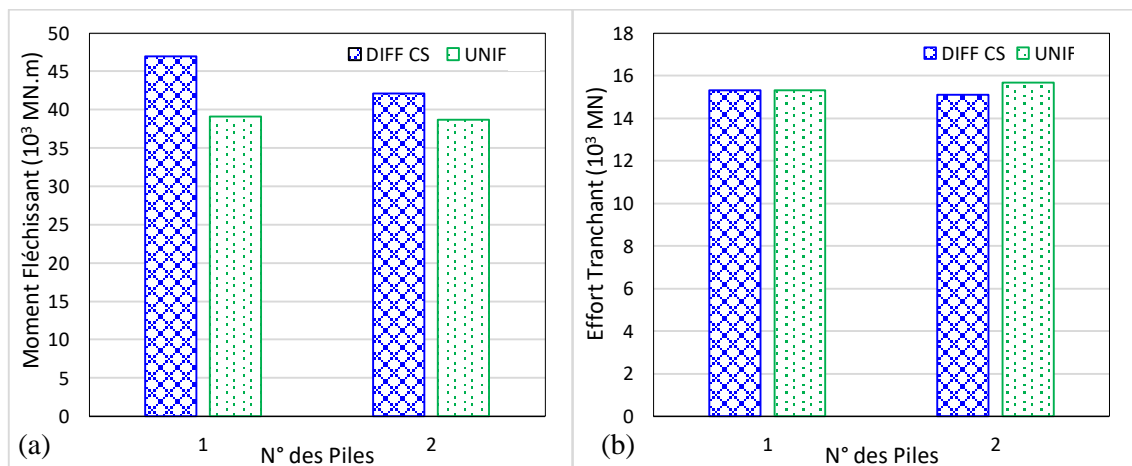


Figure 5. 55. Réponse dynamique des piles sous un chargement sismique (modèle de cohérence et effet de site) : a. Moments fléchissants maximum. b. Efforts tranchants maximum.

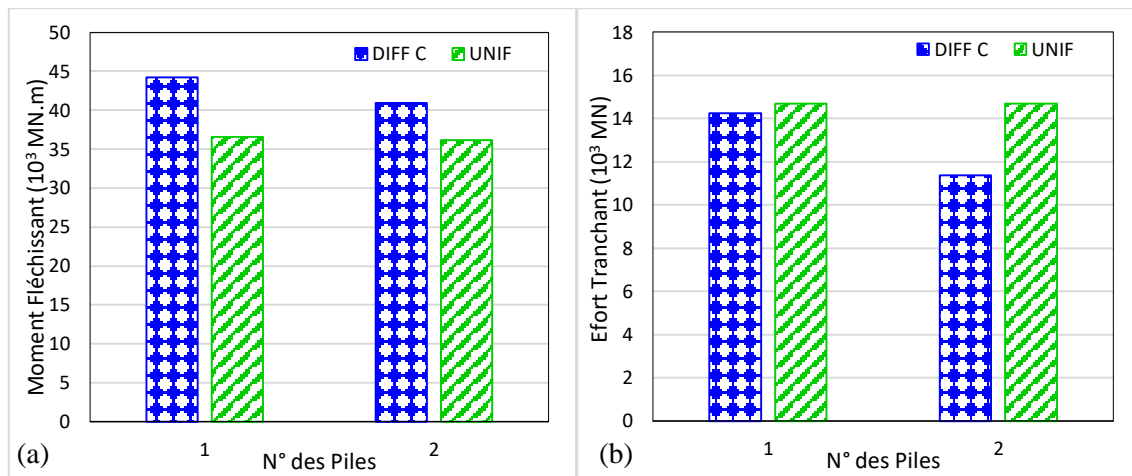


Figure 5. 56. Réponse dynamique des piles sous un chargement sismique (effet de site négligé) : a. Moments fléchissants maximum. b. Efforts tranchants maximum.

Nous remarquons que l'analyse en DIFF CS peut engendrer des demandes sismiques en forces internes supérieures que celles produites par le cas UNIF. 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 5. 55 a et b).

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 valeurs des tranchants, on observe une diminution qui varie entre 3% et 20% (voir figure 5. 56 a 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 de 3% pour la pile 2 et 6% pour la pile 1. Les valeurs des efforts tranchants montrent une augmentation qui varie entre 8% pour la pile 1 et 33% pour la pile 2 (Figure 5. 57 a et b).

Notons que les paramètres locaux du sol de fondation du pont engendrent une amplification du chargement sismique spécialement pour les piles. 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 peut conduire à une sous-estimation des sollicitations internes développées par la structure étudiée.

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 au niveau des 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.

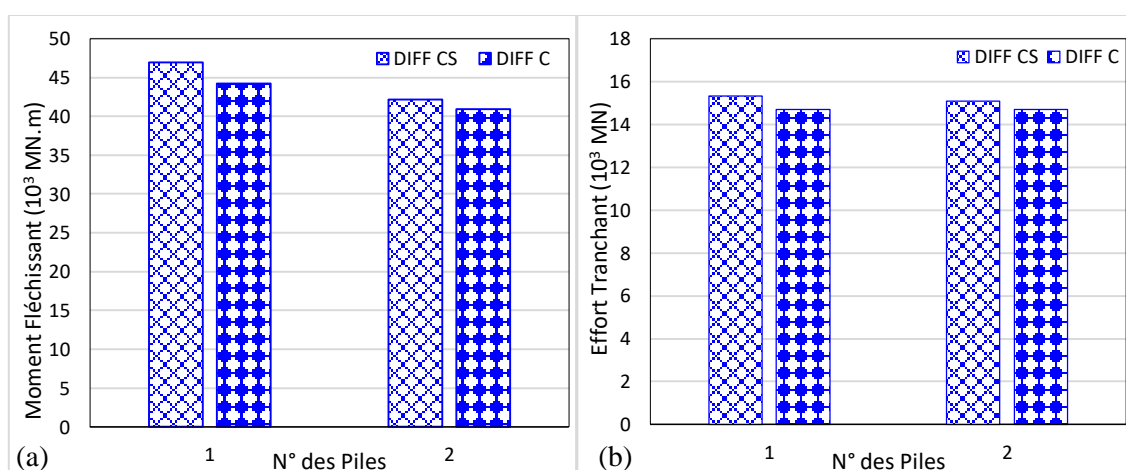


Figure 5. 57. Comparaison des moments fléchissants et efforts tranchants dus à des chargements sismiques différentiels.

a. Modèle de cohérence et effet de site. b. Effet de site négligé.

3.5. Cas d'étude d'un pont ferroviaire de 140 m de longueur

L'objectif principal de cette étude est de quantifier l'influence des caractéristiques multiples du site sur la réponse dynamique d'un pont ferroviaire. En effet, la réponse dynamique du pont sous un chargement sismique différentiel qui prend en compte l'ensemble des facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique est comparée avec celle issue d'un chargement sismique différentiel qui néglige l'effet site et avec celle issue d'un chargement sismique uniforme.

3.5.1. Géométrie du pont ferroviaire

Le pont ferroviaire est d'une longueur totale de 140 m. Il est composé de deux ponts indépendants de 70 m et de trois piles dont la hauteur varie entre 11.90 m et 17.90 m. Le tablier est composé d'une dalle en béton d'une épaisseur de 0.40 m supportée par des poutres en acier d'une hauteur de 2.30 m. Le pont a une largeur de 12.90 m et les piles ont une section de 4x4 m².

3.5.2. Modèle de configuration du site

Tous les codes sismiques donnent une identification de la classification des sites en fonction des propriétés mécaniques des couches de sol qui les constituent, principalement la vitesse de propagation des ondes de cisaillement sismiques.

Basé de l'étude géotechnique de la fondation du sol, où la structure sera implantée, un type de sol doit être choisi en fonction de la classification du site donnée par le code sismique. Une classification des sites est donné pour certains codes sismiques tels que le RPOA (MTP 2010) (code sismique algérien des ponts), Eurocode 8 (Conception des structures pour la résistance aux séismes) (CEN 2004), NCSP-07 (code parasismique espagnol des ponts: Norma de contruccion seismorresistente: Puentes) (MF 2008) et les dispositions du NEHRP (FEMA P-749 2010) dans l'annexe B.

Noter que la classification des sites dans ces codes sismiques est similaire. Dans le RPOA (code sismique algérien pour les ponts) et NCSP-07 (code sismique espagnol pour les ponts), les sites sont classés en quatre catégories (S1 : roche, S2 : ferme, S3 : meuble, S4 : très meuble). L'Eurocode 8, donne six types de sol : A, B, C, D, S1 et S2, tandis que pour les dispositions NEHRP, les sites sont classés en trois types (B : roche, C : sol très dense et roche tendre, D : sol ferme) plus une catégorie pour la roche dure (A : roche dure).

Dans cette étude, quatre configurations de sites sont adoptées sur la base de trois classifications de sols décrites par le RPOA (code sismique algérien des ponts). Les classes de sol choisies sont S2, S3 et S4 correspondant respectivement à un sol ferme (noté F), un sol meuble (noté M) et un sol très meuble (noté S). Sur la base de la vitesse moyenne de propagation des ondes de cisaillement sismique, ces types de sol sont adoptés (voir tableau 5. 14). Le tableau 5. 15 illustre les quatre configurations de site adoptées.

La fondation du site est modélisée comme un sol monocouche avec divers paramètres à chaque support. La figure 5. 58 illustre ce modèle, dans lequel CA, P1, P2, P3 et CB sont les supports sur la surface du sol. Les points correspondants à la roche de base sont respectivement CA', P1', P2', P3' et CB'.

ρ_i et v_i la densité et la vitesse de l'onde de cisaillement du sol sous le support, respectivement, où i représente 1, 2, 3, 4 et 5. Alors que le rapport d'amortissement noté $\xi = 5\%$ et la profondeur $h = 56, 30, 29, 37$ and 54 m, respectivement. Pour chaque configuration de site, ces paramètres sont donnés par le tableau 5. 14. Les paramètres correspondants sur la roche de base sont $\rho_R = 30 \text{ KN/m}^3$, $v_R = 1500 \text{ m/s}$ et $\xi_R = 5\%$.

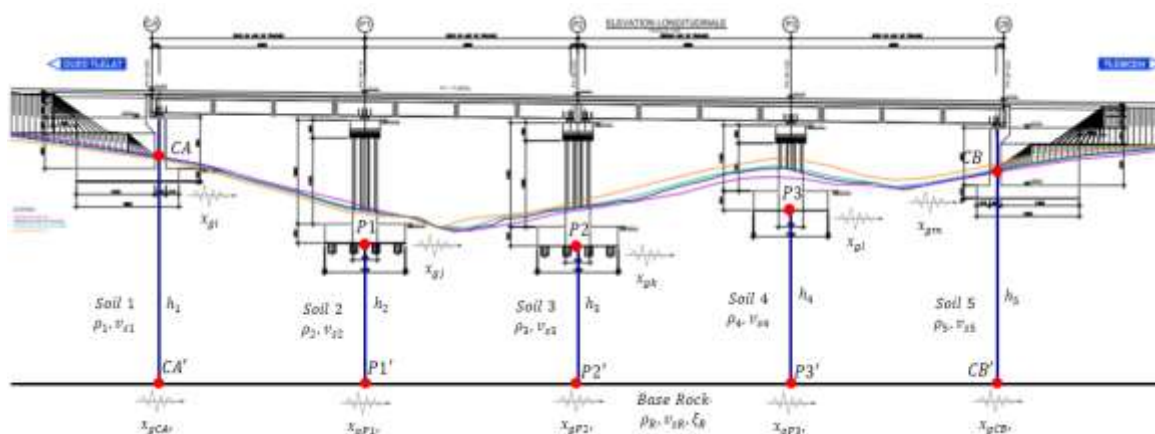


Figure 5. 58. Vue longitudinale du pont et du sol de fondation.

Tableau 5. 14. Paramètres adoptés des types des sites (basé sur le RPOA).

Catégories	Description	Notation	Poids volumique (KN/m ³)	Vs (m/s)
S2	Sol compact	F	20	600
S3	Sol meuble	M	18	300
S4	Sol très meuble	S	15	100

Tableau 5. 15. Configurations adoptées des sites.

Cas	Notation	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Sol 5
1	FMSMF	S2 (F)	S3 (M)	S4 (S)	S3 (M)	S2 (F)
2	FSMSF	S2 (F)	S4 (S)	S3 (M)	S4 (S)	S2 (F)
3	FFSMM	S2 (F)	S2 (F)	S4 (S)	S3 (M)	S3 (M)
4	FSSSF	S2 (F)	S4 (S)	S4 (S)	S4 (S)	S2 (F)

3.5.3. Densité spectrale de puissance du mouvement sismique de référence

Le mouvement sismique cible au substratum rocheux est défini par la fonction de densité spectrale de puissance filtrée Kanai-Tajimi (Équation (4. 33)). Les paramètres de cette fonction sont décrits par DSP3 donné par le tableau 4. 3. Cette fonction est illustrée sur la figure 5. 37.

3.5.4. Choix du modèle de Cohérence

Souvent les modèles de cohérence empiriques sont très souhaités dans l'élaboration de méthodes de simulation des mouvements sismiques spatialement variables (Bi et Hao 2012). Le modèle empirique de cohérence de Sobczyk (1991) est adopté pour la simulation des mouvements sismiques au substratum rocheux.

3.5.5. Amplification des sites

Pour l'ensemble des configurations des sites, les fonctions de transfert correspondantes sont illustrées sur les figures 5. 59 à 5. 62.

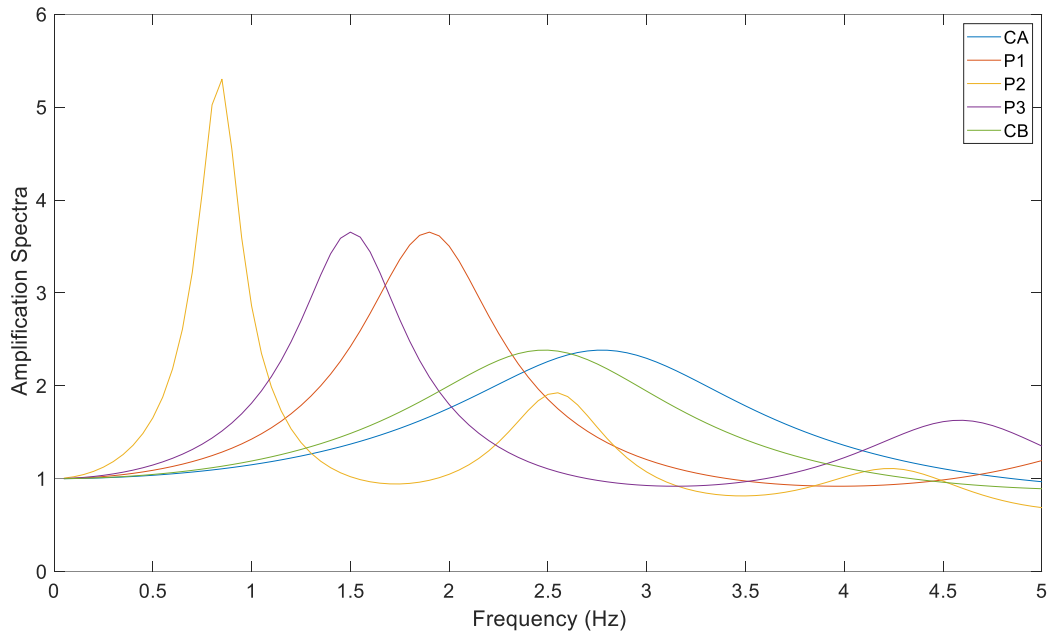


Figure 5. 59. Fonctions de transfert relatives à la configuration du site FMSMF.

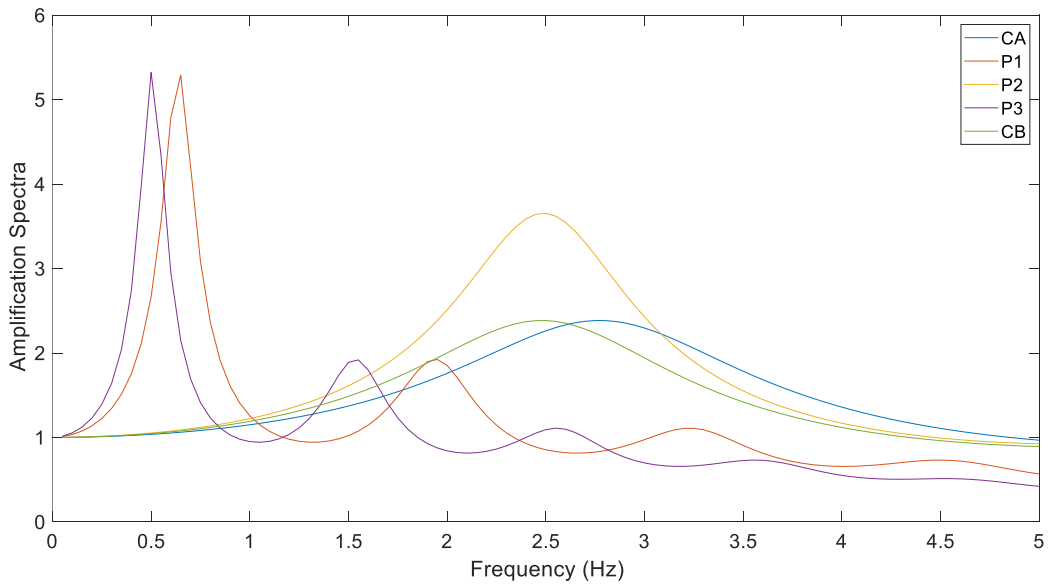


Figure 5. 60. Fonctions de transfert relatives à la configuration du site FSMSF.

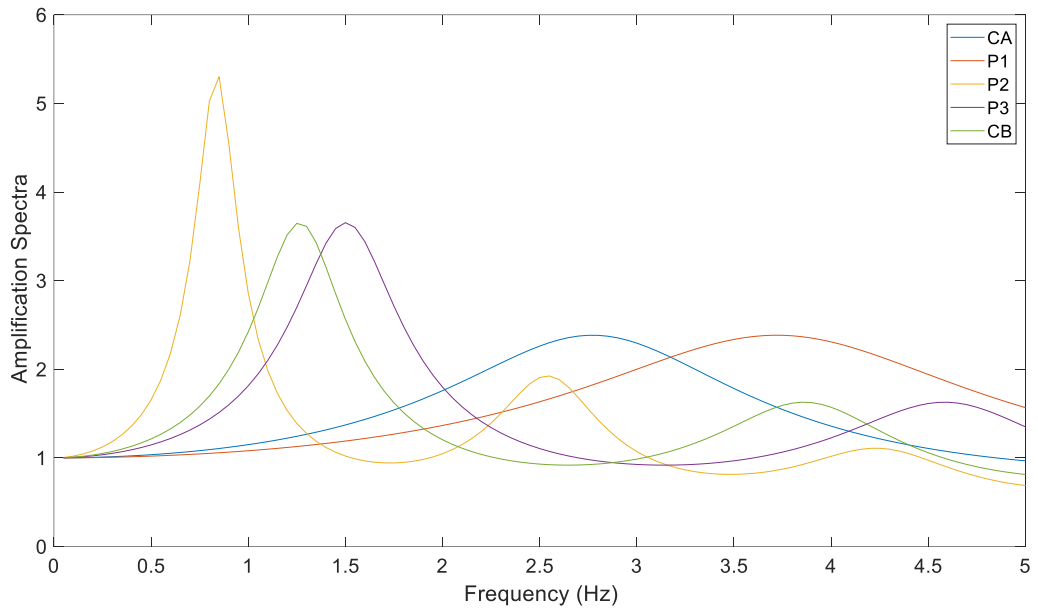


Figure 5. 61. Fonctions de transfert relatives à la configuration du site FFSSMM.

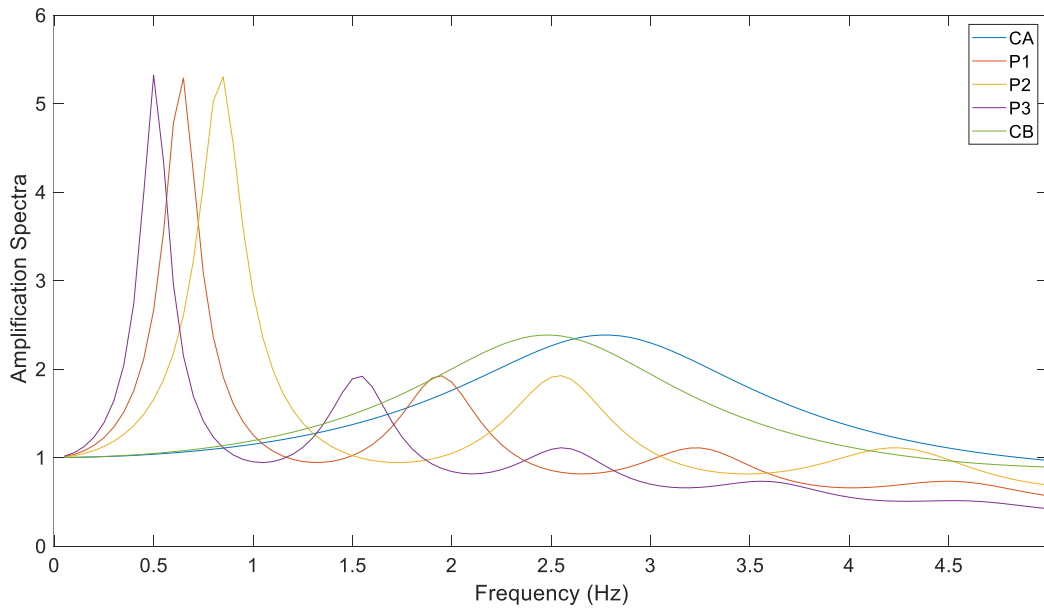


Figure 5. 62. Fonctions de transfert relatives à la configuration du site FSSSF.

Il est à noter que la fréquence dominante est comprise entre 2 et 3 pour le sol ferme, entre 1 et 2 pour le sol meuble et 0.4 et 0.65 pour le sol très meuble.

Pour une épaisseur fixe (exemple du support P1), la fréquence dominante peut prendre la valeur de 0.5 pour un sol très meuble, 1.5 pour un sol meuble et 3 pour un sol ferme. Il convient de noter que la fréquence dominante d'une couche de sol dépend de son épaisseur, de sa rigidité et de sa densité (Liu et al. 2020).

3.5.6. Simulation des chargements sismiques différentiels

Pour chaque configuration de site, l'évolution temporelle des déplacements est simulée dans quatre cas : i) mouvement sismique spatial du sol en tenant compte de tous les facteurs de mouvement spatial du sol, ii) mouvement du sol sismique spatial sans tenir compte de l'effet de site, iii) mouvement sismique spatial du sol avec prise en compte de l'effet de site seul et iv) mouvement sismique uniforme du sol, les résultats sont illustrés sur les figures 5. 63 à 5. 66.

Les déplacements simulés en tenant compte de l'ensemble des facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique sont plus élevés que ceux simulés issus du cas différentiel qui néglige l'effet du site.

Nous avons observé que les déplacements simulés dans le cas différentiel qui néglige l'effet du site et ceux simulés dans le cas uniforme sont comparables en terme d'ordre de grandeur.

Nous avons remarqué que l'effet de site peut fournir des mouvements sismiques plus élevé que ceux simulés en considérant uniquement les effets d'incohérence et de passage d'onde. Pour cela, négliger les conditions locales du site conduit à une sous-estimation du chargement sismique.

Il est à noter que les sites meubles avec une profondeur importante peuvent générer des déplacements importants. Ceci peut être clairement observé pour la configuration du site FSMSF et FSSSF.

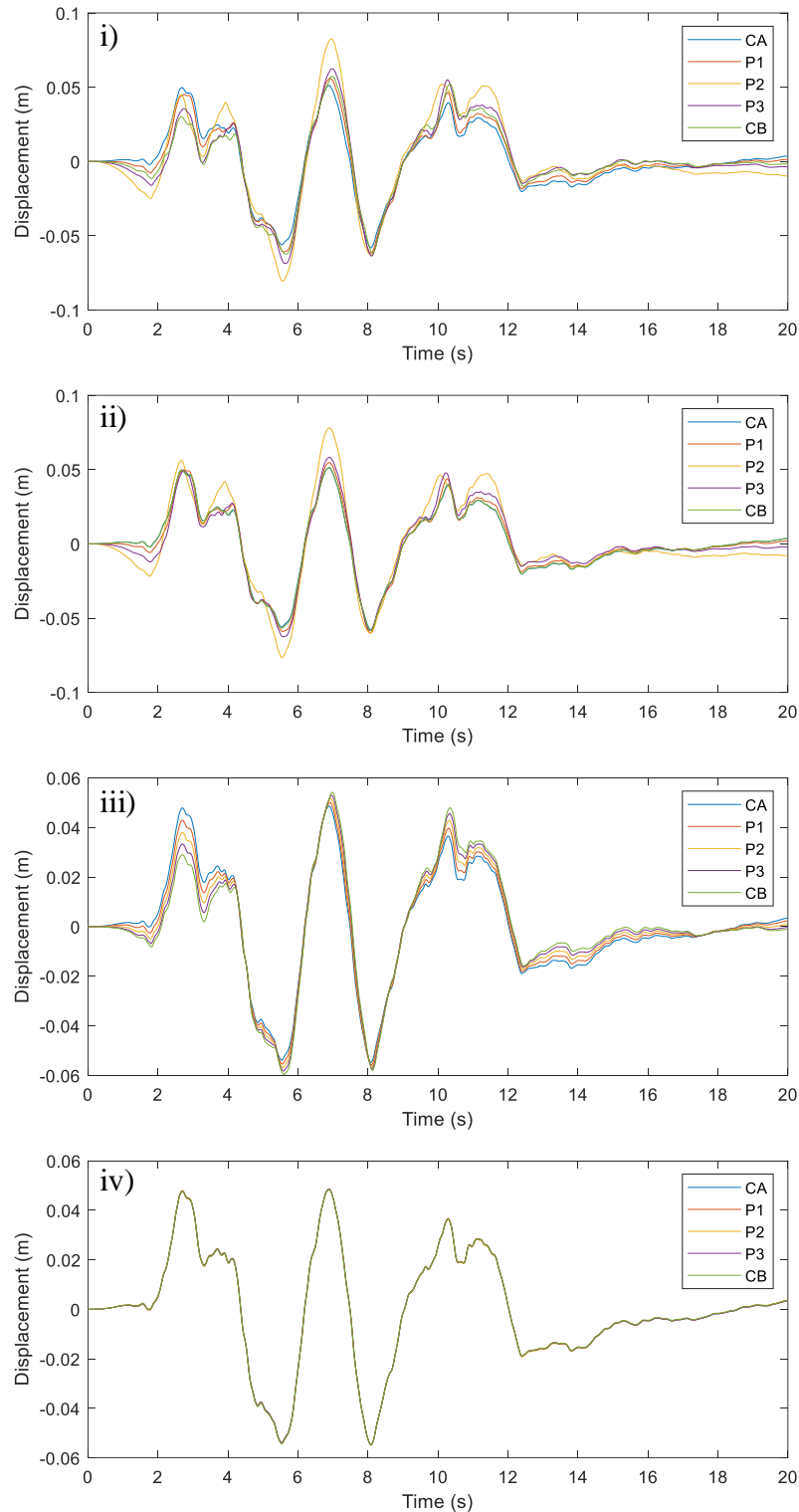


Figure 5. 63. Mouvement sismique du sol généré en déplacement pour la configuration du site FMSMF. i) en tenant compte de tous les facteurs du mouvement spatial du sol ; ii) en ne tenant compte que des effets locaux du site; iii) sans tenir compte des effets locaux du site; iv) uniforme.

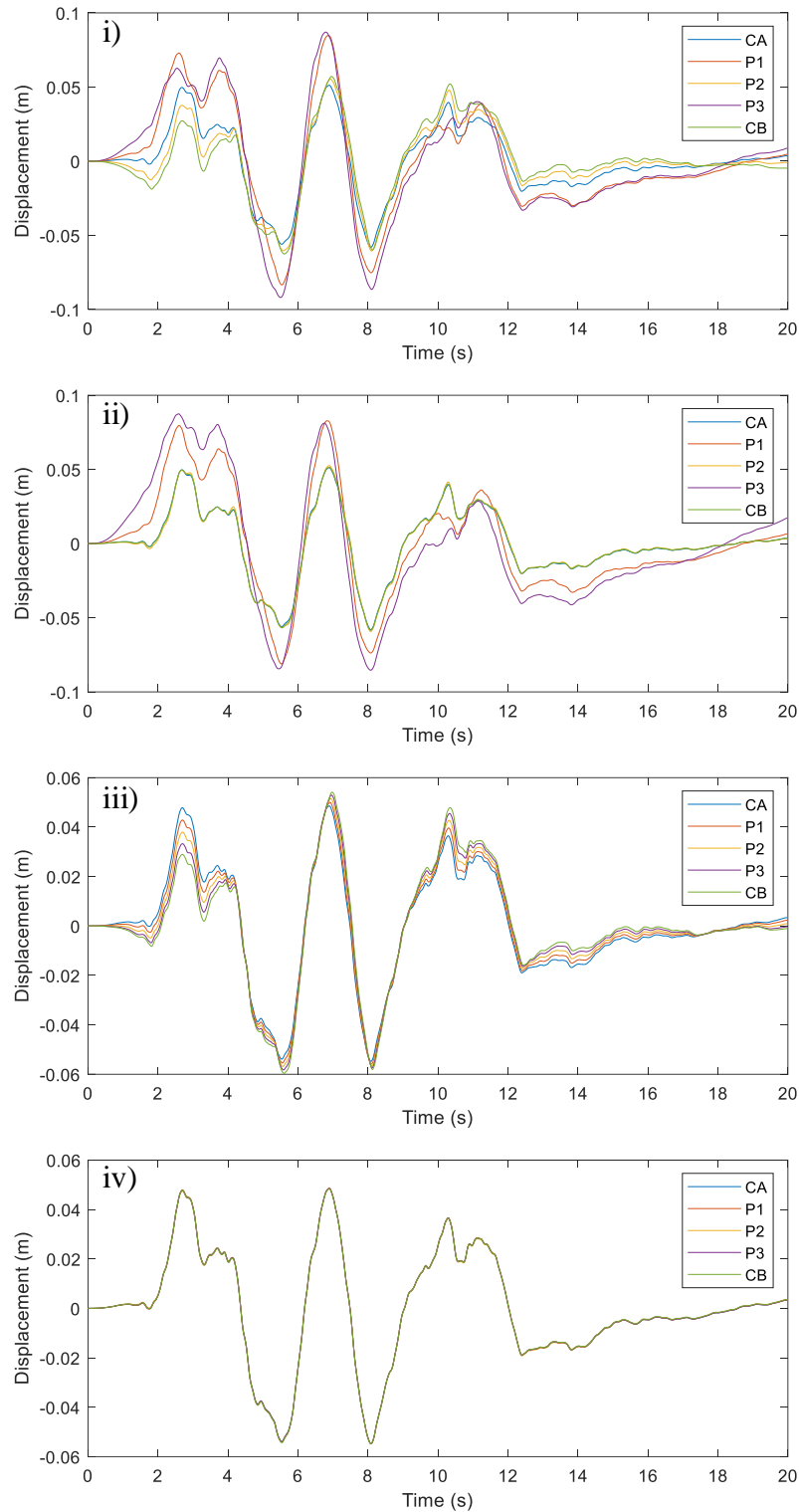


Figure 5. 64. Mouvement sismique du sol généré en déplacement pour la configuration du site FSMSF. i) en tenant compte de tous les facteurs du mouvement spatial du sol ; ii) en ne tenant compte que des effets locaux du site ; iii) sans tenir compte des effets locaux du site ; iv) uniforme.

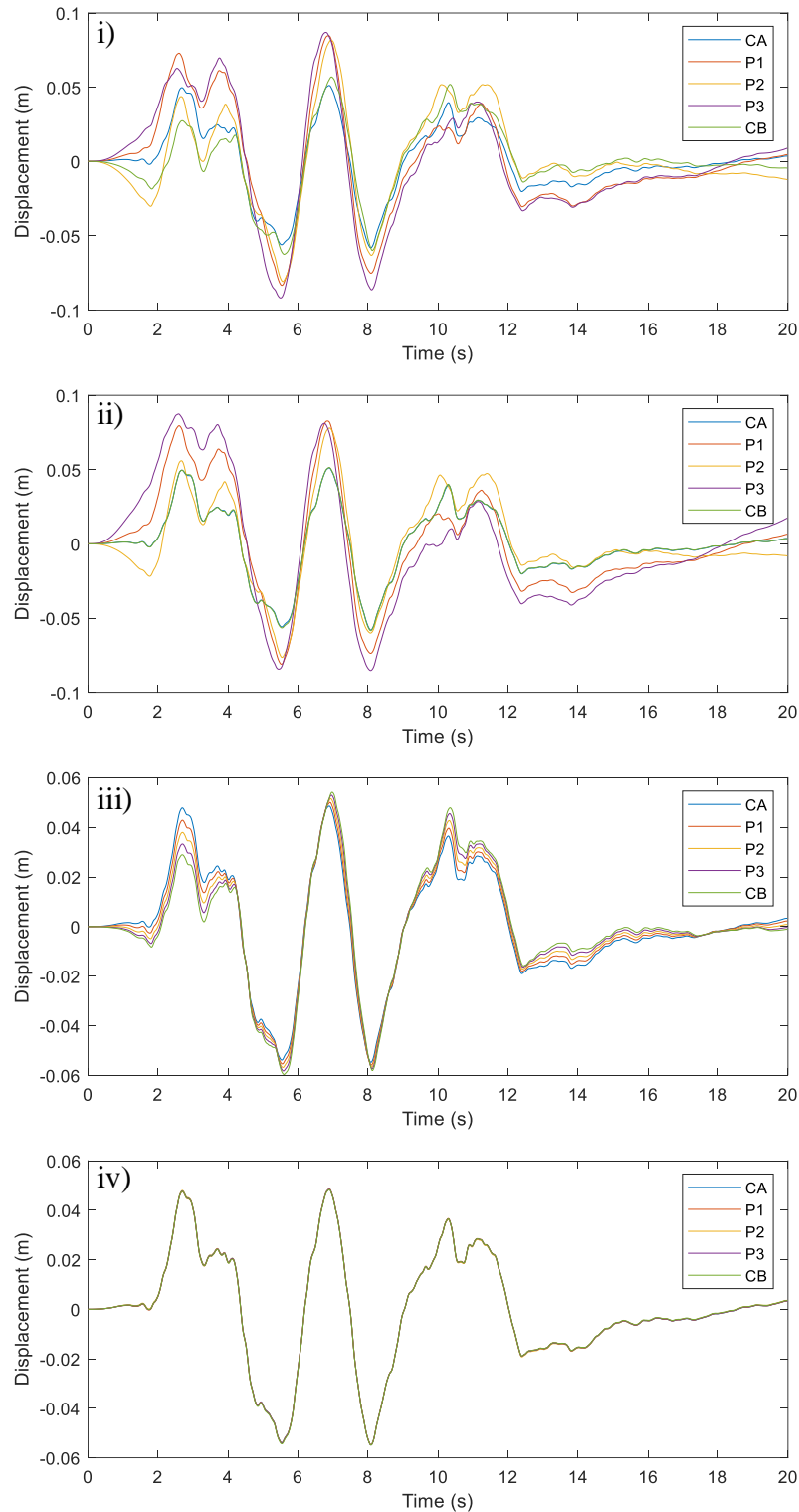


Figure 5. 65. Mouvement sismique du sol généré en déplacement pour la configuration du site FFSMM. i) en tenant compte de tous les facteurs du mouvement spatial du sol ; ii) en ne tenant compte que des effets locaux du site ; iii) sans tenir compte des effets locaux du site ; iv) uniforme.

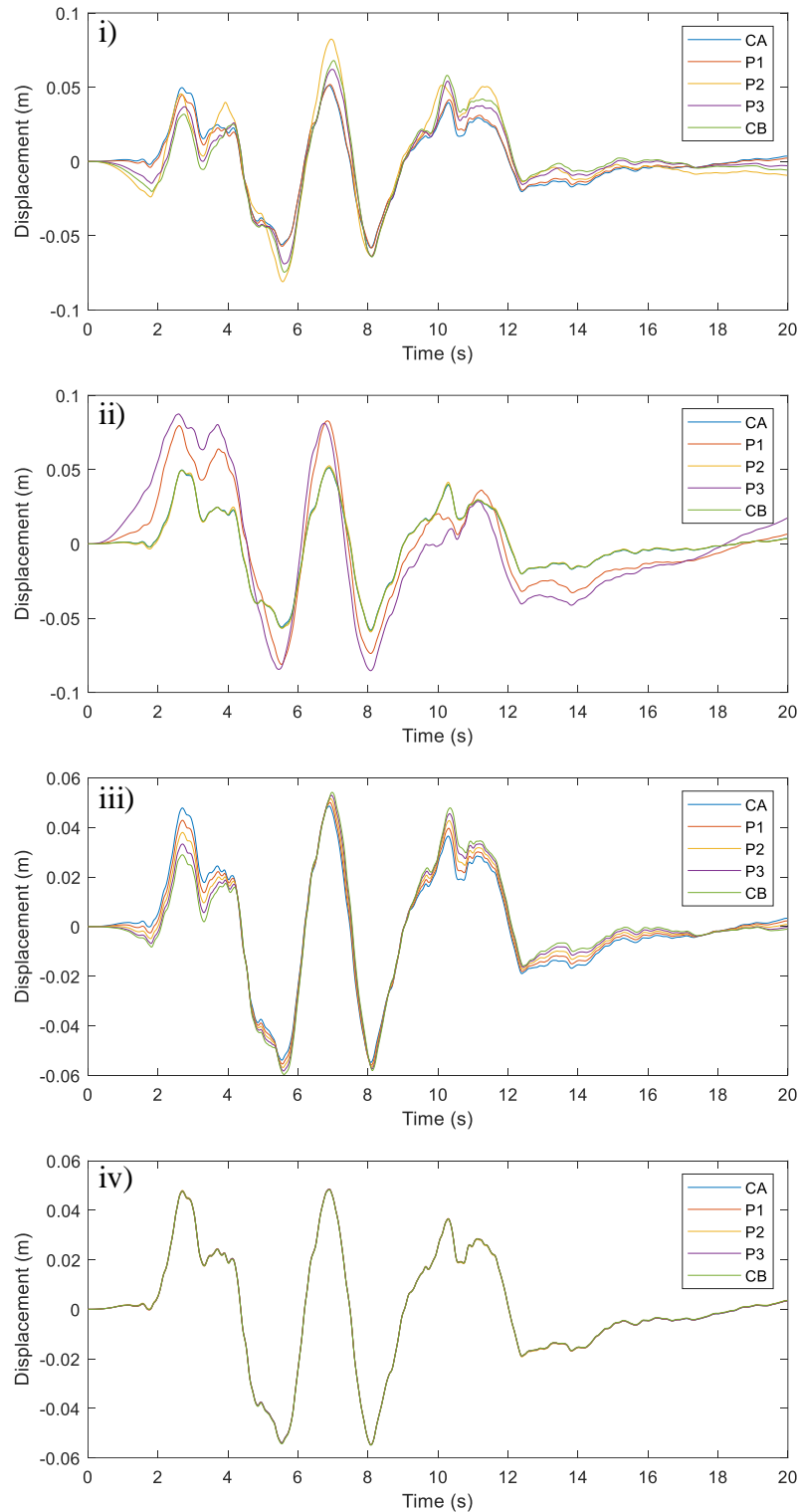


Figure 5. 66. Mouvement sismique du sol généré en déplacement pour la configuration du site FSSSF. i) en tenant compte de tous les facteurs du mouvement spatial du sol ; ii) en ne tenant compte que des effets locaux du site ; iii) sans tenir compte des effets locaux du site ; iv) uniforme.

3.5.7. Modèle du pont en éléments finis

Un modèle tridimensionnel en éléments finis du pont ferroviaire est réalisé (Figure 5. 67). Le tablier en béton est modélisé par des éléments Shell et les poutres en acier par des éléments linéaires. En supposant que les connexions entre les poutres en acier et les poutres de finition sont supposées rigides, modélisées par des éléments de liaison (Link).

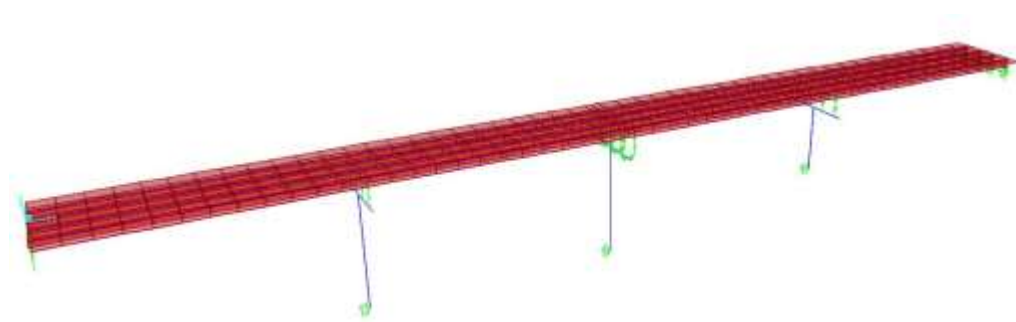


Figure 5. 67. Modèle tridimensionnel en éléments finis du pont ferroviaire.

3.5.8. Analyse dynamique du pont

L'analyse dynamique du pont ferroviaire est réalisée en utilisant les déplacements simulés précédemment. Pour chaque configuration de site, quatre cas de chargement sismique sont adoptés. Dans le premier cas (noté SVGM-WSE), le chargement sismique prend en compte tous les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique. Le second cas est un chargement sismique différentiel qui néglige l'effet de site (noté SVGM-WOSE). Le troisième cas du chargement sismique considérant uniquement l'effet du site (noté UNIF-SE). Le dernier cas de chargement sismique est uniforme (noté UNIF) et il est utilisé à titre de comparaison.

Pour l'ensemble des configurations de site, plusieurs analyses dynamiques ont été effectuées selon les quatre cas de charge. Les résultats sont exprimés en termes de moments fléchissants et effort tranchant aux trois piles du pont (Figures 5. 69 à 5. 71 pour la configuration du site FMSMF, figures 5. 72 à 5. 74 pour la configuration du site FSMSF, figures 5. 75 à 5. 77 pour la configuration du site FFSMM et figures 5. 78 à 5. 80 pour le site configuration FSSSF). La figure 5. 68 illustre la comparaison entre les résultats des analyses dynamiques sous chargement différentiel qui néglige l'effet du site

et ceux issus à partir d'un mouvement sismique uniforme où une légère variation d'environ 4% est observée.

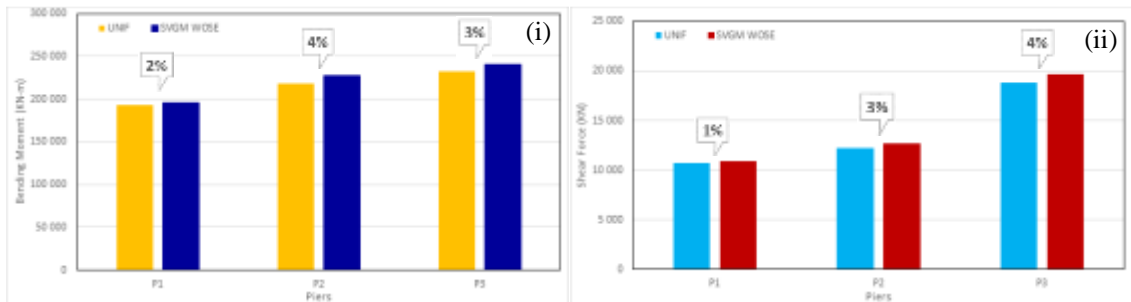


Figure 5. 68. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WOSE et UNIF pour toutes les configurations de site, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.

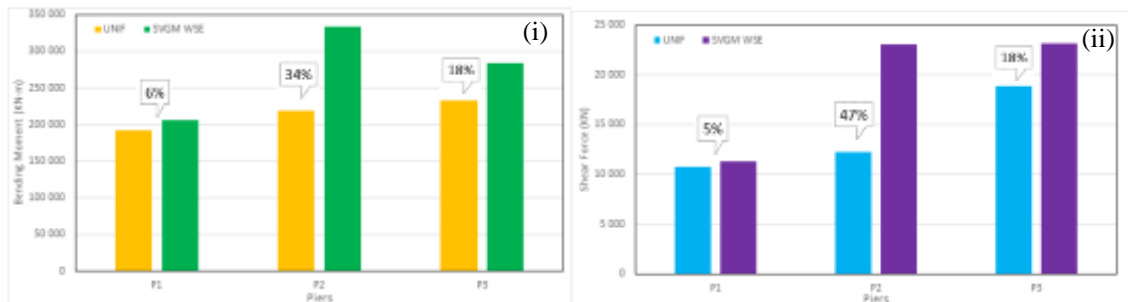


Figure 5. 69. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WSE et UNIF pour la configuration de site FMSMF, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.

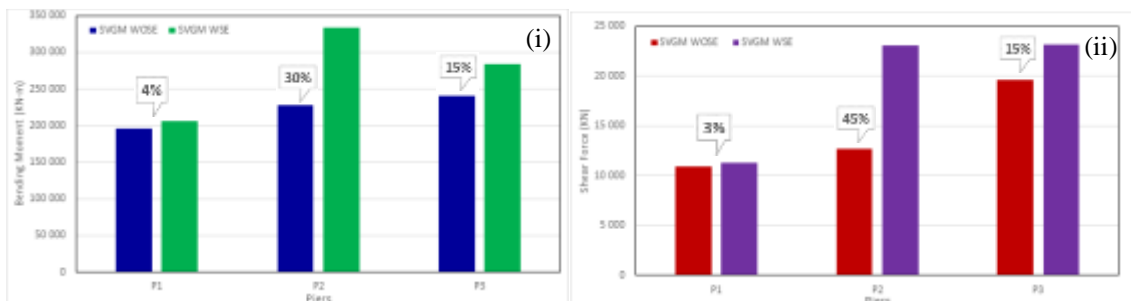


Figure 5. 70. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WSE et SVGM-WOSE pour la configuration de site FMSMF, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.

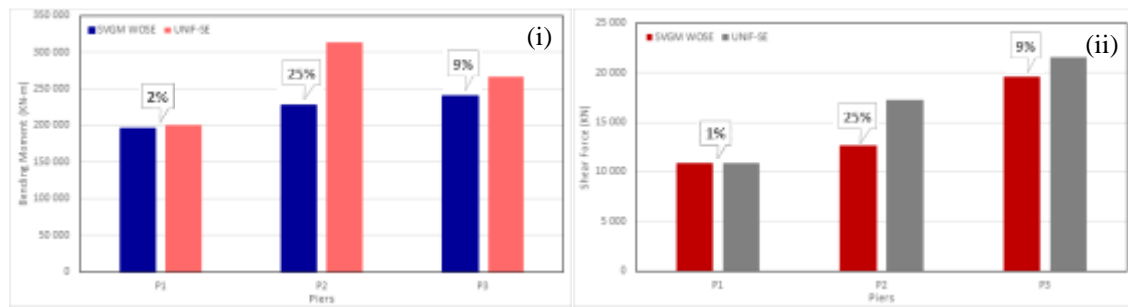


Figure 5. 71. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WOSE et UNIF-SE pour la configuration de site FMSMF, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.

Pour la configuration du site FMSMF, les moments fléchissants du cas de chargement SVGM-WSE sont supérieurs à ceux du cas de chargement uniforme d'environ 6% pour la pile P1, 34% pour la pile P2 et 18% pour la pile P3. En comparant les efforts tranchants, on retrouve le même constat avec augmentation de 47% pour la pile P2 (Figure 5. 69).

La comparaison entre les résultats dus aux chargements SVGM-WSE et SVGM-WOSE montre une variation maximale des moments fléchissants de 30% pour la pile P2. La variation maximale des efforts tranchants est observée à la même pile avec un taux de 45% (Figure 5. 70).

Dans un but de quantifier l'influence de l'effet de site seul, une comparaison entre les résultats dus aux chargements SVGM-WOSE et SVGM-SE est établie. Il apparaît que la configuration du site FMSMF donne lieu à des efforts internes importants. Le surplus est d'environ 25% pour la pile P2 et 10% pour la pile P3. Tandis que pour la pile P1, on retrouve presque les mêmes valeurs (Figure 5. 71).

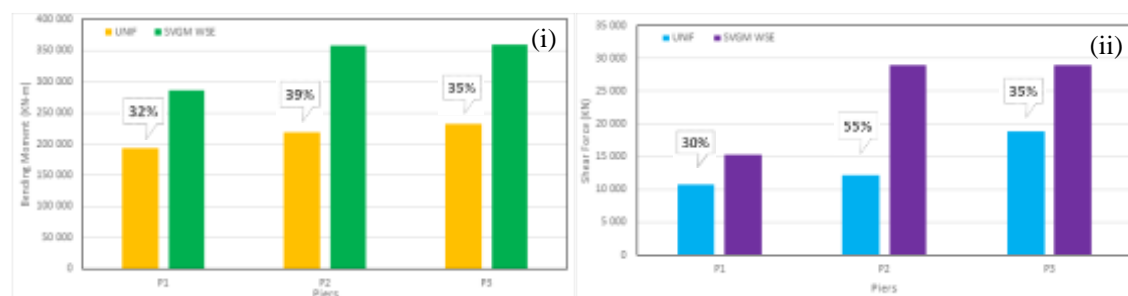


Figure 5. 72. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WSE et UNIF pour la configuration de site FMSMF, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.

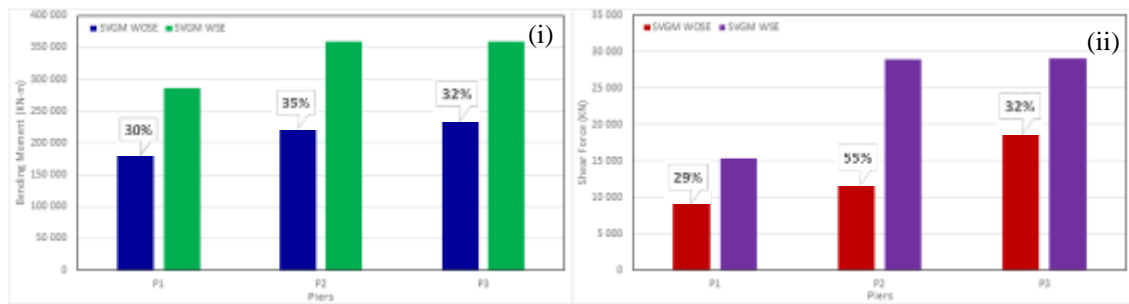


Figure 5. 73. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WSE et SVGM-WOSE pour la configuration de site FSMSF, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.

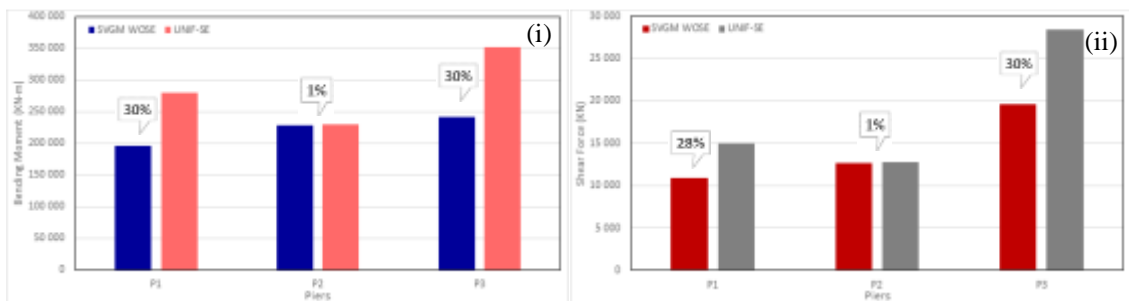


Figure 5. 74. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WOSE et UNIF-SE pour la configuration de site FSMSF, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.

En adoptant la configuration du site FSMSF, le cas de chargement sismique SVGM-WSE donne également des forces internes plus élevées que celles d'un cas de chargement uniforme. Le surplus en moments fléchissants et en efforts tranchants est d'environ 30% pour le pile P1 et 35% pour le pile P3 (Figure 5. 72 i). Alors que pour la pile P2, ce rapport est de 40% pour les moments fléchissants et de 55% pour l'effort tranchant (Figure 5. 72 ii).

Lors de la comparaison des moments fléchissants et des efforts tranchants des cas de chargement sismique SVGM-WSE et SVGM-WOSE, une augmentation d'environ 30% pour la pile P1 et 32% pour la pile P3, est constatée. Pour la pile P2, le surplus de moments fléchissants et efforts tranchants est de 35% et 55%, respectivement (Figure 5. 73).

La prise en compte de l'effet de site seul pour un chargement sismique différentiel donne lieu à des efforts internes supérieurs de 30% à ceux résultant du chargement sismique

différentiel SVGM-WOSE pour les piles P1 et P2. En revanche, ces efforts internes sont identiques pour la pile P2 (Figure 5. 74).

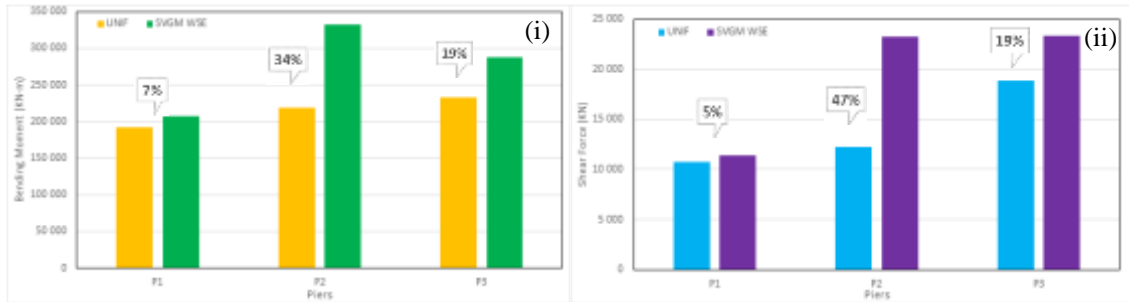


Figure 5. 75. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WSE et UNIF pour la configuration de site FFSMM, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.

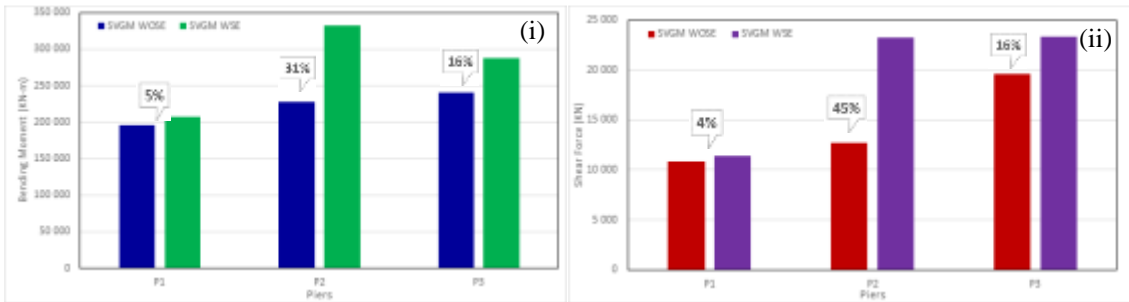


Figure 5. 76. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WSE et SVGM-WOSE pour la configuration de site FFSMM, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.

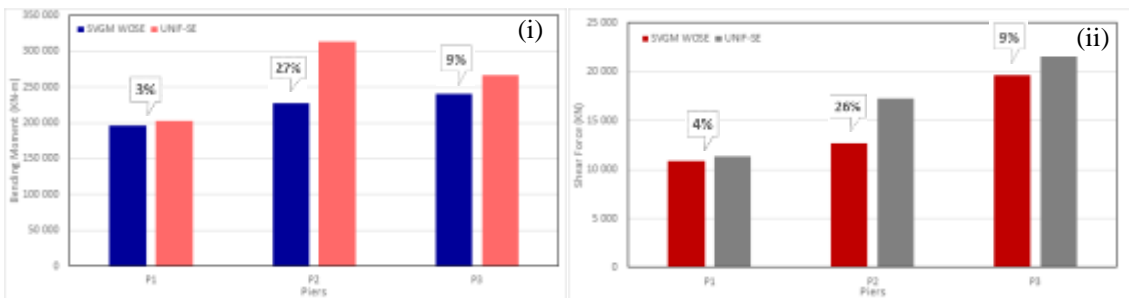


Figure 5. 77. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WOSE et UNIF-SE pour la configuration de site FFSMM, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.

Au niveau de la troisième configuration du site FFSMM, le cas de chargement SVGM-WSE donne également des forces internes plus élevées que celles développées sous une excitation sismique uniforme d'environ 5% pour la pile P1 et 19% pour la pile P3. Alors que pour la pile P2, la variation des moments fléchissant est de 34% et des efforts tranchants est de 47% (Figure 5. 75).

La comparaison entre les résultats des cas de chargement SVGM-WSE et SVGM-BOSE donne lieu à des efforts internes supérieurs à 5% pour la pile P1 et 16% pour la pile P3. Pour la pile P2, le surplus des moments fléchissants est d'environ 30% et des efforts tranchants est de 45% (Figure 5. 76).

La contribution aux efforts internes de l'effet de site seul en adoptant la configuration FFSMM est d'environ 25% pour la pile centrale et d'environ 10% pour la dernière pile. Une légère variation des efforts internes est observée au niveau de la première pile (Figure 5. 77).

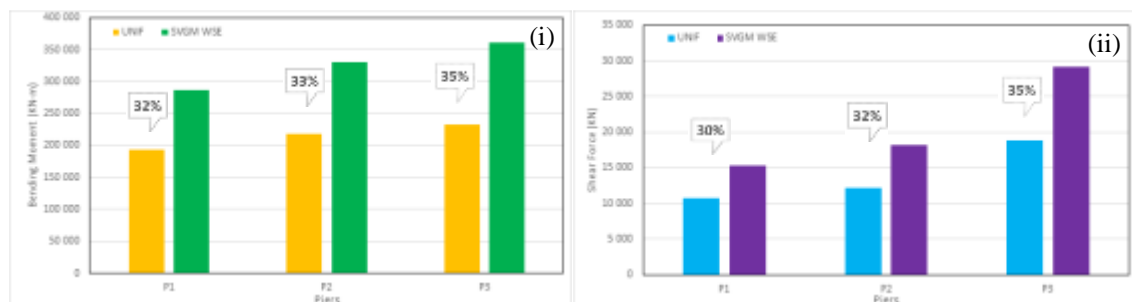


Figure 5. 78. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WSE et UNIF pour la configuration de site FSSSF, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.

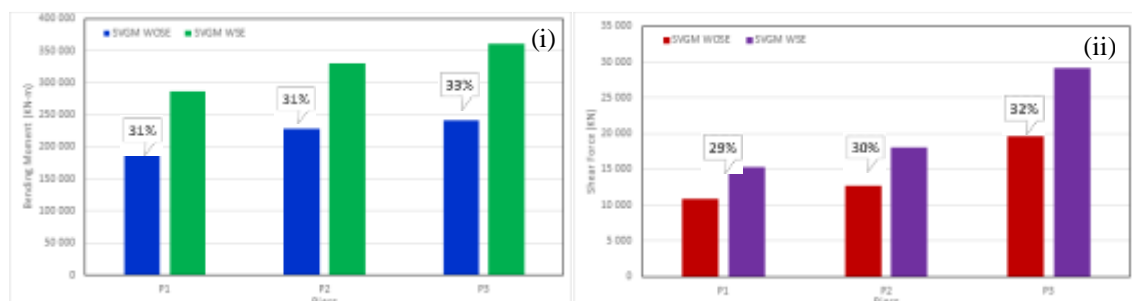


Figure 5. 79. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WSE et SVGM-BOSE pour la configuration de site FSSSF, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.

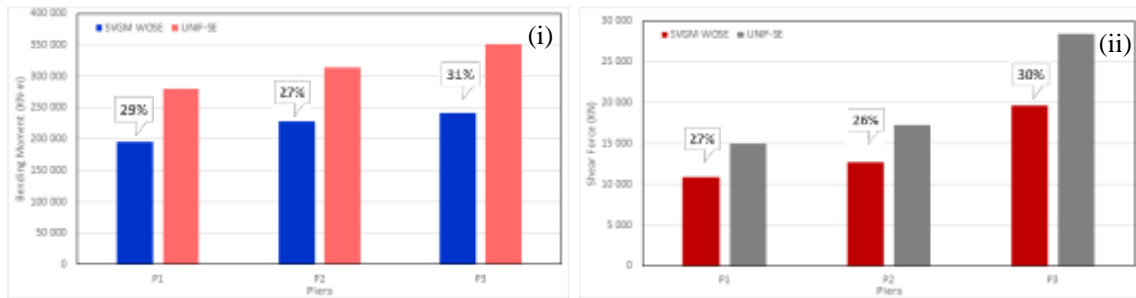


Figure 5. 80. Comparaison de la réponse dynamique des piles sous les cas de chargement sismique SVGM-WOSE et UNIF-SE pour la configuration de site FSSSF, i) Moments fléchissants maximum ; ii) Efforts tranchants maximum.

Lors de la comparaison des résultats des cas de chargement SVGM-WSE et uniforme, on observe une variation des efforts internes entre 30% et 35% pour toutes les piles (Figure 5. 78).

En adoptant la configuration du site FSSSF, les efforts internes produits sous chargement SVGM-WSE sont supérieurs à ceux du cas de chargement SVGM-WOSE avec une augmentation qui varie entre 29% et 33% pour les trois piles (Figure 5. 79).

D'après les figures 5. 80. i et 5. 80. ii, il est clair que l'effet de site, apporte un surplus d'environ 30% en termes d'efforts internes aux trois piles du pont.

On peut en déduire qu'à une profondeur d'environ 30 m, l'amplification du mouvement sismique est faible pour un sol ferme (F : classe S2) ou meuble (M : classe S3) avec un taux d'environ 5%. Alors que pour un sol très meuble (S : classe S4), l'amplification devient significative, de l'ordre de 30%.

Alors qu'à une profondeur d'environ 50 m, l'amplification du mouvement sismique pour un sol ferme (F : classe S2) ou meuble (M : classe S3) atteint un taux de 15%. Pour un sol très meuble (S : classe S4), l'amplification atteint les 33%.

3.6. Synthèse et conclusions

En adoptant le modèle d'un site monocouche, deux applications de simulation des mouvements sismiques spatialement variables ont été réalisées ; à savoir, un portique de pont supporté par deux piles et un autre portique supporté par trois piles. La distance entre

les piles est de 100 m et les conditions de site sous chaque appui de ces portiques sont différentes.

Trois cas d'étude ont été également entrepris dans cette partie ; à savoir, un viaduc ferroviaire de 160 m de longueur, le pont à haubans de Mila et un pont ferroviaire de 140 m de longueur. Différents chargements sismiques ont été simulés au niveau de chaque appui de ces ponts. Ensuite, une série d'analyses dynamiques des modèles tridimensionnels de ces ponts ont été réalisées. Les efforts internes issus des quatre cas d'excitations sont comparés en termes de moments fléchissants et d'efforts tranchants au niveau des piles. Le but de ces cas d'étude est l'évaluation de l'influence de l'effet de site d'une part, sur les mouvements sismiques différentiels et d'autre part sur la réponse dynamique des ponts.

Une étude paramétrique de l'influence de l'épaisseur de la couche de sol et le type du site considéré sur l'amplification du site est réalisée. Les résultats de cette étude paramétrique montrent que plus la couche de sol est profonde, plus souple est le site et plus faible est la fréquence prédominante. Deux cas particuliers sont présentés où les fréquences prédominantes sont quasi-identiques sur les deux sites.

Quatre cas de simulations ont été considérés afin de simuler les signaux sismiques en accélération et en déplacement. Il convient de noter que dans le cas uniforme, les mouvements sismiques simulés sur différents sites coïncident parfaitement. Ce cas valide la technique de simulation des signaux sismiques.

Une étude paramétrique de l'influence de l'effet d'amplification sur la réponse dynamique d'un pont ferroviaire de 140 m de longueur est menée. Plusieurs configurations de site ont été adoptées. Ce travail a conduit à simuler soixante-quatre signaux sismiques et élaborer le même nombre d'analyses dynamiques du modèle du pont.

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 variabilité spatiale du mouvement sismique et que l'effet de l'amplification du site sur les mouvements sismiques simulés en surface est prédominant. Il a été constaté que l'effet de site seul peut conduire à des chargements sismiques considérables.

Les résultats des cas d'étude démontrent que le fait de considérer les effets d'incohérence et de passage d'onde pour représenter les chargements sismiques différentiels c.à.d. tenir en compte la variabilité spatiale du mouvement sismique, ne reflète en aucun cas la demande sismique réelle. En effet, les conditions locales de site peuvent même développer des mouvements sismiques similaires à la considération de se limiter aux effets d'incohérence et de passage d'onde. Les conséquences de négliger l'effet de site sont clairement visibles sur la réponse dynamique.

Les résultats de l'étude paramétrique du pont ferroviaire de 14 m de longueur montrent que la configuration de site FSMSF est le cas le plus défavorable en termes d'efforts internes. Cela est dû aux changements brusques des caractéristiques du sol d'un support à un autre. Ce qui favorise l'apparition des déplacements pseudo-statiques entre les supports du pont.

L'amplification des mouvements sismiques a une relation directe avec le type de site considéré. Elle varie très peu pour des sites rigides et elle devient très considérable pour des sites souples. Une autre conclusion très importante c'est que cette amplification commence à se stagner à partir d'une profondeur de 30 m pour des sites considérés très meubles. L'effet de site peut donner naissance à une amplification significative du mouvement sismique, provoquant une augmentation de la demande sismique de la structure, en particulier lorsque les caractéristiques du sol changent d'un support à l'autre.

4. Modélisation de l'effet de site par un sol multicouche

Cette partie consiste à réaliser des applications numériques de la technique de simulation des mouvements sismiques spatialement variables, développée dans le quatrième chapitre. Notons que tous les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique sont pris en compte. Au niveau de ces applications, l'effet de site est caractérisé par un sol multicouche de caractéristiques différentes. L'objectif est de modéliser les conditions locales du site telles qu'elles sont dans le cas réel conformément aux résultats des reconnaissances géotechniques réalisées in-situ. A cet effet, la fonction de transfert est calculée pour chaque couche en commençant du substratum rocheux jusqu'à la surface

du sol. Une formulation simplifiée de cette considération de l'effet de site pour la pratique de calcul parasismique par les ingénieurs doit être investie.

Une comparaison entre cette considération de l'effet de site et celle basée sur un sol monocouche s'impose. En effet, un site multicouche où chaque couche est définie par ses propres caractéristiques géotechniques, est modélisé par un site monocouche avec des propriétés équivalentes. Cette comparaison sera abordée dans la première application.

4.1. Simulation du chargement sismique d'un portique de pont supporté par trois piles

4.1.1. Caractéristiques géométriques de l'exemple

Le schéma proposé est une structure d'un 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 1, 2 et 3 et leurs projections au substratum rocheux 1', 2' et 3', respectivement (Figure 5. 81).

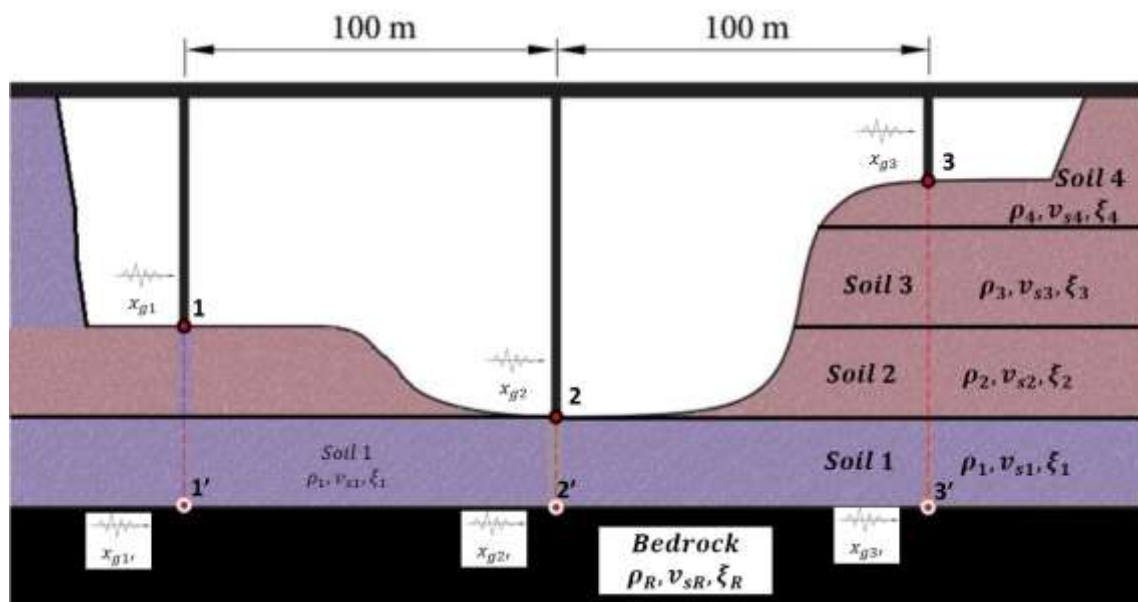


Figure 5. 81. Schéma de d'un pont implanté sur un site multicouche.

4.1.2. Comparaison de modèles de l'effet de site

Dans cette application de simulation des mouvements sismiques spatialement variables, l'effet de site est modélisé par un sol multicouche. Une comparaison entre cette modélisation de l'effet de site et celle qui le considère comme un sol monocouche est établie. En effet, cette dernière considération se base sur le principe de la réglementation parasismique considérant un site monocouche.

Dans une première étape, l'amplification est déterminée pour un site multicouche en calculant la fonction de transfert pour chaque couche de sol. A la fin du calcul, la fonction de transfert finale sera combinée en représentant le contraste des déplacements entre le substratum rocheux et la surface de sol. Ensuite, les caractéristiques équivalentes définies principalement par la vitesse équivalente de propagation des ondes de cisaillement et la masse volumique des sols sont calculées en utilisant les équations (5. 1) (MTP 2010) et (5. 2) (Bouafia 2010), respectivement.

$$V_{seq} = \frac{\sum_1^n h_i}{\sum_1^n \left(\frac{h_i}{v_{si}} \right)} \quad (5. 1)$$

$$\rho_{eq} = \frac{\sum_1^n (\rho_i h_i)}{\sum_1^n h_i} \quad (5. 2)$$

En se basant sur les caractéristiques de sol équivalentes, l'amplification est calculée en utilisant le modèle multicouche de l'effet de site avec un nombre de couche unitaire.

Une troisième estimation de l'amplification est réalisée en adoptant la première considération de l'effet de site, celle d'un sol monocouche, traitée auparavant. Les résultats de cette comparaison sont présentés dans les tableaux 5. 16 et 5. 17. Ainsi, les fonctions de transfert calculées sont illustrées sur les figures 5. 82, 5. 83 et 5. 84.

Les fréquences prédominantes calculées par les trois manières sont quasi-identiques. En effet, un surplus d'environ 15% est enregistré pour le point 1 entre la fréquence prédominante calculée du modèle multicouche en considérant le nombre de couche réel et celle calculée par le modèle monocouche.

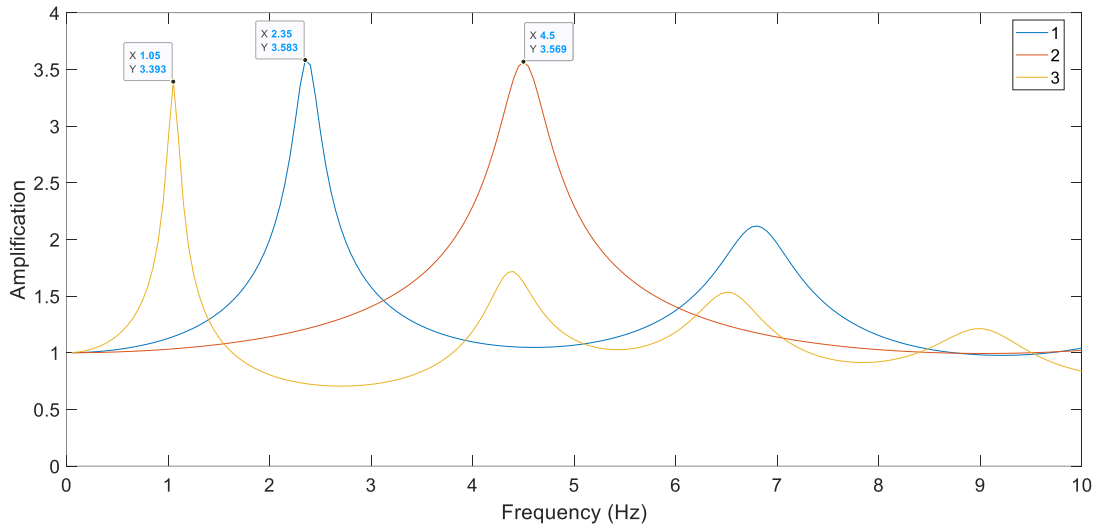


Figure 5.82. Fonctions de transfert au niveau des points situés à la surface en utilisant le modèle multicouche avec le nombre de couche réel.

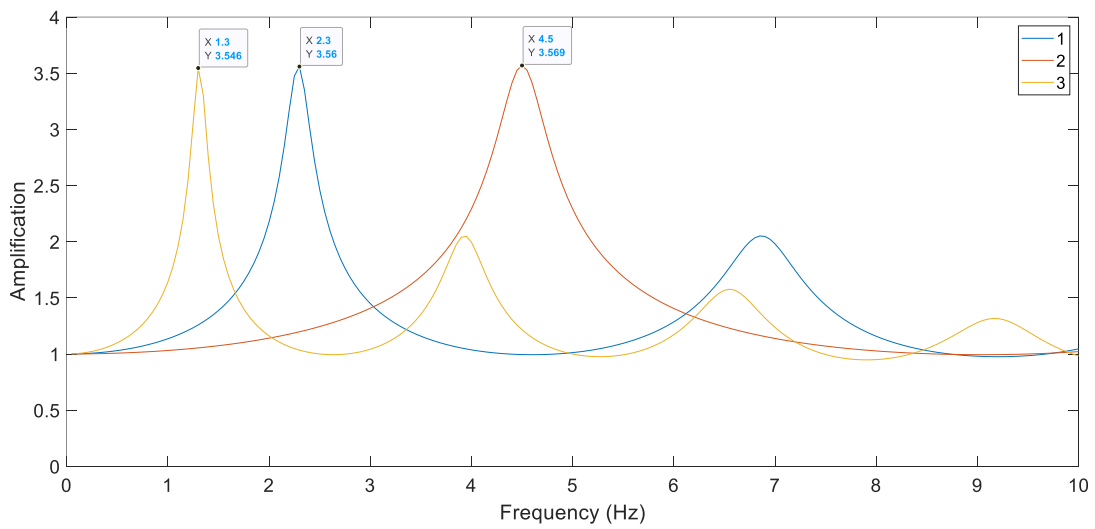


Figure 5.83. Fonctions de transfert au niveau des points situés à la surface en utilisant le modèle multicouche avec une seule couche.

Concernant l'amplitude de l'amplification, une différence de l'ordre de 9% est constatée entre la fréquence prédominante calculée du modèle multicouche en considérant le nombre de couche réel et celle calculée le modèle monocouche.

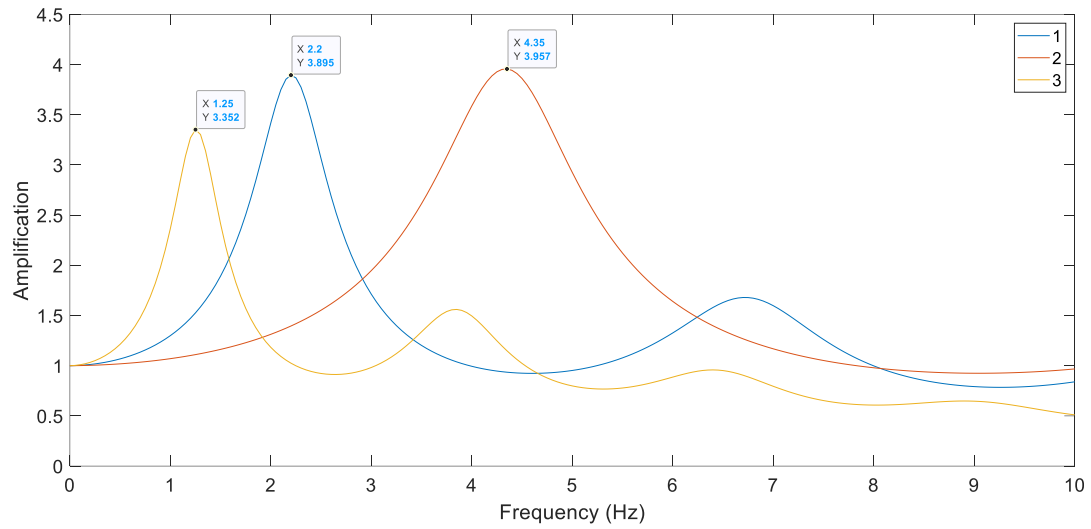


Figure 5. 84. Fonctions de transfert au niveau des points situés à la surface en utilisant le modèle monocouche.

Tableau 5. 16. Fréquence prédominantes des sites en utilisant les trois méthodes.

	Point 1	Point 2	Point 3
Modèle multicouche (Nombre de couche réel)	1.05	2.35	4.50
Modèle multicouche (Nombre de couche = 1)	1.30	2.30	4.50
Modèle monocouche	1.25	2.20	4.35

Tableau 5. 17. Amplitudes d'amplification des sites en utilisant les trois méthodes.

	Point 1	Point 2	Point 3
Modèle multicouche (Nombre de couche réel)	3.393	3.583	3.569
Modèle multicouche (Nombre de couche = 1)	3.546	3.560	3.569
Modèle monocouche	3.352	3.895	3.957

4.1.3. Densité spectrale de puissance de cible

Les paramètres de la fonction de densité spectrale de puissance Kanai-Tajimi filtrée correspondent à DSP1 décrite par le tableau 4. 3. L'accélération maximale (PGA) qui correspond à ces valeurs est 0.2 g, le déplacement maximal (PGD) est de 0.082 m et la durée du signal est 20 s. Cette fonction de densité spectrale a été présentée précédemment par la figure 5. 2.

4.1.4. Caractéristiques des sites

Le tableau 5. 18 donne les paramètres des sols de l'exemple étudié. ρ_x , v_x , ξ_x et h_x avec $x = 1, \dots, 4$, sont les densités, les vitesses des ondes de cisaillement, les coefficients d'amortissement et les profondeurs de chaque couche de sol, respectivement. Les paramètres correspondants du substratum rocheux sont $\rho_R = 2300 \text{ Kg/m}^3$, $v_R = 885 \text{ m/s}$ et $\xi_R = 5\%$ (Bi et Hao 2012).

Tableau 5. 18. Caractéristiques des sols adoptés dans l'exemple étudié.

Sol 1				Sol 2			
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)
1600	126	5	7	2000	112	5	6
Sol 3				Sol 4			
ρ_3 (KN/m ³)	v_3 (m/s)	ξ_3 (%)	h_3 (m)	ρ_4 (KN/m ³)	v_4 (m/s)	ξ_4 (%)	h_4 (m)
1600	332	15	30	1900	137	5	5

4.1.5. Modèle de Cohérence

Les mouvements sismiques au substratum rocheux sont simulés en adoptant le modèle de cohérence de Sobczyk (1991). Ce modèle est décrit par les équations (1. 40) et (1. 41).

4.1.6. Simulation des mouvements sismiques

En utilisant la technique de simulation décrite ci-dessus, les signaux sismiques ont été simulés en accélération, en vitesse et en déplacement. Trois cas de simulation sont considérés (décrits par le tableau 5. 1), à savoir le cas uniforme, le cas différentiel qui néglige l'effet de site et le cas différentiel qui prend en considération tous les facteurs de la variabilité spatiale sismique. Les mouvements sismiques simulés et leurs densités spectrales de puissance, sont illustrés sur les figures 5. 85 à 5. 97.

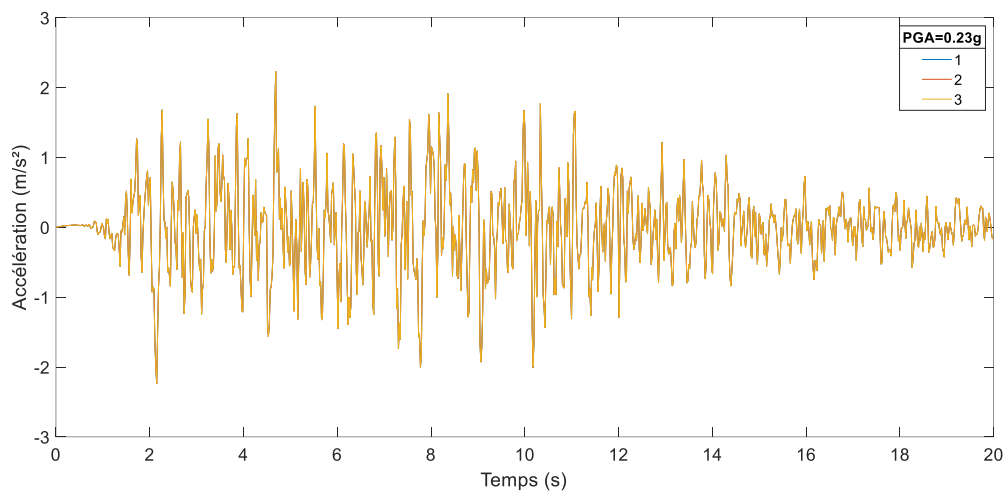


Figure 5. 85. Accélérations simulées dans le cas uniforme.

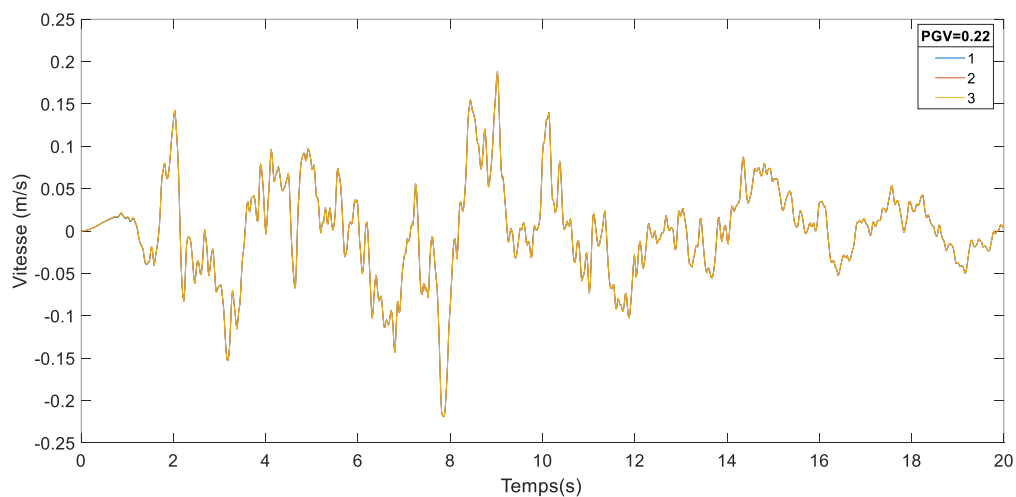


Figure 5. 86. Vitesses simulées dans le cas uniforme.

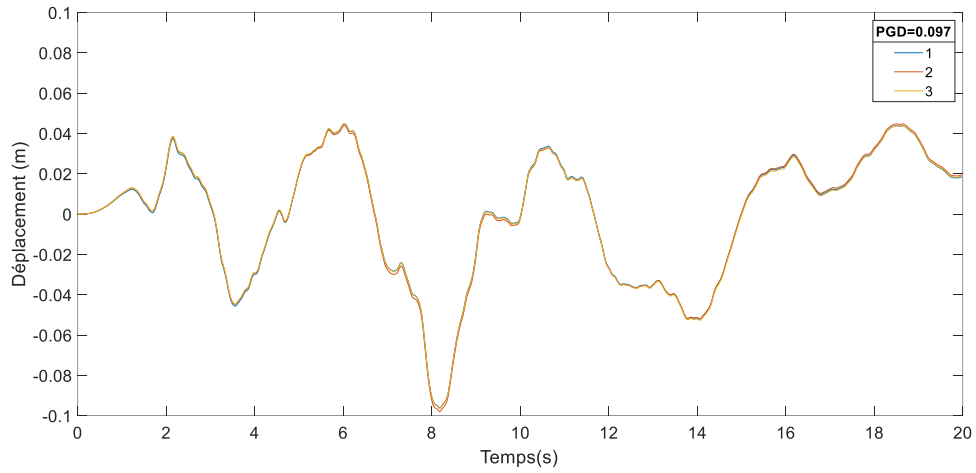


Figure 5. 87. Déplacements simulés dans le cas uniforme.

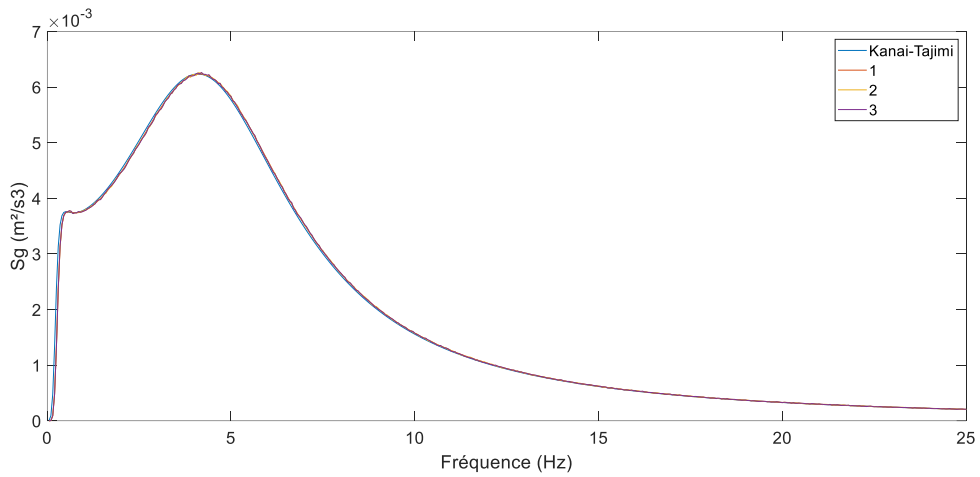


Figure 5. 88. Comparaison de densités spectrale de puissance des accélérations stationnaires uniformes simulées.

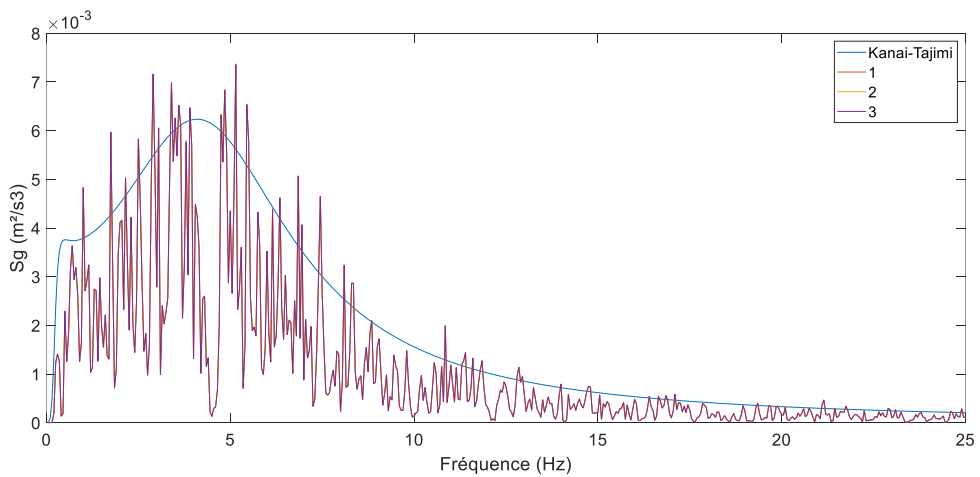


Figure 5. 89. Comparaison de densités spectrale de puissance des accélérations non-stationnaires uniformes simulées.

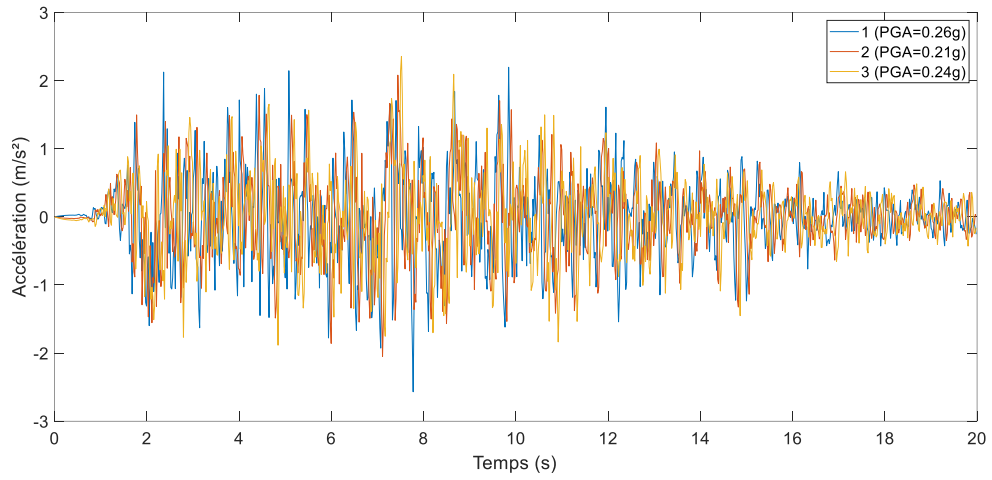


Figure 5. 90. Accélérations différentielles simulées en négligeant l'effet de site.

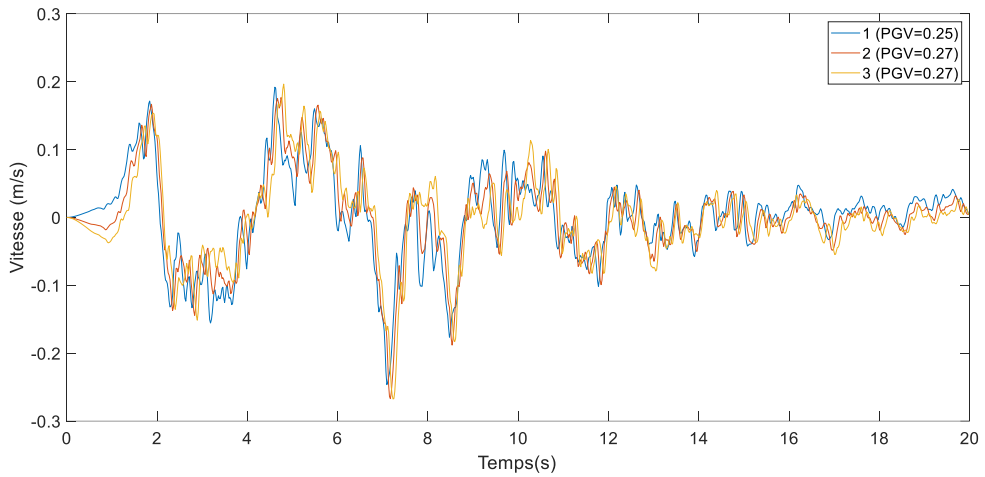


Figure 5. 91. Vitesses différentielles simulées en négligeant l'effet de site.

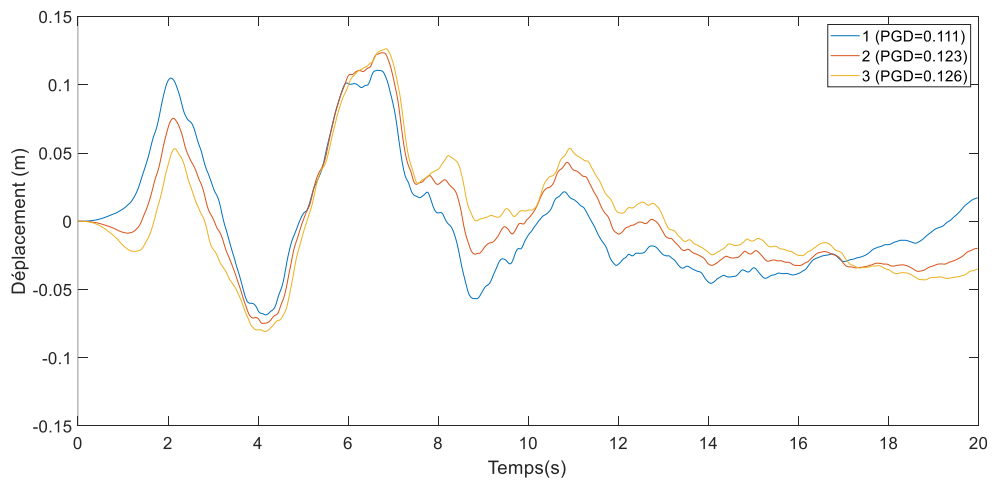


Figure 5. 92. Déplacements différentielles simulées en négligeant l'effet de site.

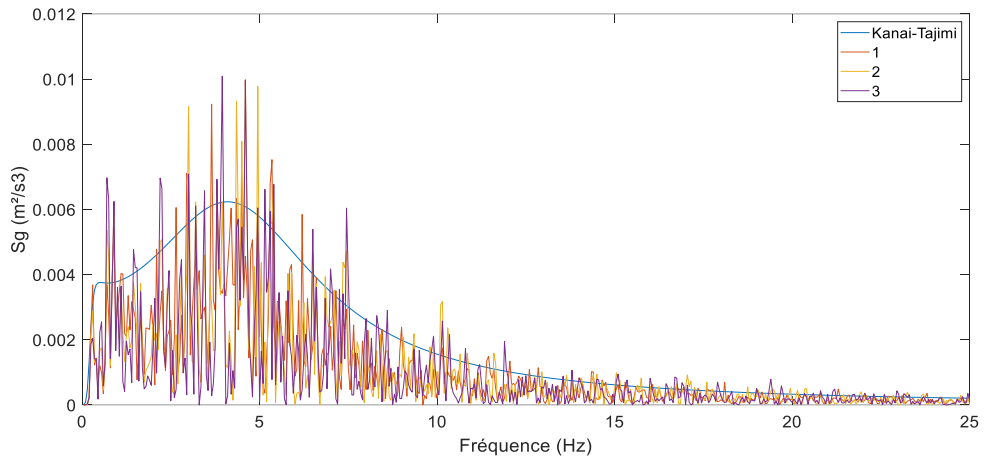


Figure 5. 93. Comparaison de densités spectrale de puissance des accélérations non-stationnaires différentielles simulées en négligeant l'effet de site.

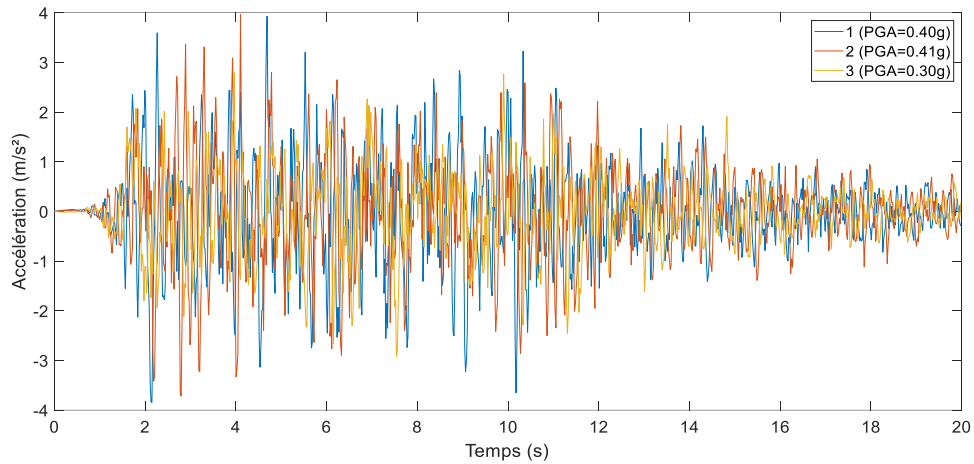


Figure 5. 94. Accélérations simulées en considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale sismique.

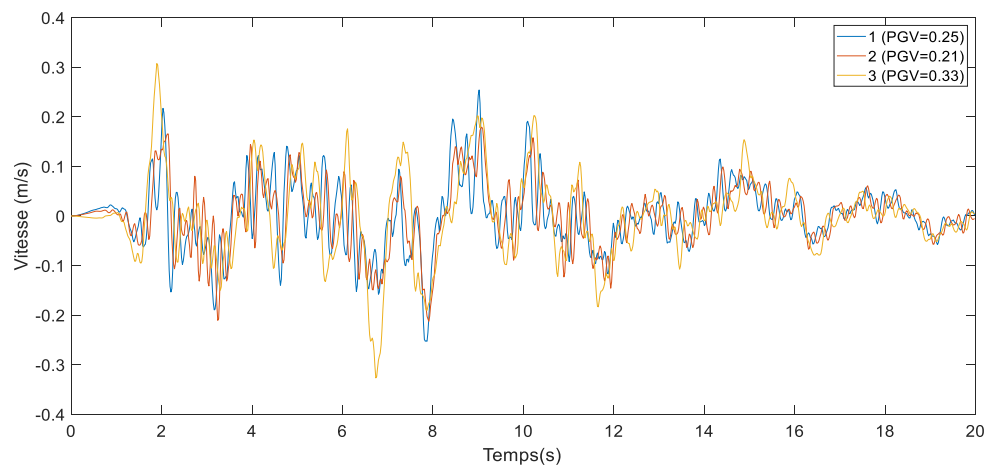


Figure 5. 95. Vitesses simulées en considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale sismique.

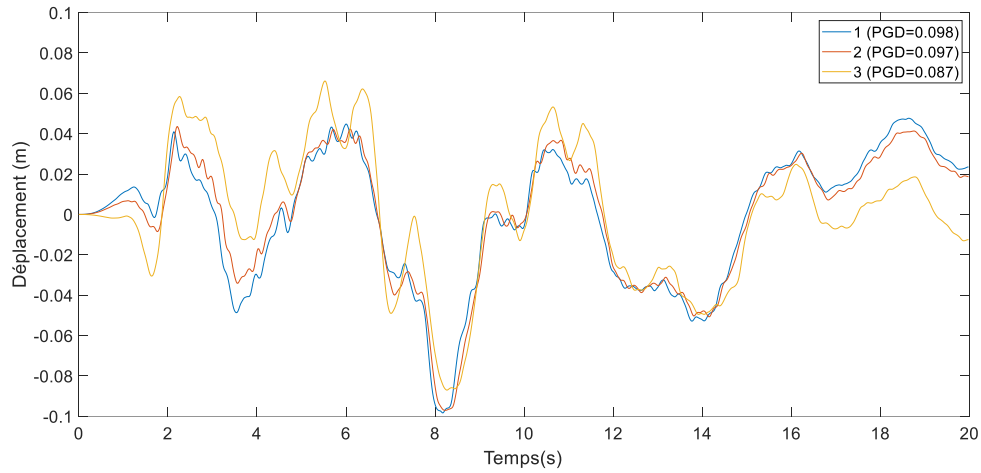


Figure 5. 96. Déplacements simulées en considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale sismique.

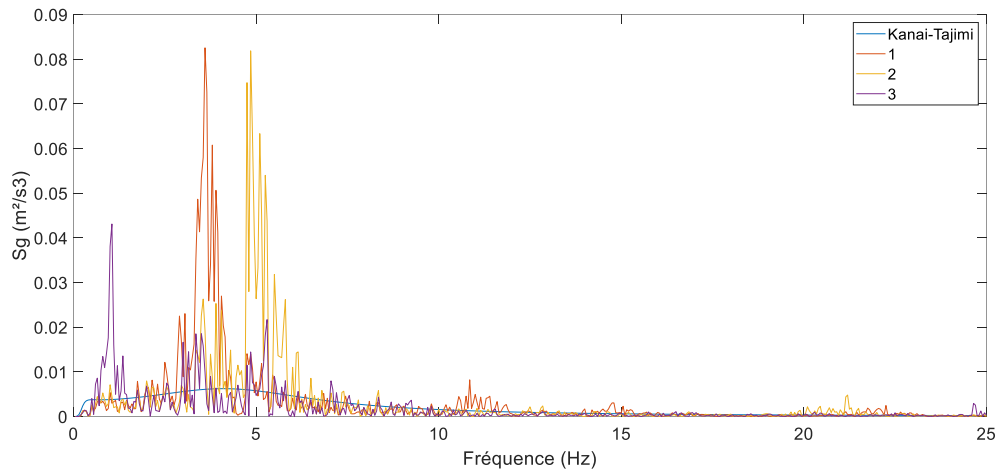


Figure 5. 97. Comparaison de densités spectrale de puissance des accélérations non-stationnaires différentielles simulées.

Tableau 5. 19. PGA, PGV et PGD calculés à partir des deux modèles de l'effet de site pour des mouvements sismiques différentiel (avec tous les facteurs).

	Modèle multicouche			Modèle monocouche		
	Pt 1	Pt 2	Pt 3	Pt 1	Pt 2	Pt 3
PGA (g)	0.40	0.40	0.30	0.44	0.45	0.24
PGV (m/s)	0.25	0.21	0.33	0.28	0.25	0.29
PGD (m)	0.098	0.097	0.087	0.084	0.087	0.110

Des mouvements sismiques différentiels ont été simulés en adoptant les deux modèles de l'effet de site à savoir un sol multicouche et un sol monocouche. Le tableau 5. 19 regroupe les PGA, PGV et PGD de ces mouvements sismiques simulés. On observe que les valeurs données par ce tableau sont similaires.

4.2. Simulation du chargement sismique d'un portique de pont supporté par quatre piles

4.2.1. Caractéristiques géométriques de l'exemple

L'exemple suivant consiste à étudier un portique de pont formé de trois travées avec une longueur de 100 m chacune. La structure du portique est supportée par quatre piles. Les points d'encastrement de ces piles avec la surface du sol sont notés i , j , k et l , leur projection verticale au substratum rocheux sont i' , j' , k' et l' , respectivement (Figure 5. 98).

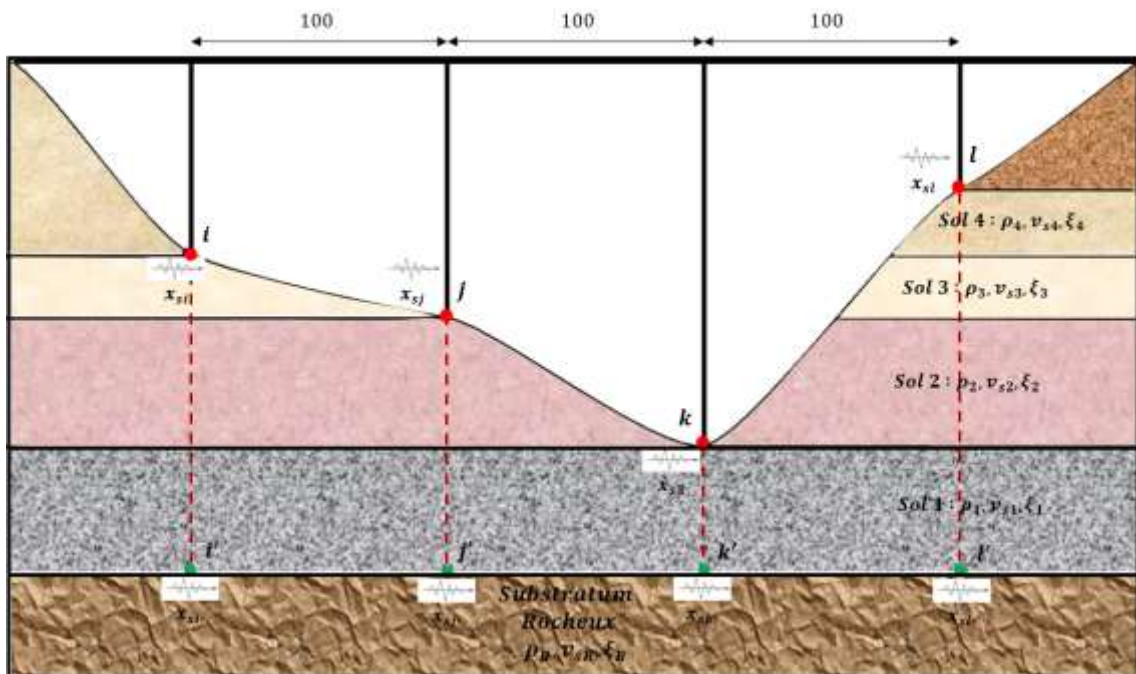


Figure 5. 98. Schéma de d'un pont supporté par quatre piles implanté sur un site multicouche.

4.2.2. Densité spectrale de puissance de cible

Les paramètres de la fonction de densité spectrale de puissance Kanai-Tajimi filtrée correspondent à DSP1 décrite par le tableau 4. 3. Le mouvement sismique de référence a un PGA égal à $0.2g$, un PGD de 0.082 m et une durée de 20 s . Cette fonction de densité spectrale est illustrée sur la figure 5. 2.

4.2.3. Caractéristiques des sites

Les paramètres des sols adoptés dans cet exemple sont donnés par le tableau 5. 20. Les paramètres correspondants du substratum rocheux sont $\rho_R = 3000\text{ Kg/m}^3$, $v_R = 1500\text{ m/s}$ et $\xi_R = 4\%$ (Zhang 2013; Zhang et al. 2013).

Tableau 5. 20. Paramètres des sols adoptés.

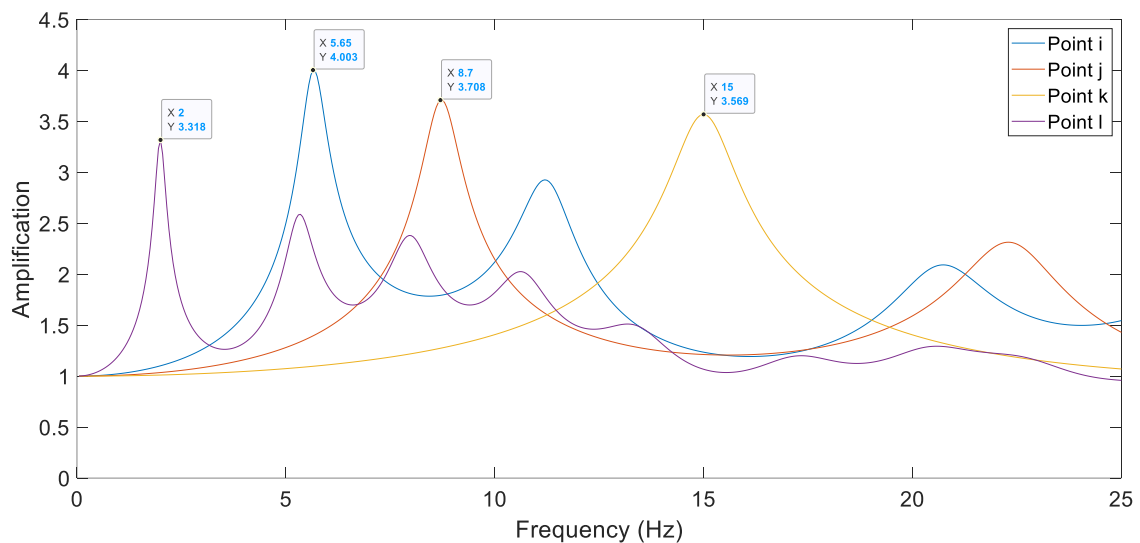
Sol 1				Sol 2			
ρ_1 (KN/m^3)	v_1 (m/s)	ξ_1 (%)	h_1 (m)	ρ_2 (KN/m^3)	v_2 (m/s)	ξ_2 (%)	h_2 (m)
2000	600	5	10	1800	450	5	7
Sol 3				Sol 4			
ρ_3 (KN/m^3)	v_3 (m/s)	ξ_3 (%)	h_3 (m)	ρ_4 (KN/m^3)	v_4 (m/s)	ξ_4 (%)	h_4 (m)
1500	200	6	6	1500	120	7	12

4.2.4. Amplification des sites

Les fonctions de transfert des trois points i, j, k et l , situés à la surface sont illustrées sur la figure 5. 99. Les fréquences prédominantes et les amplifications correspondantes ont été regroupées dans le tableau 5. 21. A ce stade et avant d'entamer la simulation des mouvements sismiques différentiels, on estime que probablement le point i développera le plus grand PGA. Cela est dû à ce que la fréquence prédominante du site i se rapproche de celle du mouvement sismique de référence.

Tableau 5. 21. Fréquences prédominantes et amplifications des sites étudiés.

Localisation	Point <i>i</i>	Point <i>j</i>	Point <i>k</i>	Point <i>l</i>
Fr (Hz)	5.65	8.70	15.00	2.00
Amplification	4.003	3.708	3.569	3.318

**Figure 5. 99.** Fonctions de transfert au niveau des points situés à la surface en utilisant le modèle multicouche.

4.2.5. Choix du modèle de Cohérence

Les mouvements sismiques au substratum rocheux suivent le modèle de cohérence de Hao et al. (1989), défini par les équations (1. 35) et (1. 36 a, b). Les paramètres adoptés de ce modèle sont : $\beta_1 = 1.109$; $\beta_2 = 0.673$; $a = 35.83$; $b = -0.181$; $c = 1.177$; $d = 51.63$; $e = -0.076$; $g = -1.905$ (Hao et al. 1989 ; Chen et Harichandran 2001 ; Bi et al. 2010).

4.2.6. Simulation des mouvements sismiques

En utilisant la technique de simulation décrite dans le quatrième chapitre, les mouvements sismiques ont été simulés en termes d'accélération, de vitesse et de déplacement. Trois cas de simulation ont été considérés (décrits par le tableau 5. 1) ; à savoir, le cas uniforme,

le cas différentiel qui néglige l'effet de site et le cas différentiel qui prend en considération tous les facteurs de la variabilité spatiale sismique. Les mouvements sismiques artificiels et leurs densités spectrales de puissance, sont illustrés sur les figures 5. 100 à 5. 112.

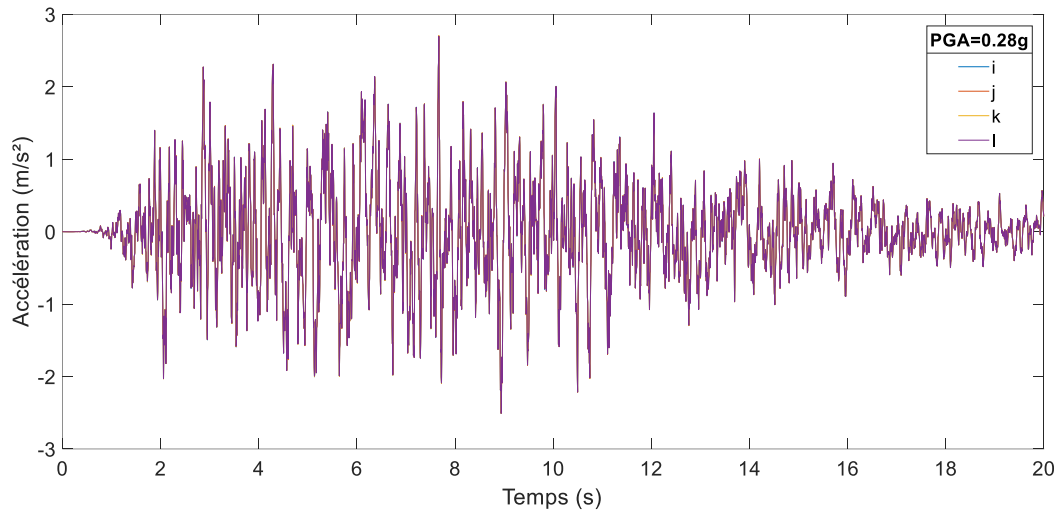


Figure 5. 100. Accélérations simulées dans le cas uniforme.

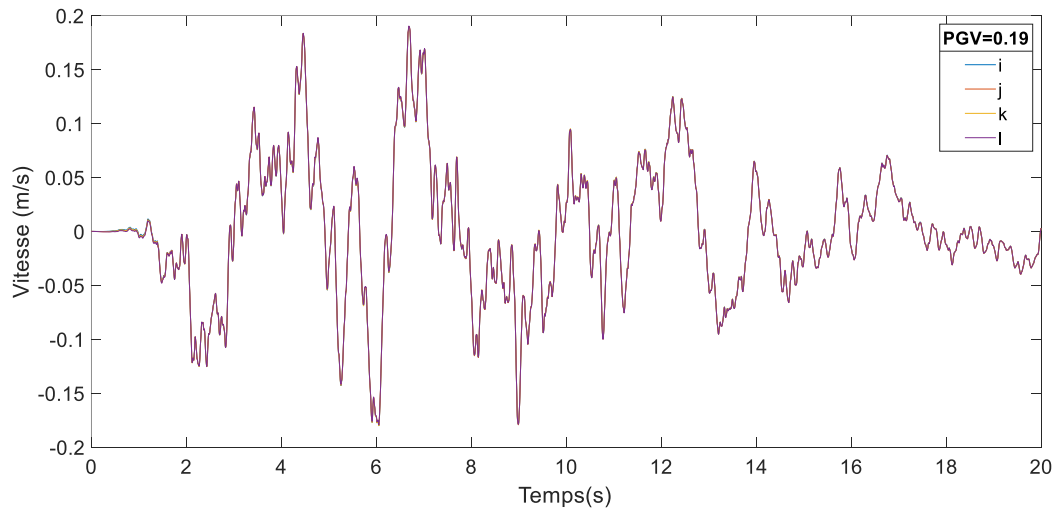


Figure 5. 101. Vitesses simulées dans le cas uniforme.

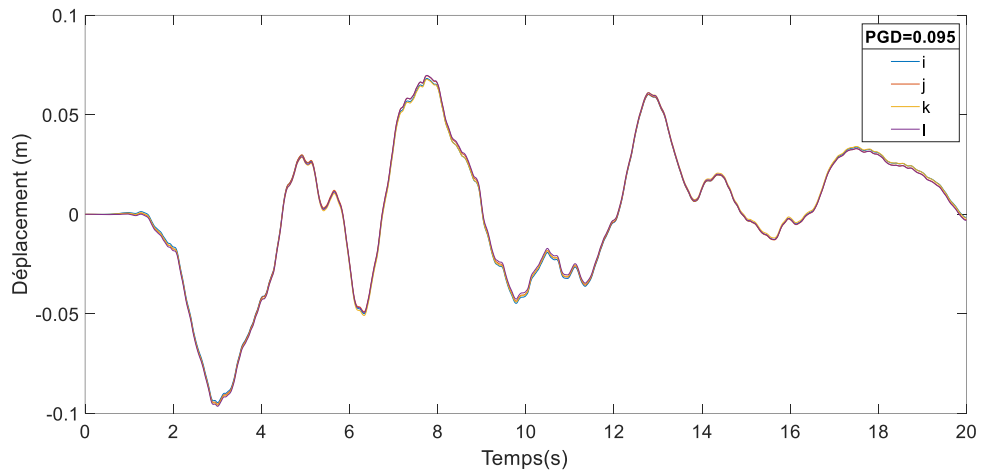


Figure 5. 102. Déplacements simulés dans le cas uniforme.

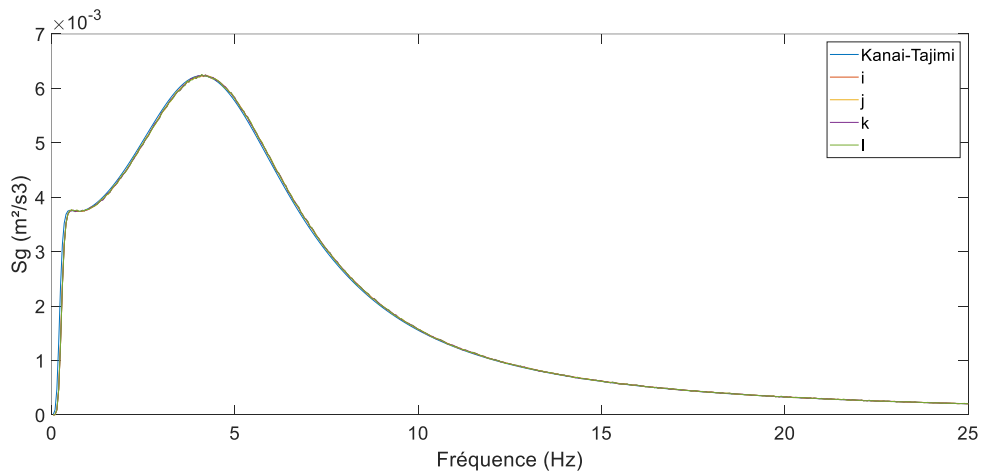


Figure 5. 103. Comparaison de densités spectrale de puissance des accélérations stationnaires uniformes simulées.

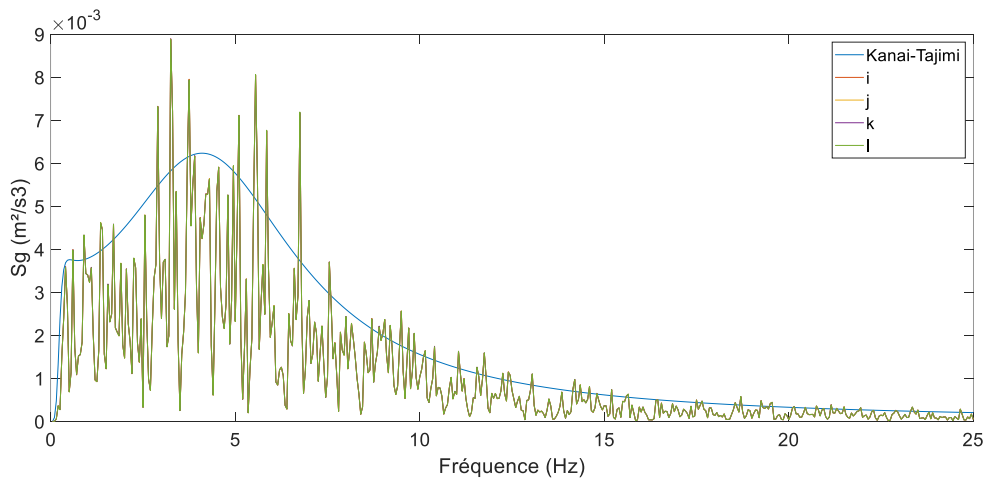


Figure 5. 104. Comparaison de densités spectrale de puissance des accélérations non-stationnaires uniformes simulées.

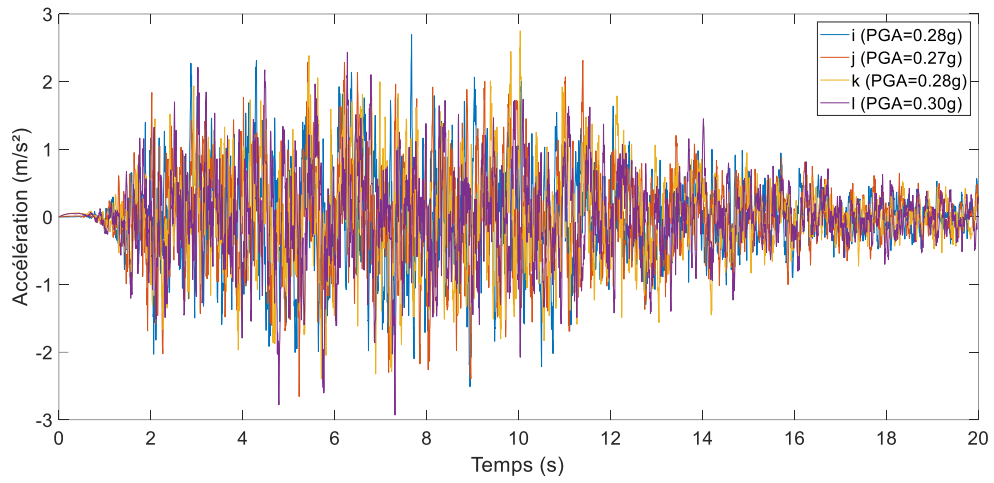


Figure 5. 105. Accélérations différentielles simulées en négligeant l'effet de site.

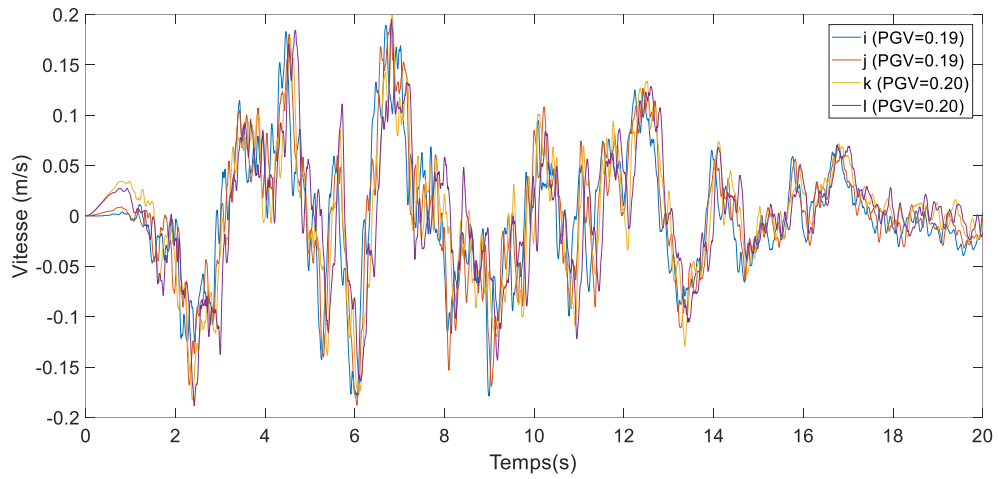


Figure 5. 106. Vitesses différentielles simulées en négligeant l'effet de site.

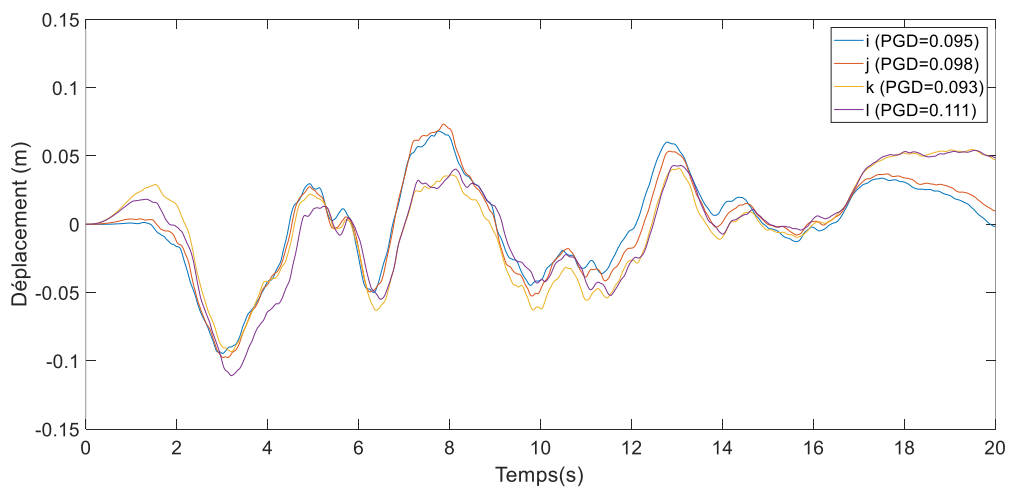


Figure 5. 107. Déplacements différentielles simulées en négligeant l'effet de site.

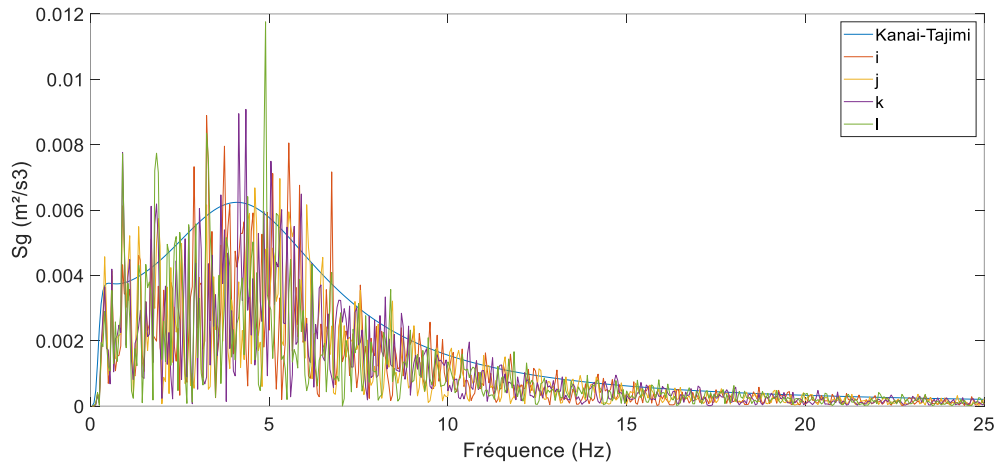


Figure 5. 108. Comparaison de densités spectrale de puissance des accélérations non-stationnaires différentielles simulées en négligeant l'effet de site.

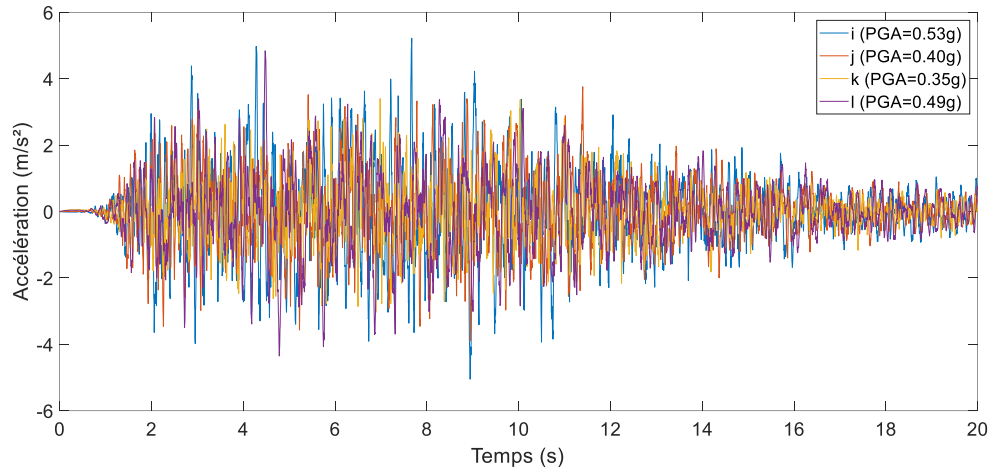


Figure 5. 109. Accélérations simulées en considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale sismique.

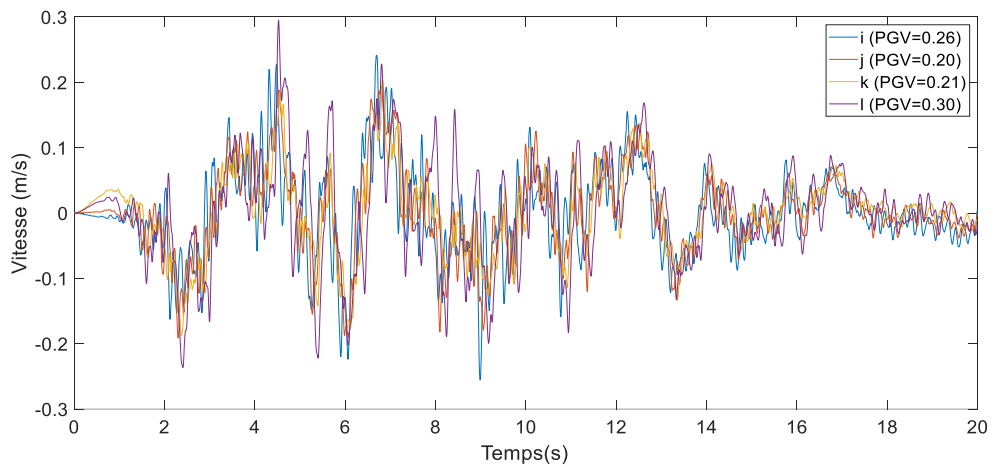


Figure 5. 110. Vitesses simulées en considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale sismique.

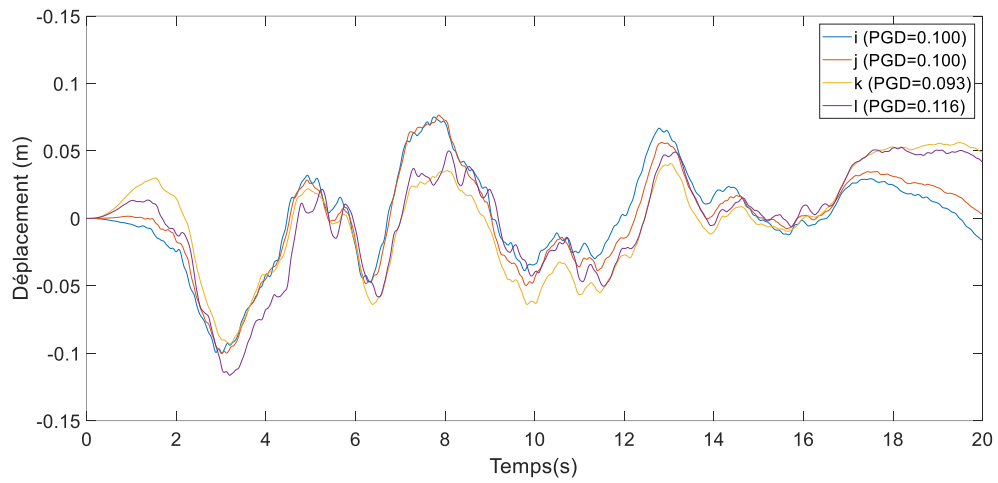


Figure 5. 111. Déplacements simulés en considérant tous les facteurs de la variabilité spatiale sismique.

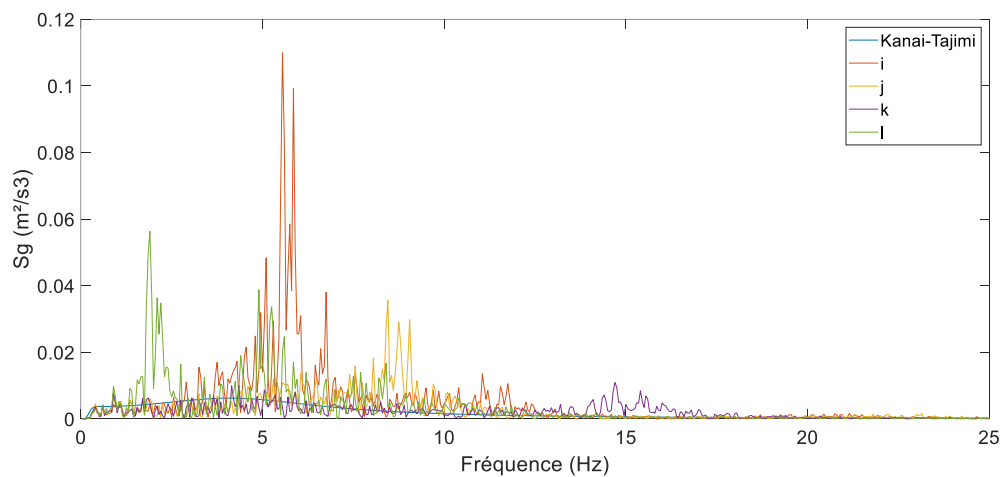


Figure 5. 112. Comparaison de densités spectrales de puissance des accélérations non-stationnaires différentielles simulées.

Les mouvements sismiques différentiels simulés dans cette application numérique sont supérieurs à ceux simulés en négligeant l'effet de site. Le rapport en PGA dépasse les 50%. D'où l'influence de l'effet de site sur les mouvements sismiques différentiels simulés.

Il était probable que le site *i* donnerait des accélérations différentielles maximales avec un PGA de 0.53 *g* suivi par le site *l* où le PGA mesuré est de 0.49 *g*. Cela est dû principalement à la convergence des fréquences prédominantes vers celle du signal sismique cible.

4.3. Synthèse et conclusions

Les mouvements sismiques artificiels ont été simulés en utilisant la technique de simulation développée avec une modélisation de l'effet de site en sol multicouche.

Le calcul des fonctions de transfert a été réalisé en trois manières. La première en utilisant la technique de simulation basée sur la considération d'un sol multicouche où chaque couche a ses propres caractéristiques. La seconde consiste à utiliser la même technique de simulation mais en convertissant le sol multicouche à un sol monocouche et cela en calculant les propriétés équivalentes correspondantes. Ces dernières sont utilisées dans pour cette troisième façon où la technique de simulation considérant un sol monocouche élaborée précédemment est menée. La comparaison de ces trois façons de calcul des fonctions de transfert donne lieu à des fréquences prédominantes similaires. Cependant, le calcul des fonctions de transfert nous informe sur les fréquences prédominantes des sites multicouches étudiés. Par conséquent, une éventuelle résonance entre les fréquences prédominantes des sites étudiés et celle du mouvement sismique de référence peut être facilement détectée.

Une comparaison est établie entre les mouvements sismiques différentiels simulés en adoptant les deux modèles de l'effet de site à savoir un sol multicouche et un sol monocouche. En effet, les PGA, PGV et PGD des mouvements sismiques différentiels simulés ont été comparés. Il a été constaté que ces paramètres définissant les signaux sismiques sont similaires. A cet effet, nous concluons que pour ce cas étudié, les deux méthodes donnent des résultats quasi-identiques.

L'impact de l'effet de site peut doubler l'intensité des accélérations différentielles simulée. En effet, cette application est une autre preuve de l'importance de la prise en compte des conditions locales des sites dans l'estimation des chargements sismiques différentiels. Il convient de noter que les conséquences de négliger l'effet de site dans ce cas seront désastreuses en terme de réponse dynamique.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, la technique de simulation des mouvements sismiques a été mise à l'épreuve. Un nombre important de simulation de signaux sismique artificiels a été réalisé. Cette technique de simulation est basée sur la méthode de représentation spectrale et elle permet de simuler des mouvements sismiques différentiels en utilisant les approches inconditionnelles ou conditionnelles. Rappelons que la simulation conditionnelle est basée sur un accélérogramme enregistré défini comme mouvement sismique cible. Alors qu'au niveau de la simulation inconditionnelle, le mouvement sismique de référence est caractérisé par une densité spectrale de puissance. Dans cette dernière simulation, la fonction de densité spectrale de puissance de Kanai-Tajimi est largement utilisée.

Il convient de noter que l'approche inconditionnelle présente un grand avantage, car la variabilité est uniforme avec la distance. Ce qui rend cette approche très convoitée par de nombreux chercheurs. A cet effet, les applications numériques et les cas d'études d'analyse dynamique des ponts présentés dans ce chapitre se basent sur cette approche de simulation.

Les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique ont été pris en considération lors de la simulation des signaux sismiques artificiels. L'effet de site en particulier a été traité en détail. Plus précisément, l'effet de site a été modélisé et introduit dans la technique de simulation via deux approches :

La première est basée sur le principe de classification des sites donnée par les codes parasismiques. En effet, le site est modélisé par un sol monocouche sous chaque support. De plus, la technique de simulation peut considérer différents types de site à différentes positions. La seconde considération consiste en une modélisation plus réaliste des sites étudiés. Elle est basée sur un sol multicouche.

Les principales conclusions de ce chapitre doivent être marquées :

- Quel que soit la nature du site, il a été démontré que plus la couche de sol est profonde, plus souple est le site et plus faible est la fréquence prédominante.

- L'ensemble des résultats obtenus dans ce chapitre nous affirment que l'effet de l'amplification du site sur les mouvements sismiques différentiels simulés en surface est prédominant.
- A cet effet, une bonne représentation de la variabilité spatiale du mouvement sismique doit prendre en considération les conditions locales du site.
- Le fait de considérer les effets d'incohérence et de passage d'onde pour représenter les chargements sismiques différentiels ne reflète en aucun cas la demande sismique réelle.
- L'effet de site seul peut parfois développer des mouvements sismiques similaires à ce que génèrent les effets d'incohérence et de passage d'onde.
- Les conséquences de négliger l'effet de site dans l'estimation du chargement sismique à des conséquences désastreuses en terme de réponse dynamique.

Conclusions Générales

1. Eléments de synthèse

Il est reconnu actuellement qu'une analyse sismique rigoureuse des structures étendues tel que les ponts doit prendre en considération l'effet de la variabilité spatiale des mouvements sismiques. Cette variabilité résulte de la combinaison de l'action de la source qui génère des ondes sismiques, de la propagation de ces ondes entre la source et le site et des conditions géologiques locales du site. En effet, l'ensemble de ces facteurs doivent être pris en compte lors de l'estimation des excitations sismiques appliquées aux structures étendues.

Le séisme de Michoacán qui a secoué la ville de Mexico en 1985 est considéré comme l'exemple le plus représentatif de l'influence de l'effet de site sur le mouvement sismique. Il a été constaté que les conditions locales du site où la ville de Mexico est implantée, ont considérablement amplifié les ondes sismiques. Depuis, de nombreuses études ont été effectuées afin d'évaluer l'influence des conditions géologiques locales du site sur la réponse dynamique des structures. Ces études ont montré la nécessité d'incorporer l'effet de site lors de l'évaluation des mouvements sismiques spatialement variables à travers la modélisation de la réponse du site.

Dans le présent travail, une technique de simulation des mouvements sismiques spatialement variables a été développée où l'ensemble des facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique ont été pris en considération. Plus particulièrement, l'effet de site qui se traduit par l'estimation de la réponse sismique du sol. Cette réponse a été modélisée dans ce cas en se basant sur le principe décrit par la réglementation parasismique c.à.d. approcher le site par un sol monocouche. La réponse sismique d'un site modélisé par un sol multicouche a été également entreprise.

Il convient de noter que cette technique de simulation peut être menée en adoptant les deux approches de simulation conditionnelle et inconditionnelle. Néanmoins, lors de la présentation des résultats, l'approche inconditionnelle, conditionnée par une fonction de densité spectrale de puissance cible, a été favorisée du fait qu'elle se distingue par une variabilité uniforme en fonction de la distance.

Cette technique de simulation des mouvements sismiques spatialement variable a été bien mise à l'épreuve où un nombre considérable de cas de simulation a été accompli.

En adoptant la modélisation d'un sol monocouche de la réponse sismique du site, une étude paramétrique de l'amplification des sites en fonction de la profondeur de la couche et du type de sol, a été menée. Les résultats montrent que plus la couche de sol est profonde, plus souple est le site et plus faible est la fréquence prédominante.

Les résultats de l'ensemble des applications numériques traitées dans cette thèse montrent que le cas le plus défavorable est celui qui considère tous les facteurs de la variabilité spatiale du mouvement sismique. Il est à noter que l'effet de site seul peut engendrer des mouvements sismiques considérables et parfois comparables à ceux calculés à partir des effets d'incohérence et de passage d'ondes.

Une étude paramétrique de l'influence de la variabilité des conditions locales de site entre les supports d'un pont ferroviaire a été réalisée. Les paramètres des sites ont été définis en s'inspirant de la classification des sites donnée par le code parasismique algérien des ouvrages d'art (RPOA). Il s'est avéré que le cas le plus nuisible en termes d'efforts internes développés par le pont est celui qui correspond à des variations brusques des conditions de sol.

En se basant sur le calcul des propriétés équivalentes d'un site modélisé par un sol multicouche et dans le but de le convertir en un site monocouche, une étude comparative de calcul des fonctions de transfert caractérisant l'amplification des sites a été menée. Les résultats de cette étude comparative a conduit à des résultats en fréquences prédominantes similaires. De plus les paramètres PGA, PGV et PGD, caractérisant les mouvements sismiques différentiels simulés en considérant les deux modèles du site monocouche et multicouche, sont semblables.

Il convient de noter que le calcul des fonctions de transfert nous informe sur les fréquences prédominantes des sites étudiés, considérés comme monocouche ou multicouche. Une comparaison de ces fréquences prédominantes des sites avec celle du mouvement sismique de référence peut nous enseigner sur une éventuelle amplification des signaux sismiques simulés.

Il a été démontré que l'impact de l'effet de site sur les mouvements sismiques différentiels simulés en surface est prédominant. A cet effet, il est impératif qu'une bonne estimation d'un chargement sismique différentiel doit prendre en considération les conditions locales du site. Le fait de ne considérer que les effets d'incohérence et de passage d'onde pour

modéliser la variabilité spatiale du mouvement sismique est loin de représenter les chargements sismiques différentiels réels. Ainsi, les conséquences de négliger l'effet de site dans l'estimation du chargement sismique se répercutent négativement sur la réponse dynamique. Ce qui a été montré dans cette thèse à travers l'analyse sismique de certains ponts sous mouvements différentiels.

A cet effet, une bonne représentation de la variabilité spatiale du mouvement sismique doit prendre en considération les conditions locales du site qui conduit à une évaluation correcte de la demande sismique.

2. Perspectives

Sur la base des résultats obtenus dans ce travail de recherche, plusieurs pistes et recommandations pour des travaux futurs peuvent être proposées dans le but d'apporter quelques améliorations. Nous suggérons les perspectives suivantes :

- Etudier l'influence du nombre de couches dans un site donné en adoptant le modèle multicouche sur la réponse sismique du sol et réaliser une comparaison avec le modèle monocouche.
- Mener une étude de sensibilité de l'effet de site aux paramètres des sites les plus imposant en particulier la vitesse de propagation des ondes sismiques, la densité et l'amortissement et tenter de proposer une classification plus étendue des sites.
- En pratique, il est préférable d'opter pour un site quelconque une modélisation par un sol monocouche. Il serait très intéressant de trouver le modèle monocouche le plus représentatif du modèle multicouche en faisant une large étude paramétrique.
- Etudier l'influence du nombre de couches dans un site donné en adoptant le modèle multicouche sur la réponse sismique du sol et réaliser une comparaison avec le modèle monocouche.
- Dans le but de représenter le plus fidèlement possible le cas réel du sol, la réponse sismique du site doit prendre en compte plusieurs paramètres ; à savoir, le comportement non-linéarité, la présence des cavités vides ou remplies, la présence des nappes phréatique...etc.
- Etudier le cas d'un pont où les piles sont fondées à un site complètement saturé tel que les fleuves et les barrages.

- Proposer une classification plus étendue sur la base d'une étude de la sensibilité de l'effet de site aux paramètres des sites les plus imposant en particulier la vitesse de propagation des ondes sismiques, la densité et l'amortissement.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- Abrahamson N (2008) Ground Motion Models. In: Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, pp 1–31.
- Abrahamson N, Schneider JF, Stepp JC (1991) Spatial coherency of shear waves from the Lotung, taiwan large-scale seismic test. *Struct Saf* 10:145–162. [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(91\)90011-W](https://doi.org/10.1016/0167-4730(91)90011-W).
- Abrahamson NA (2007) Hard-Rock Coherency Functions Based on the Pinyon Flat Array Data. Palo Alto, CA.
- Abrahamson NA (1993) Spatial variation of multiple support inputs. In: Proceedings of the 1st U.S. Seminar on Seismic Evaluation and Retrofit of Steel Bridges, A Caltrans and University of California at Berkeley Seminar, San Francisco, CA. San Francisco, CA.
- Adanur S, Altunişik AC, Soyluk K, et al (2016a) Contribution of local site-effect on the seismic response of suspension bridges to spatially varying ground motions. *Earthq Struct*. <https://doi.org/10.12989/eas.2016.10.5.1233>.
- Adanur S, Altunişik AC, Soyluk K, et al (2016b) Multiple-support seismic response of Bosphorus Suspension Bridge for various random vibration methods. *Case Stud Struct Eng* 5:54–67. <https://doi.org/10.1016/j.csse.2016.04.001>.
- Adanur S, Altunisik AC, Soyluk K, Aydin Dumanoglu A (2016c) Stochastic response of suspension bridges for various spatial variability models. *Steel Compos Struct*. <https://doi.org/10.12989/scs.2016.22.5.1001>.
- Aki K. & Richards P. G. (1980) *Quantitative Seismology, Theory and Methods*. Volume I.
- Ali Bouafia (2010) *Introduction à la dynamique des sols Tome 2 : Calcul dynamique des ouvrages géotechnique*.
- Ardila J, Chio G, Benjumea J (2018) Asynchronous seismic excitation in bridges: Asynchronous patterns, analysis methods and structural types studied. *Rev. Ing. Constr.* 33.
- Bai FL, Hao H, Bi KM, Li HN (2011) Seismic response analysis of transmission tower-line system on a heterogeneous site to multi-component spatial ground motions. *Adv Struct Eng* 14:457–474. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.14.3.457>.
- Bard P (2002) *Les Effets de Site : Compréhension, Modélisation et Prévention*.
- Bard PY, Campillo M, Chavez-Garcia FJ, Sanchez-Sesma F (1988) Mexico earthquake of September 19, 1985 - a theoretical investigation of large- and small-scale amplification effects in the Mexico City valley. *Earthq Spectra* 4:609–633. <https://doi.org/10.1193/1.1585493>.
- Benmansour N (2013) Effet de la variabilité spatiale du mouvement sismique sur le comportement dynamique des ponts. Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- Benmansour N, Derbal R, Djafour M, et al (2021) Impact of Local Site Conditions on Simulation of Non-stationary Spatial Variable Seismic Motions. *Period Polytech Civ Eng* 2021. <https://doi.org/10.3311/ppci.16208>.

- Benmansour N, Djafour M, Bekkouche A, et al (2012) Seismic response evaluation of bridges under differential ground motion: A comparison with the new Algerian provisions. *Eur J Environ Civ Eng* 16:863–881.
<https://doi.org/10.1080/19648189.2012.681951>
- Bi K, Hao H (2012a) Modelling and simulation of spatially varying earthquake ground motions at sites with varying conditions. *Probabilistic Eng Mech* 29:92–104.
<https://doi.org/10.1016/j.pro bengmech.2011.09.002>
- Bi K, Hao H (2012b) Influence of ground motion spatial variations and local soil conditions on the seismic responses of buried segmented pipelines. *Struct Eng Mech*.
<https://doi.org/10.12989/sem.2012.44.5.663>.
- Bi K, Hao H, Chou N (2011) Influence of ground motion spatial variation, site condition and SSI on the required separation distances of bridge structures to avoid seismic pounding. *Earthq Eng Struct Dyn*. <https://doi.org/10.1002/eqe.1076>.
- Bi K, Hao H, Ren W (2010) Response of a frame structure on a canyon site to spatially varying ground motions. *Struct Eng Mech* 36:111–127.
<https://doi.org/10.12989/sem.2010.36.1.111>
- C. S. Oliveira HHJP, Oliveira CS, Hao H, Penzien J (1991) Ground motion modeling for multiple-input structural analysis. *Struct Saf* 10:79–93.
[https://doi.org/10.1016/0167-4730\(91\)90007-V](https://doi.org/10.1016/0167-4730(91)90007-V)
- Cacciola P, Deodatis G (2011) A method for generating fully non-stationary and spectrum-compatible ground motion vector processes. *Soil Dyn Earthq Eng* 31:351–360. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.09.003>
- Cacciola P, Zentner I (2012) Generation of response-spectrum-compatible artificial earthquake accelerograms with random joint timefrequency distributions. In: *Probabilistic Engineering Mechanics*. pp 52–58.
- CEN (2005) Eurocode 8: Design provisions of structures for earthquake resistance—Part 2: Bridges (prEN1998-2, Final Draft). Brussels, Belgium.
- CEN (2004) Eurocode 8: Design provisions of structures for earthquake resistance-part 1: General rules, Seismic Actions and Rules for buildings, EN1998-1:2004. Brussels, Belgium.
- Chen M-T, Harichandran RS (2001) Response of an Earth Dam to Spatially Varying Earthquake Ground Motion. *J Eng Mech* 127. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2001\)127:9\(932\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2001)127:9(932))
- Deodatis G (1997) Simulation of Stochastic Processes and Fields to Model Loading and Material Uncertainties. In: *Probabilistic methods for structural design*. Springer, Dordrecht, pp 261–288.
- Deodatis G (1996) Non-stationary stochastic vector processes: Seismic ground motion applications. *Probabilistic Eng Mech* 11:149–167. [https://doi.org/10.1016/0266-8920\(96\)00007-0](https://doi.org/10.1016/0266-8920(96)00007-0)
- Der Kirurghian A (1980) STRUCTURAL RESPONSE TO STATIONARY EXCITATION. *ASCE J Eng Mech Div* 106:1195–1213.
<https://doi.org/10.1061/jmcea3.0002659>

- Der Kiureghian A (1996) A COHERENCY MODEL FOR SPATIALLY VARYING GROUND MOTIONS. *Earthq Eng Struct Dyn* 25:99–111. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9845\(199601\)25:1<99::aid-eqe540>3.3.co;2-3](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9845(199601)25:1<99::aid-eqe540>3.3.co;2-3)
- Derbal R (2017) Influence de l'Effet de Site sur le Comportement Dynamique des Ponts Abstract : In: 23ème Congrès Français de Mécanique. 28 Août au 1 Septembre, Lille, France.
- Derbal R, Benmansour N, Djafour M, et al (2019) Viaduct seismic response under spatial variable ground motion considering site conditions. *Earthq Struct* 17:557–566. <https://doi.org/10.12989/eas.2019.17.6.557>
- Derbal R, Benmansour N, Djafour M (2018) Impact of spatial variability of earthquake ground motion on seismic response of a railway bridge. *Int J Comput Methods Exp Meas* 6:910–920. <https://doi.org/10.2495/cmcm-v6-n5-910-920>
- Derbal Rachid (2005) Analyse dynamique de barrages poids - voûtes sous chargement sismique différentiel. Université Abou Bakr Belkaid - Tlemcen.
- Deyi Zhang (2013) Stochastic Modelling and Analysis for Bridges under Spatially Varying Ground Motions. University of Waterloo.
- Di Paola M, Zingales M (2000) Digital simulation of multivariate earthquake ground motions. *Earthq Eng Struct Dyn* 29:1011–1027. [https://doi.org/10.1002/1096-9845\(200007\)29:7<1011::AID-EQE951>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/1096-9845(200007)29:7<1011::AID-EQE951>3.0.CO;2-F)
- Dumanoglu AA, Soyluk K (2003) A stochastic analysis of long span structures subjected to spatially varying ground motions including the site-response effect. *Eng Struct* 25:1301–1310. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00080-4](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00080-4)
- FEMA P-749 (2010) Earthquake-Resistant Design Concepts An Introduction to the NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures
- Feng Qiming, Hu Yuxian (1981) The mathematical model of the spatial correlation of ground motion. *Earthq Eng Eng Vib* 1:1–8.
- FHWA. (1996) Seismic bridge design applications.
- FHWA (1996) Seismic design of bridges design example no. 1 – Two-span continuous CIP concrete Box bridge.
- Hao H, Oliveira CS, Penzien J (1989) Multiple-station ground motion processing and simulation based on smart-1 array data. *Nucl Eng Des* 111:293–310. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(89\)90241-0](https://doi.org/10.1016/0029-5493(89)90241-0)
- Harichandran RS (1999a) Spatial Variation of Earthquake Ground Motion. Dep. Civ. Environ. Eng. Michigan State Univ. USA.
- Harichandran RS (1999b) Spatial Variation of Earthquake Ground Motion - What is it , how do we model it , and what are its engineering implications ? In: Manuscript corresponding to seminars presented at University of Puerto Rico.
- Harichandran RS (1991) Estimating the spatial variation of earthquake ground motion from dense array recordings. *Struct Saf* 10:219–233. [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(91\)90016-3](https://doi.org/10.1016/0167-4730(91)90016-3)
- Harichandran RS, Vanmarcke EH (1986) Stochastic Variation of Earthquake Ground Motion in Space and Time. *J Eng Mech* 112:154–174. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(1986\)112:2\(154\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(1986)112:2(154))

- Hashash YMA, Musgrove MI, Harmon JA, et al (2020) DEEPSOIL V7.0, User Manual. Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.
- Hindy A, Novak M (1979) Earthquake response of underground pipelines. *Earthq Eng Struct Dyn* 7:451–476. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290070506>
- Housner GW, Jennings PC (1964) Generation of Artificial Earthquakes. *J Eng Mech Div* 90:113–150. <https://doi.org/10.1061/jmcea3.0000448>
- Imtiaz A, Cornou C, Bard PY, Zerva A (2018) Effects of site geometry on short-distance spatial coherency in Argostoli, Greece. *Bull Earthq Eng* 16:1801–1827. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0270-z>
- Ioanna-Kleoniki M, Fontara, Magdalini D, Titirla, Frank Wuttke, et al (2015) Multiple support excitation of a bridge based on a BEM analysis of the subsoil-structure interaction phenomenon. In: *COMPdyn 2015 and 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering At: Crete Island, Greece.*
- Jankowski R, Wilde K (2000) A simple method of conditional random field simulation of ground motions for long structures. *Eng Struct* 22:552–561. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(98\)00125-4](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(98)00125-4)
- Jennings PC, Housner GW, Tsai NC (1968) Simulated earthquake motions.
- John L. Bogdanoff, John E. Goldberg, M. C. Bernard (1961) Response of a simple structure to a random earthquake-type disturbance. *Bull Seismol Soc Am* 15:293–310.
- Kanai K (1957) Semi Empirical Formula for The Seismic Characteristics of the Ground. *Bull Earthq Res institut, Tokyo, Univ Tokyo* 35:309–325.
- Kanda K (2000) Seismic Responses of Structures Subjected to Incident Incoherent Waves Considering a Layered Media with Irregular Interfaces. In: *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering.* paper No. 649, Auckland, New Zealand.
- Keiichi Tamura, Steven R Winterstein, HC Shah (1992) Random Field Models of Spatially Varying Ground Motions and the Estimation of Differential Ground Motions. In: *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering.* pp 863–866.
- Kibboua Abderrahmane (2006) Analyse dynamique sous vibrations ambiantes d'un pont à haubans sur l'oued Dib a Mila. *ECOLE NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS.*
- Kiureghian A Der, Neuenhofer A (1992) Response spectrum method for multi-support seismic excitations. *Earthq Eng Struct Dyn* 21:713–740. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290210805>
- Konakli K, Der Kiureghian A (2011) Stochastic Dynamic Analysis of Bridges Subjected to Spatially Varying Ground Motions.
- Konakli K, Der Kiureghian A (2012a) Simulation of spatially varying ground motions including incoherence, wave-passage and differential site-response effects. *Earthq Eng Struct Dyn* 41:495–513. <https://doi.org/10.1002/eqe.1141>
- Konakli K, Der Kiureghian A (2012b) Simulation of spatially varying ground motions including incoherence, wave-passage and differential site-response effects. *Earthq*

- Eng Struct Dyn 41:495–513. <https://doi.org/10.1002/eqe.1141>
- Konakli K, Der Kiureghian A (2012c) Simulation of spatially varying ground motions including incoherence, wave-passage and differential site-response effects. Earthq Eng Struct Dyn 41:495–513. <https://doi.org/10.1002/eqe.1141>
- Koufoudi E, Chaljub E, Dufour F, et al (2018) Spatial variability of earthquake ground motions at the dam–foundation rock interface of Saint Guérin: experimental and numerical investigations. Bull Earthq Eng 16:1751–1777.
<https://doi.org/10.1007/s10518-017-0266-8>
- Laib (2018) Modélisation analytique et expérimentale de la variabilité spatiale du mouvement sismique et effets sur les structures. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- Laouami N, Labbe P (2001) Analytical approach for evaluation of the seismic ground motion coherency function. Soil Dyn Earthq Eng 21:727–733. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(01\)00041-0](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(01)00041-0)
- Li C, Li HN, Hao H, et al (2018) Seismic fragility analyses of sea-crossing cable-stayed bridges subjected to multi-support ground motions on offshore sites. Eng Struct. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.066>
- Liao S, Li J (2002) A stochastic approach to site-response component in seismic ground motion coherency model. Soil Dyn Earthq Eng 22:813–820. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00103-3](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00103-3)
- Liao S, Zerva A (2006) Physically compliant, conditionally simulated spatially variable seismic ground motions for performance-based design. Earthq Eng Struct Dyn 35:891–919. <https://doi.org/10.1002/eqe.562>
- Liu G, Liu Y, Han B, Lian J (2020) Theoretical and Numerical Approach for Simulating Spatially Variable Seismic Underground Motions in Layered Saturated Media. J Earthq Eng 24:601–627. <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1452809>
- Loh C -H (1985) Analysis of the spatial variation of seismic waves and ground movements from smart-1 array data. Earthq Eng Struct Dyn 13:561–581. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290130502>
- Loh C -H, Yeh Y -T (1988) Spatial variation and stochastic modelling of seismic differential ground movement. Earthq Eng Struct Dyn 16:583–596. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290160409>
- Loh CH, Lin SG (1990) Directionality and simulation in spatial variation of seismic waves. Eng Struct 12:134–143. [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(90\)90019-O](https://doi.org/10.1016/0141-0296(90)90019-O)
- Lou L, Zerva A (2005) Effects of spatially variable ground motions on the seismic response of a skewed, multi-span, RC highway bridge. Soil Dyn Earthq Eng 25:729–740. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.11.016>
- Luco JE, Wong HL (1986) Response of a rigid foundation to a spatially random ground motion. Earthq Eng Struct Dyn 14:891–908.
<https://doi.org/10.1002/eqe.4290140606>
- Luis Fabián BONILLA, Stéphane NECHTSCHHEIN, Céline GELIS, et al (2008) Effets de la géologie locale sur les mouvements sismiques : estimation site-spécifique de l'aléa sismique.

- Marc KHAM (2004) Propagation d'ondes sismiques dans les bassins sédimentaires : des effets de site à l'interaction site-ville. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- MF (2008) NCSP-07 Norma de contrucción seismorresistente: Puentes.
- MTP (2010) Règles parasismiques applicables au domaine des ouvrages d'art. Ministère des Travaux Publics, Alger.
- Mwafy AM, Kwon O-S, Elnashai A, Hashash YMA (2011) Wave Passage and Ground Motion Incoherency Effects on Seismic Response of an Extended Bridge. *J Bridg Eng* 16:364–374. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000155](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000155)
- Nakamura H, Yamazaki F (1995) Spatial Variation of Earthquake Ground Motion Based on Dense Array Records. In: *Transaction of the 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*. pp 19–24.
- Pacheco JF, Singh SK (1995) Estimation of Ground Motions in the Valley of Mexico from Normal-Faulting, Intermediate-Depth Earthquakes in the Subducted Cocos Plate. *Earthq Spectra* 11:233–247. <https://doi.org/10.1193/1.1585813>
- Philippe Guéguen (2009) Effet de site. *Inst. des Sci. la terre - Grenoble*.
- Qu T, Wang J, Wang Q (1996) Practical PSD Ground Motion Model with Spatial Effect. *Acta Seismol Sin* 18:55–62.
- Ramadan O, Novak M (1993) Simulation of Spatially Incoherent Random Ground Motions. *J Eng Mech* 119:997–1016.
- Ramadan OMO, Mehanny SSF, Elhowary HA (2015) Seismic vulnerability of box girder continuous bridges under spatially variable ground motions. *Bull Earthq Eng* 13:. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9683-0>
- Ray W. Clough, Joseph Penzien (1993) *Dynamics of structures*, 2nd edition. McGraw-Hill, New York.
- Rezaeian S, Kiureghian A Der (2010) Simulation of synthetic ground motions for specified earthquake and site characteristics. *Earthq Eng Struct Dyn*. <https://doi.org/10.1002/eqe.997>
- Riepl J, Oliveira CS, Bard PY (1997) Spatial coherence of seismic wave fields across an alluvial valley (weak motion). *J Seismol* 1:253–268. <https://doi.org/10.1023/A:1009725604616>
- Rodolfo Saragoni G, Hart GC (1973) Simulation of artificial earthquakes. *Earthq Eng Struct Dyn* 2:249–267. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290020305>
- Ruiz P, Penzien J (1969) *Probabilistic study of the behaviour of structures during earthquakes*. Berkley
- Şafak E (2002) Discrete-Time Analysis of Seismic Site Amplification. *J Eng Mech* 121:801–809. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(1995\)121:7\(801\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(1995)121:7(801))
- Semblat JF, Duval AM, Dangla P (2000) Numerical analysis of seismic wave amplification in Nice (France) and comparisons with experiments. *Soil Dyn Earthq Eng* 19:347–362. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00016-6)
- Sextos A, Karakostas C, Lekidis V, Papadopoulos S (2015) Multiple support seismic excitation of the Evripos bridge based on free-field and on-structure recordings. *Struct Infrastruct Eng* 11:. <https://doi.org/10.1080/15732479.2014.977302>

- Sextos AG, Kappos AJ, Pitilakis KD (2003a) Inelastic dynamic analysis of RC bridges accounting for spatial variability of ground motion, site effects and soil-structure interaction phenomena. Part 2: Parametric study. *Earthq Eng Struct Dyn* 32:629–652. <https://doi.org/10.1002/eqe.242>
- Sextos AG, Pitilakis KD, Kappos AJ (2003b) Inelastic dynamic analysis of RC bridges accounting for spatial variability of ground motion, site effects and soil-structure interaction phenomena. Part 1: Methodology and analytical tools. *Earthq Eng Struct Dyn* 32:607–627. <https://doi.org/10.1002/eqe.241>
- Shama AA (2007) Simplified procedure for simulating spatially correlated earthquake ground motions. *Eng Struct* 29:248–258.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.04.018>
- Shinozuka M (1971) Simulation of Multivariate and Multidimensional Random Processes. *J Acoust Soc Am* 49:357–368. <https://doi.org/10.1121/1.1912338>
- Shinozuka M, Deodatis G (2009) Simulation of Multi-Dimensional Gaussian Stochastic Fields by Spectral Representation. *Appl Mech Rev* 49:29–53. <https://doi.org/10.1115/1.3101883>
- Shinozuka M, Jan CM (1972) Digital simulation of random processes and its applications. *J Sound Vib* 25:111–128. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(72\)90600-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(72)90600-1)
- Shiravand MR, Parvanehro P (2019) Spatial variation of seismic ground motion effects on nonlinear responses of cable stayed bridges considering different soil types. *Soil Dyn Earthq Eng* 119:104–117. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.01.002>
- Shrikhande M, Gupta VK (1998) Synthesizing Ensembles of Spatially Correlated Accelerograms. *J Eng Mech* 124:1185–1192. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(1998\)124:11\(1185\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(1998)124:11(1185))
- Sobczyk K (1991) *Stochastic Differential Equations*. Springer Netherlands.
- Somerville PG, McLaren JP, Sen MK, et al (1991) The influence of site conditions on the spatial incoherence of ground motions. *Struct Saf* 10:1–13. [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(91\)90003-R](https://doi.org/10.1016/0167-4730(91)90003-R)
- Somerville PG, MJP, SCK, HD V. (1988) Site-specific estimation of spatial incoherence of strong ground motion. In: Somerville PG, McLaren JP, Saikia CK, Helmberger D V. (eds) *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II - Recent Advances in Ground-Motion Evaluation: Proceedings of the Specialty Conference*. Park City, UT, USA.
- Svay A (2017) *Modélisation de la Variabilité Spatiale du Champ Sismique pour les Etudes d'Interaction Sol-Structure*. Université Paris-Saclay (ComUE).
- Tajimi HA (1960) statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake. In: *Proceedings of the second world conference Engineering E* (ed). Tokyo and Kyoto, Japan.
- Thráinsson H, Kiremidjian AS (2002) Simulation of digital earthquake accelerograms using the inverse discrete Fourier transform. *Earthq Eng Struct Dyn* 31:2023–2048. <https://doi.org/10.1002/eqe.198>
- Uscinski (1977) *The Elements of Wave Propagation in Random Media*.

- Vanmarcke EH, Fenton GA (1991) Conditioned simulation of local fields of earthquake ground motion. *Struct Saf* 10:247–264. [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(91\)90018-5](https://doi.org/10.1016/0167-4730(91)90018-5)
- Vanmarcke EH, Heredia-Zavoni E, Fenton GA (1993) Conditional Simulation of Spatially Correlated Earthquake Ground Motion. *J Eng Mech* 119:2333–2352.
- Vogt RF, Wolf JP, Bachmann H (1988) Wave scattering by a canyon of arbitrary shape in a layered half-space. *Earthq Eng Struct Dyn* 16:803–812. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290160603>
- Wang D, Li Y, Hao S, Zhao D (2016) Wave-Passage Effect of Earthquake Loadings on Long Structures. *Int J Struct Stab Dyn* 16. <https://doi.org/10.1142/S0219455415500376>
- Wang G, Wang Z (2012) Coherency Variation with Depth at Different Strong Ground Motion Arrays. In: *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Wang J, Chen H (2007) A new spatial coherence model and analytical coefficients for multi-support response spectrum combination. *Earthq Eng Eng Vib* 6:225–235. <https://doi.org/10.1007/s11803-007-0740-4>
- Wang S, Hao H (2002) Effects of random variations of soil properties on site amplification of seismic ground motions. *Soil Dyn Earthq Eng* 22:551–564. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00038-6](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00038-6)
- William Menke;, Arthur L. Lerner-Lam, Bruce Dubendorff, Javier Pacheco (1990) Polarization and coherence of 5 to 30 Hz seismic wave fields at a hard-rock site and their relevance to velocity heterogeneities in the crust | *Bulletin of the Seismological Society of America* | GeoScienceWorld. *Bull Seismol Soc Am* 80:430–449.
- Wolf JP (1985) DYNAMIC SOIL-STRUCTURE INTERACTION.
- Wu Y, Gao Y, Li D (2011) Simulation of spatially correlated earthquake ground motions for engineering purposes. *Earthq Eng Eng Vib* 10:163–173. <https://doi.org/10.1007/s11803-011-0055-3>
- Yang QS, Chen YJ (2000) Practical coherency model for spatially varying ground motions. *Struct Eng Mech* 9:141–152. <https://doi.org/10.12989/sem.2000.9.2.141>
- Ye J, Pan J, Liu X (2011) Vertical coherency function model of spatial ground motion. *Earthq Eng Eng Vib* 10:403–415. <https://doi.org/10.1007/s11803-011-0076-y>
- Zembaty Z, Rutenberg A (2002) Spatial response spectra and site amplification effects. *Eng Struct* 24:1485–1496. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00096-2)
- Zenchi Sennour S (2008) Etude des effets de site induits a corso lors du séisme de Boumerdes. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene
- Zendagui D, Berrah MK (2002) Spatial variation of seismic motion induced by propagation of body waves. *Soil Dyn Earthq Eng* 22:805–811. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00102-1](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00102-1)
- Zendagui D, Berrah MK, Kausel E (1999) Stochastic deamplification of spatially varying seismic motions. *Soil Dyn Earthq Eng* 18:409–421. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(99\)00015-9](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(99)00015-9)

- Zentner I (2016) Génération de signaux sismiques.
- Zentner I (2013) Simulation of non-stationary conditional ground motion fields in the time domain. *Georisk* 7:37–48. <https://doi.org/10.1080/17499518.2013.763572>
- Zerva A (2009) Spatial variation of seismic ground motions: modeling and engineering applications. CRC Press
- Zerva A (1992) Seismic loads predicted by spatial variability models. *Struct Saf* 11:227–243. [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(92\)90016-G](https://doi.org/10.1016/0167-4730(92)90016-G)
- Zerva A, Ang AHS, Wen YK (1986) Development of differential response spectra for lifeline seismic analysis. *Probabilistic Eng Mech* 1:208–218. [https://doi.org/10.1016/0266-8920\(86\)90014-7](https://doi.org/10.1016/0266-8920(86)90014-7)
- Zerva A, Harada T (1997) Effect of surface layer stochasticity on seismic ground motion coherence and strain estimates. *Soil Dyn Earthq Eng* 16:445–457. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(97\)00019-5](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(97)00019-5)
- Zerva A, Shinozuka M (1991) Stochastic differential ground motion. *Struct Saf* 10:129–143. [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(91\)90010-7](https://doi.org/10.1016/0167-4730(91)90010-7)
- Zerva A, Stephenson WR (2011) Stochastic characteristics of seismic excitations at a non-uniform (rock and soil) site. *Soil Dyn Earthq Eng* 31:1261–1284. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.05.006>
- Zerva A, Zervas V (2002) Spatial variation of seismic ground motions: An overview. *Appl. Mech. Rev.* 55:271–296.
- Zhang DY, Liu W, Xie WC, Pandey MD (2013) Modeling of spatially correlated, site-reflected, and nonstationary ground motions compatible with response spectrum. *Soil Dyn Earthq Eng* 55:21–32. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.08.002>
- Zheng Y, Chen B, Chen W (2015) Evaluation of the seismic responses of a long-span cable-stayed bridge located in complex terrain based on an SHM-oriented model. *Stahlbau*. <https://doi.org/10.1002/stab.201510257>

Annexe A.

Modèles de cohérence

1. Modèles Analytiques

- **Modèle de Kanda (2000)**

Dans le but d'analyser la cohérence des mouvements sismiques à la surface du sol des modèles en éléments finis sont utilisées pour l'élaboration de ce modèle de cohérence. Sous un champ incident incohérent, un profil de sol de couches horizontales caractérisé par des interfaces irrégulières est modélisé. Les réponses des interfaces des éléments finis sont calculées sur la base des ondes incidentes se propageant le long de l'interface inférieure. Une fonction d'inter-densité spectrale des ondes incidentes incohérentes entre le point $i (x_i, z_i)$ et le point $j (x_j, z_j)$ est définie avec une cohérence de type exponentiel comme suit :

$$S_{ij}(u, \omega) = \cos\left(\frac{\omega z_j}{V_s}\right) \cos\left(\frac{\omega z_i}{V_s}\right) \exp\left(-\frac{\alpha \omega u}{V_s}\right) S_0(\omega) \quad (\text{A. 1})$$

Avec :

$$S_0(\omega) = \left(\frac{\alpha}{2.4}\right)^2 \frac{1}{\omega_r(1+(\omega_0/\omega)^2)^2} \exp\left(-\frac{\omega}{\omega_r}\right) \quad (\text{A. 2})$$

Où :

V_s est la vitesse de propagation des ondes de cisaillement au substratum.

z_i et z_j sont les coordonnées des deux points dans le sens vertical.

α est un coefficient d'incohérence qui contrôle la décroissance de la cohérence du mouvement incident.

$S_0(\omega)$ est la densité spectrale de puissance du mouvement incident substratum-profil du sol. Les paramètres de cette fonction sont déterminés à travers un lissage de 20 mouvements incidents observés à Kushiro, au Japon (Kanda 2000).

Il est à noter que la présence des irrégularités entre les couches du profil du sol change considérablement les propriétés fréquentielles des mouvements sismiques à la surface. Cela est également constaté à des hautes fréquences. Notons que la cohérence des mouvements sismiques est approximativement unitaire pour des basses fréquences inférieures à la fréquence propre du sol.

2. Modèles empiriques

- **Modèle de Feng et Hu (1981)**

Feng et Hu (1981) ont développé un modèle de cohérence où le site est considéré comme homogène et isotrope. L'expression est donnée par l'équation suivante :

$$\gamma(u, \omega) = \exp\left[\left(\rho_1 \omega + \frac{\rho_2}{\sigma}\right) \rho_3 |u| + i \frac{\omega u}{c}\right] \quad (\text{A. 3})$$

Avec :

σ l'écart type de l'accélérogramme.

c la vitesse apparente des ondes.

ρ_1, ρ_2, ρ_3 sont des coefficients déterminés à partir des accélérogrammes.

La fonction de densité spectrale de puissance des accélérations est considérée identique pour chaque point de site.

- **Modèle de Loh et Yeh (1988)**

Loh et Yeh (1988) ont développé un modèle de cohérence basé sur une étude stochastique pour la prédiction des mouvements sismiques spatialement variables. En fait, l'enregistrement sismique est modélisé par un processus aléatoire stationnaire et homogène. Ce modèle de cohérence ressemble à celui de Luco et Wong (1986) et il intègre les effets de source, passage d'ondes et les caractéristiques de la corrélation spatiale. La formulation de ce modèle est donnée par :

$$\gamma(u, \omega) = \exp\left[-a \left(\frac{\omega |u|}{2\pi c}\right) \exp\left[\frac{i\omega u}{c}\right]\right] \quad (\text{A. 4})$$

c représente la vitesse de l'onde prédominante.

a est un paramètre du modèle évalué à partir des enregistrements sismiques.

Les paramètres du modèle sont déterminés à partir des événements 39 et 40 enregistrés par SMART-1.

- **Modèle de Loh et Lin (1990)**

Loh et Lin (1990), basé sur une description unidimensionnelle de la cohérence, ont proposé un modèle décrit par les équations suivantes :

$$|\gamma(u, \omega)| = \exp[-a\omega^2] \quad (\text{A. 5})$$

$$|\gamma(u, \omega)| = \exp[-(a - b\omega^2)|u|] \quad (\text{A. 6})$$

$$|\gamma(u, \omega)| = \exp[-(a - b\omega)|u|^c] \quad (\text{A. 7})$$

Dans leur évaluation des cartes d'iso-cohérence de deux évènements enregistrés par SMART-1, Loh et Lin (1990) ont constaté une anisotropie dans les estimations. A cet effet, ils ont proposé une autre formulation de leur modèle de cohérence qui tient compte de l'anisotropie observée. Cette formulation est exprimée comme suit :

$$|\gamma(u, \omega, \theta)| = \exp[-(a_1 - b_1\omega^2)|u \cos(\theta)|] \exp[-(a_2 - b_2\omega^2)|u \sin \theta|] \quad (\text{A. 8})$$

Avec :

θ : est l'angle entre la direction de propagation des ondes et le vecteur de séparation des stations.

La distance de séparation u est en *Km* dans cette équation.

Les valeurs des paramètres de ce dernier modèle de cohérence sont :

Pour l'évènement 40 : $a_1 = 0.02$, $b_1 = 0.005$, $a_2 = 0.02$ et $b_2 = 0.0011$.

Pour l'évènement 45 : $a_1 = 0.02$, $b_1 = 0.0025$, $a_2 = 0.02$ et $b_2 = 0.0012$.

- **Modèle de Menke et al. (1990)**

Menke et al. (1990) ont proposé un modèle de cohérence spécifique aux sites rocheux. Les auteurs ont investi les enregistrements des deux réseaux denses sur des sites rocheux en USA. Sur la base de ces enregistrements sismiques le modèle de cohérence spécifique aux sites rocheux a été développé et il est décrit par la formule suivante :

$$|\gamma(u, \omega)| = \exp(-a\omega u) \quad (\text{A. 9})$$

La particularité de ce modèle c'est que, sur des sites rocheux, la cohérence calculée décroît exponentiellement en fonction de la fréquence et la distance de séparation entre les stations.

- **Modèle de Somerville et al. (1991)**

Sur la base des données d'enregistrements des répliques du séisme de l'Impérial Valley en Californie du 15 octobre 1979, Somerville et al. (1991) ont développé un modèle de cohérence où les facteurs principaux considérés de la variabilité spatiale du mouvement sismique sont : i) l'effet de propagation des ondes, ii) l'effet de source, iii) l'effet de dispersion des ondes se propageant de la source jusqu'au site et iv) l'effet des conditions locales de site. L'expression de ce modèle est donnée par :

$$|\gamma(u, \omega)| = \exp[(-a - b\omega^2)u] \quad (\text{A. 10})$$

Où : a et b sont des constantes.

En estimant la cohérence des mouvements des répliques du séisme de Coalinga du 2 mai 1983, Somerville et al. (1991) ont remarqué qu'elle n'était pas particulièrement influencée par les fluctuations de la fréquence ou de la distance. En outre, ils ont remarqué qu'elle présentait des valeurs plus importantes au niveau des faibles fréquences et des petites distances par rapport à la fonction mathématique proposée à partir du séisme de l'Impérial Valley en Californie. Le modèle proposé n'était pas adéquat au cas du séisme de Coalinga. Ils ont conclu que l'incohérence spatiale mesurée aux sites sédimentaires à stratigraphie plane, tels que l'Impérial Valley où la contribution de l'effet de propagation d'onde est très significative par rapport à celui de source, ne peut pas fournir une bonne description de l'incohérence spatiale aux sites où il y a une hétérogénéité latérale significative. D'ailleurs, selon ce modèle, la variabilité spatiale causée par des faibles séismes qui peuvent être représentés par un point source est attribuée à l'effet de dispersion des ondes et les effets des conditions locales de site. D'un autre côté, pour les séismes de fortes magnitudes, la cohérence spatiale est prédite être inférieure à la cohérence des mouvements sismiques des faibles événements. De plus, il a été observé que le degré de signification de l'effet de source est faible en comparaison avec l'effet de dispersion (Zerva et Zervas. 2002 ; Laib. 2018).

- **Modèle de Tamura et al. (1992)**

Tamura et al. (1992) ont développé un modèle de cohérence calibré à partir des données sismiques de quatre événements enregistrés par quatre réseaux denses à Shizuoka au Japon. Ce modèle a pour but d'estimer les déplacements relatifs maximaux entre deux points à la surface du sol. La particularité de ce modèle est qu'il soit défini indépendamment de la fréquence. Il convient de noter que ce modèle donne des déplacements relativement précis pour des distances allant jusqu'à 2 Km. Ce modèle est donné par l'équation suivante :

$$\gamma(u) = \exp(-(u/a_0)^2) \exp(-i\omega u/V_{app}) \quad (\text{A. 11})$$

Où :

a_0 est déterminé par la technique des moindres carrés en utilisant des coefficients de corrélation calculés à partir des enregistrements de déplacements.

- **Modèle de Nakamura et Yamazaki (1995)**

La directivité de la variabilité spatiale dans les ondes sismiques est considérée par le modèle de cohérence développé par Nakamura et Yamazaki (1995). Ce modèle est exprimé en module.

$$|\gamma(u_l, u_t, \omega)| = \exp(-c_0\omega) \exp\left[-\frac{\omega^2 + c_3^2}{c_1^2} (c_4^2 u_l^2 + u_t^2)\right] + [1 - \exp(-c_0\omega)] \exp\left[-\frac{\omega^2}{c_2^2} (c_4^2 u_l^2 + u_t^2)\right] \quad (\text{A. 12})$$

Où :

c_1, c_2, c_3 et c_4 sont des coefficients déterminés à partir des enregistrements sismiques du réseau dense de CHIBA.

u_l et u_t sont les projections de la distance de séparation suivant les directions épiscopale et orthogonale, respectivement.

- **Modèle Qu et al. (1996)**

En se basant sur le principe des spectres de réponse illustrés dans les codes parasismiques, Qu et al. (1996) ont déterminé la cohérence moyenne des cohérences empiriques estimées à partir de plusieurs séismes. Le modèle de cohérence développé est donné par l'équation suivante :

$$|\gamma(u, \omega)| = \exp[-a(\omega)u^{b(\omega)}] \quad (\text{A. 13})$$

Où :

$a(\omega)$ et $b(\omega)$ sont des paramètres variant en fonction de la fréquence qui peuvent être obtenus par des techniques des moindres carrés des fréquences discrètes.

$a(\omega)$ est une fonction quadratique et $b(\omega)$ est une fonction linéaire données par :

$$a(\omega) = a_1\omega^2 + a_2 \quad ; \quad b(\omega) = b_1\omega^2 + a_2 \quad (\text{A. 14 a, b})$$

- **Modèle de Riepl et al. (1997)**

Le travail de Riepl et al. (1997) a été mené en exploitant les données d'enregistrement sismiques du réseau dense EUROSEISTEST. Pour rappel, ce réseau a été installé en Grèce et il couvre de distances de séparation entre les stations allant jusqu'à 5488 m.

Riepl et al. (1997) ont développé un modèle de cohérence où la variation avec la distance de séparation est partagée en deux classes. La première couvre les petites distances de séparation qui sont inférieures à 100 m. Tandis que la seconde classe est valable pour les distances de séparation variant entre 100 et 5488 m.

Riepl et al. (1997) ont constaté que l'influence de l'effet de site est très faible dans la caractérisation de ce modèle de cohérence et cela est valable pour les deux classes c.à.d. pour les petites et longues distances.

Pour des petites distances de séparation, un seul paramètre suffit à définir la cohérence. Tandis que pour les longues distances, le modèle de cohérence est défini sur la base de deux paramètres.

$$|\gamma(u, \omega)| = 10^{-\alpha \cdot u \cdot \omega / 2\pi} \quad (\text{A. 15})$$

Où :

α est une constante positive obtenue par un processus de calcul de la moyenne à travers f (en fonction ω) de et u . par conséquent, l'équation du modèle devient :

$$|\gamma(u, \omega)| = 10^{\alpha_{b,c}(u) \cdot u \cdot \omega / 2\pi} \quad (\text{A. 16})$$

Avec :

$$\log(\alpha_{b,c}(u)) = c + b \log(u) \quad (\text{A. 17})$$

Où :

c et b (ayant des valeurs généralement négatives) sont déterminés par une analyse de régression.

- **Modèle de Wang et Chen (2007)**

Wang et Chen (2007) ont développé un modèle empirique de la fonction de cohérence. Ce modèle est donné par l'expression suivante :

$$\gamma^{pw}(u, \omega) = \frac{1}{1 + \rho_1 |u|^q \omega^k} \exp(-\rho_2 |u|) \quad (\text{A. 18})$$

Où :

ρ_1 , ρ_2 , q et k sont les paramètres du modèle déterminés par une procédure non linéaire de lissage.

- **Modèle de Ye et al. (2011)**

En se basant sur le modèle de cohérence de Hao et al. (1989), Ye et al. (2011) ont développé un modèle empirique de la fonction de cohérence verticale. Ils ont exploité les données d'enregistrements de six séismes issus du réseau SMART-1. Les événements concernés sont 18, 20, 35, 39, 43 et 45. L'évolution de la fonction de cohérence du mouvement vertical est exprimée par :

$$\gamma(u^l, u^t, \omega) = \exp[-\beta_1 u^l - \beta_2 u^t] \exp\left[-(\alpha_1 \sqrt{u^l} + \alpha_2 \sqrt{u^t}) \left(\frac{\omega}{2\pi}\right)^2\right] \exp\left[i \frac{\omega u^t}{V_{app}}\right] \quad (\text{A. 19})$$

Où :

α_1 , α_2 , β_1 et β_2 sont des coefficients obtenus par une analyse de régression en utilisant les techniques des moindres carrées.

u^l et u^t sont, respectivement, les projections de la distance de séparation suivant les directions épacentrale et orthogonale.

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

Annexe B.

Classification des sites

Classification des sites

Tableau B.1. Classification des sites conformément au RPOA (MTP 2010).

Cat	Description		q_c (MPa) (c)	N (d)	pl (MPa) (c)	E_p (MPa) (e)	q_u (MPa) (f)	V_s (m/s) (g)
S1	Rocheux (a)		--	--	>5	>100	>10	$V_s \geq 800$
S2	Ferme	Sable/Gravier	>15	>50	>2	>20	--	$400 \leq V_s < 800$
		Argile	>5	--	>2	>25	>0.4	
S3	Meuble	Sable/Gravier	5-15	10-50	1-2	5-20	--	$200 \leq V_s < 400$
		Argile	1.5-5	--	0.5-2	5-5	0.1-0.4	
S4	Très meuble (b)	Sable/Gravier	<5	<10	<1	<5	--	$100 \leq V_s < 200$
		Argile	<1.5	--	<0.5	<	<0.1	

Tableau B.2. Classification des sites conformément aux prévisions du NEHRP (FEMA P-749, Dec. 2010).

Classe du site	Description Générale	Vitesse de propagation des ondes de cisaillement V_s (m/s)	Module de cisaillement (Pa)
#A	Roche dure	>1524	--
#B	Roche	762 – 1524	--
#C	Sol très dense et roche souple	366 – 762	> 95800
#D	Sol dense	183 – 366	47900 - 95800

Tableau B.3. Classification des sites (Bi et al. 2012)

Type	ρ (kg/m ³)	v (m/s)	ξ
Substratum rocheux	3000	1500	0.05
Sol rigide	2000	450	0.05
Sol moyen	1500	300	0.05
Sol souple	1500	100	0.05

Tableau B.4. Classification des sites conformément à l'Eurocode 8 (EN 1998-1-2004) (CEN 2005).

Type de site	Description du profil stratigraphique	Paramètres		
		$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (blows/30cm)	c_u (kPa)
A	Rock or other rock-like geological formation, including at most 5 m of weaker material at the surface.	> 800	--	--
B	Deposits of very dense sand, gravel, or very stiff clay, at least several tens of meters in thickness, characterised by a gradual increase of mechanical properties with depth.	360 – 800	> 50	> 250
C	Deep deposits of dense or medium-dense sand, gravel or stiff clay with thickness from several tens to many hundreds of meters.	180 – 360	15 - 50	70 - 250
D	Deposits of loose-to-medium cohesionless soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil.	< 180	< 15	< 70
E	A soil profile consisting of a surface alluvium layer with v_s values of type C or D and thickness varying between about 5 m and 20 m, underlain by stiffer material with $v_s > 800$ m/s.			
S ₁	Deposits consisting, or containing a layer at least 10 m thick, of soft clays silts with a high plasticity index ($P_I > 40$) and high water	< 100 (indicative)	--	10 - 20
S ₂	Deposits of liquefiable soils, of sensitive clays, or any other soil profile not included in types A – E or S ₁			

Tableau B.5. Classification des sites conformément à NCSP-07 (MF 2008) : Norma de construcción sismorresistente : Puentes (Règlement parasismique appliqué aux ponts).

Type	Description	V_s (m/s)
I	Roche compacte, sol cimenté ou granuleux très dense	$V_s > 750$
II	Roches très fracturées, sols granuleux ou durs cohésifs	$400 < V_s \leq 750$
III	Sol granuleux de compacité moyenne, ou sol cohésif de consistance ferme à très ferme	$200 < V_s \leq 400$
VI	Sol granuleux meuble ou sol cohésif mou	$V_s \leq 200$

Annexe C.

**Exemples de simulation des mouvements
sismiques**

Sensitivity of Spatial Variable Seismic Ground Motion to Multiple Local Site Conditions

Rachid Derbal^{1,3*}, Nassima Benmansour¹, Mustapha Djafour¹, Mohammed Matallah¹, Salvador Ivorra²

¹RISk Assesment & Management Laboratory (RISAM), University of Tlemcen, Po Box 230, Tlemcen, Algeria.

²Department of Civil Engineering, University of Alicante, San Vicente del Raspeig, Apartado 99, 03080, Spain.

³Department of Civil Engineering, Ctr. Univ. Ain Temouchent, Po. Box 284, Ain Temouchent, Algeria.

*Corresponding author: r.derbal@yahoo.com ; rachid.derbal@cuniv-aintemouchent.dz

Abstract

The spatial variable ground motion can significantly affect the seismic response of large-scale structures. The spatial variable ground motion result from the combination of seismic wave propagation through an inhomogeneous soil medium and the local soil foundation conditions. This gives rise to the loss coherency, wave passage and local site effects. The seismic excitation applied to large-scale structure must be consider all these factors. Several observations on seismic recordings have shown that local site conditions can largely induce seismic ground motion through site amplification. The main aim of this study is the simulation of spatial variable seismic ground motion considering local site conditions, besides loss coherency and wave passage effects. A simulation technique of seismic ground motion is performed. It takes into account all factors of spatial variability of seismic ground motion. The simulation technique is based on the unconditioned approach which the simulated ground motions are consistent with a power spectral density of a recorded motion. In this sense, the filtered Tajimi-Kanai power spectral density model is employed. The seismic ground motions at base rock are described according an empirical coherency loss model. Then, the seismic ground motions on surface are derived by site amplification. Three cases of spatial variable ground motion are investigated. The first adopt all factors of spatial variability of ground motion. In the second, the coherency loss and wave passage effects are adopted. The last case only accounts for local site effect. The uniform case i.e. the spatial variability of ground motion is excluded, is used also for comparison. Based on the discussion of the results obtained, a remarkable sensibility of simulated ground motions to the local site conditions is observed.

Keywords: simulation technique, spatial variability, coherency loss, local site conditions, power spectral density.

Introduction

Seismic response of large-scale structures, such as bridges, must take into account the spatial variability of seismic ground motion. The sources of this variation have been described (Deodatis, 1996; Der Kiureghian, 1996) as: (i) wave passage effect, (ii) wave coherency loss, and (iii) local site effects.

Many researchers have investigated spatial variability of seismic ground motion. Most of these studies have led to empirical or analytical models. In all those studies the site under consideration is assumed to be uniform and homogeneous. The only variations in spatial ground motions are loss of coherency and a phase delay owing to seismic wave propagation. But, for a canyon site or a site with different soil properties, the local site conditions affect the wave propagation hence the ground motion intensity and frequency content (Fontara, 2015). However, this assumption will lead to inaccurate ground motion representation.

Bi et al. (2010), have proposed an approach where the spatial ground motions are modelled in two steps. Firstly, the base rock motions are assumed to have the same intensity and are modelled with a filtered Tajimi-Kanai power spectral density function and an empirical spatial ground motion coherency loss function. Then, power spectral density function of ground motion on surface of the canyon site is derived

by considering the site amplification effect based on the one-dimensional seismic wave propagation theory. They conclude that the effects of neglecting the site amplifications in the analysis as adopted in most studies of spatial ground motion effect on structural responses are highlighted.

Konakli and Der Kiureghian (2012) presented a simulation of the seismic ground motions by two approaches: The conditional approach where the simulated motion is conditioned by an observed acceleration at a site and the unconditional approach where the ground motion is compatible with an estimated spectral density function

The work of Benmansour et al. (2012) is to evaluate the method proposed by the RPOA (MTP, 2010) (the Algerian bridge seismic regulation code) comparing it with more refined approaches and with the provisions of EC8. They have developed a method of generating of asynchronous seismic ground motion in the sense that the displacement signals can be obtained directly without going through the double integration. Based on the study of several bridges, the results obtained of this work show that the simplified RPOA method overestimates the seismic demand. They proposed to modify some provisions, and the new approach gives suitable results (Benmansour, 2013).

Bi and Hao (2012) developed a method for generating asynchronous seismic ground motions that takes account of local site effects. This method is based on the theory of wave propagation presented by WOLF 1985. As a hypothesis, the motion at the rock base is composed of SH wave (off-plan) or the combination of P and SV waves with an incident angle given. The simulated movements are compatible with the spectral density function of the target response spectrum. They concluded that the proposed method leads to a more realistic modeling of the asynchronous seismic ground motions in sites with different characteristics compared to the hypothesis of identical intensity of the movements.

In this study, the generation model of seismic ground motions described by Benmansour (2013) is developed to take account local site effect (Djafour et al., 2006). Several recent studies have shown that the local conditions of the site should not be neglected when interpreting the spatial variability of the seismic ground motions (Derbal et al., 2018, 2019). Consequently, the model proposed in this study takes into account all the effects of the spatial variability of the spatially varying ground motion, in particular the site effect.

The aim of this work is to evaluate the amplification of seismic excitations resulting from a spatially variable seismic ground motion. A simulation technique of the seismic ground motions considering all the factors of the spatial variability of ground motion is proposed. The simulation of spatially variable seismic ground motions is made for all supports of a bridge example. Discussions on the results of site amplification of a numerical example of a bridge are made.

Base rock seismic motion

Assuming that the amplitudes of the power spectral densities at different locations at the base rock are the same. The filtered Tajimi-Kanai power spectral density function is given by (Bi and Hao, 2012; Tajimi, 1960):

$$S_g(\omega) = |H_P(\omega)|^2 S_0(\omega) = \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + (2\omega_f \omega \xi_f)^2} \cdot \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \Gamma \quad (1)$$

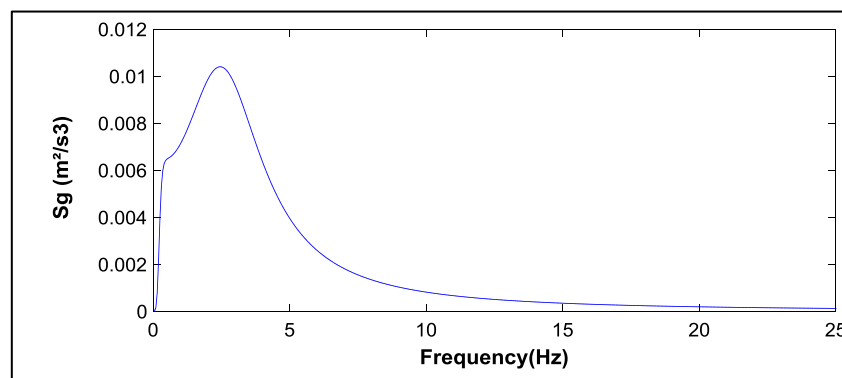


Figure 1. Filtered ground motion power spectral density function at the base rock.

Which $|H_P(\omega)|^2$ is a high pass filter (Clough and Penzien, 1993), $S_0(\omega)$ is the Tajimi-Kanai power spectral density function, ω_g and ξ_g are the central frequency and damping ratio of the Tajimi-Kanai power spectral density function, Γ is a scaling factor depending on the ground motion intensity, and ω_f and ξ_f are the central frequency and damping ratio of the high pass filter.

In this study, it is assumed that $\omega_f = 0.5\pi$ Hz, $\xi_f = 0.6$, $\omega_g = 6\pi$ Hz, $\xi_g = 0.6$ and $\Gamma = 0.00565$ m²/s³. These values correspond to a peak ground acceleration (PGA) equal to 0.2 g with duration T= 20 s (Der Kreughian, 1996). Figure 1 shows the power spectral density of the ground motion at the base rock.

Coherency loss model

The complex coherency function describes the correlation between the amplitudes and phase angles of two ground motion time histories in the frequency domain. This function is defined as (Der Kiureghian, 1996; Bi and Hao, 2012):

$$\gamma_{jk}(\omega) = \frac{S_{jk}(\omega)}{\sqrt{S_j(\omega)S_k(\omega)}} \quad (2)$$

Where ω is the circular frequency; $S_j(\omega)$, $S_k(\omega)$ are the power spectral density functions of the time histories $g_j(t)$ and $g_k(t)$, respectively; and $S_{jk}(\omega)$ is the cross-power spectral density of the considered time histories.

The coherency function can be written as (Der Kiureghian, 1996):

$$\gamma_{jk}(\omega) = |\gamma_{jk}(\omega)| \exp\left(i - \frac{\omega d_{jk}}{v_a}\right) \quad (3)$$

Where d_{jk} is the projected horizontal distance along the direction of propagation of the waves, which is from station j to station k , and v_a is the surface apparent velocity of waves, considered as constant over the frequency range of the wave.

The Sobczyk model (Bi et al., 2010) is used to define the coherency loss between the ground motions localised at the base rock:

$$\gamma_{jk}(i\omega) = |\gamma_{jk}(i\omega)| e^{-\frac{i\omega d_{jk}}{v_a}} = e^{-\beta d_{jk}} e^{-\alpha(\omega)\sqrt{d_{jk}}\left(\frac{\omega}{2\pi}\right)^2} e^{-\frac{i\omega d_{jk}}{v_a}} \quad (4)$$

Where $\alpha = \pi/3$ is the incident angle of the incoming wave to the site; $\beta = 5 \cdot 10^{-4}$ is a coefficient which reflects the level of coherency loss and $v_a = 1780$ m/s is the apparent velocity of seismic wave (Bi et al., 2010).

Site amplification

The ground motions at the surface are derived by site amplification according a soil parameter of each location. Based on the theory of seismic wave propagation (Safak, 1995), the site amplification is defined by the transfer function. This function is described for shear wave propagation in a horizontal layer of soil and has the following form:

$$H_j(i\omega) = \frac{U_j(i\omega)}{U_{j'}(i\omega)} = \frac{(1+r_j-i\xi_j)\exp(-i\omega\tau_j(1-2i\xi_j))}{1+(r_j-i\xi_j)\exp(-2i\omega\tau_j(1-2i\xi_j))} \quad (5)$$

Where j is located at the ground surface and j' is located at the base rock. $U_j(i\omega)$ and $U_{j'}(i\omega)$ are the Fourier transforms of the $u_j(t)$ and $u_{j'}(t)$; ξ_j is the damping ratio accounting for energy dissipation owing to seismic wave propagation and usually has the value of 5%; τ_j is the wave propagation time from point j' to j with $\tau_j = h_j/v_j$ and r_j is the reflection coefficient for up-going waves and it is related to characteristics of the base rock and the soil layer.

In most seismic codes, the characteristic velocity of shear wave propagation of sites is practically the same. In this work, the velocities of shear wave propagation of sites are chosen from the site classification given by the Algeria seismic code for bridges RPOA (MTP, 2010).

Note that the resonant frequencies of the soil layer are given by:

$$f_k = v_s k/4 h \quad k = 1, 3, 5, \dots \quad (6)$$

Where v_s is the shear wave velocity and h is depth of soil layer.

Spatial variable seismic ground motion model

In this paper the stationary time series are simulated using the method described by Deotatis (1996), which is as follows. The cross-spectral density matrix for the stationary process $g_j(t)$; $j, k = 1, 2, \dots, n$ is given by (Der Kiureghian, 1996; Bi and Hao, 2012):

$$S_{jk}(\omega) = [\sqrt{S_j(\omega)S_k(\omega)}\gamma_{jk}(\omega)]; \quad j, k = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

In order to simulate samples of the n-variant stationary stochastic process $g_j(t)$; $j, k = 1, 2, \dots, n$, its cross-spectral density matrix $S_{jk}(\omega)$ given in equation (6) is factorized into the following product using Cholesky's decomposition method:

$$S_{jk}(i\omega) = L_{jk}(i\omega) \cdot L_{jk}^H(i\omega) \quad (8)$$

The elements of $L_{jk}(i\omega)$ can be written in polar form as:

$$L_{jk}(i\omega) = |L_{jk}(\omega)| \exp(i\theta_{jk}(\omega)); \quad j > k \quad (9)$$

Using Eq. (8) and Eq. (9) the stationary stochastic vector process $g_j(t)$; $j = 1, 2, \dots, n$, can be simulated by the following series as $N \rightarrow \infty$ (Benmansour, 2013; Miao et al., 2018):

$$g_j(t) = 2 \sum_{m=1}^n \sum_{l=1}^N |L_{jm}(\omega)| \sqrt{\Delta\omega} \cos(\omega_l t - \theta_{jm}(\omega_l) + \Phi_{ml}) \quad (10)$$

Where: $\omega_l = l\Delta\omega$; $l = 1, 2, \dots, N$ and $\Delta\omega = \omega_u/N$ (11)

N : represents the number of the frequency step $\Delta\omega$ needed to reach the upper cut-off frequency ω_u . The $\{\Phi_{ml}\}$; $m = 1, 2, \dots, n$; $l = 1, 2, \dots, N$ appearing in Eq. (10) are n sequences of independent random phase angles distributed uniformly over the interval $[0, 2\pi]$.

Note that the developed simulation approach of seismic spatial ground motion gives directly a stationary time history series $g_j(t)$ in terms of acceleration, velocity and displacement.

In this work, the non-stationary temporal variation of the simulated ground motions is expressed by multiplying the simulated stationary time histories by the Jennings envelope function (Jennings et al., 1968) as:

$$f_j(t) = \zeta(t) \cdot g_j(t), \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (12)$$

The Jennings envelope function has the following form:

$$\zeta(t) = \begin{cases} (t/t_0)^2 & 0 \leq t \leq 2 \\ 1 & 2 < t \leq 10 \\ \exp[-0.155(t - t_n)] & 10 < t \leq T \end{cases} \quad (13)$$

For site amplification, we use the seismic wave propagation theory presented by Safak (1995). The relation, noted by $H_j(i\omega)$, is described above in Eq.5.

Then, the cross power spectral density function at the ground surface has the following form:

$$S_j(\omega) = |H_j(i\omega)|^2 S_g(\omega) \quad (14)$$

$$S_{jk}(\omega) = H_j(i\omega)H_k^*(i\omega)S_{j'k'}(i\omega) \quad j \neq k \text{ and } j' \neq k' \quad (15)$$

The points j' and k' are located on the base rock and j and k are located at the ground surface. The index "*" represents the complex conjugate.

Numerical application and results

Considering a bridge supported by three piers. The span between piers has a length of 100 m. The points located at the bases of piers (also at the ground surface) are noted 1, 2 and 3. Their vertical projections

to the base rock are 1', 2' and 3', respectively. The scheme of this application example is illustrated in Figure 2.

Adopting the site configuration at the locations 1 to 3 under the three piers of bridge, the predominant and resonant frequencies (F_r and $F_{k=1}$) are given in Table 2. The maximum amplitude of amplification spectra is located at the soft site and it is about 3.77.

Table 1. Parameters of base rock and sites adopted.

Site 1 (Medium)				Site 2 (Firm)				Site 3 (Soft)				Base rock		
ρ_1 (KN)	v_1 (m/s)	ξ_1	h_1 (m)	ρ_2 (KN)	v_2 (m/s)	ξ_2	h_2 (m)	ρ_3 (KN)	v_3 (m/s)	ξ_3	h_3 (m)	ρ_R (KN)	v_R (m/s)	ξ_R
18	300	5%	28	20	600	5%	17	15	150	5%	35	30	1500	5%

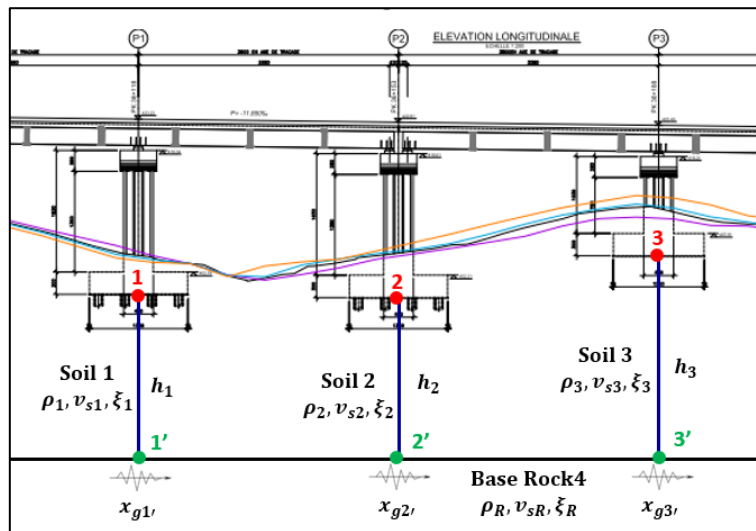


Figure 2. Schematic view of application example.

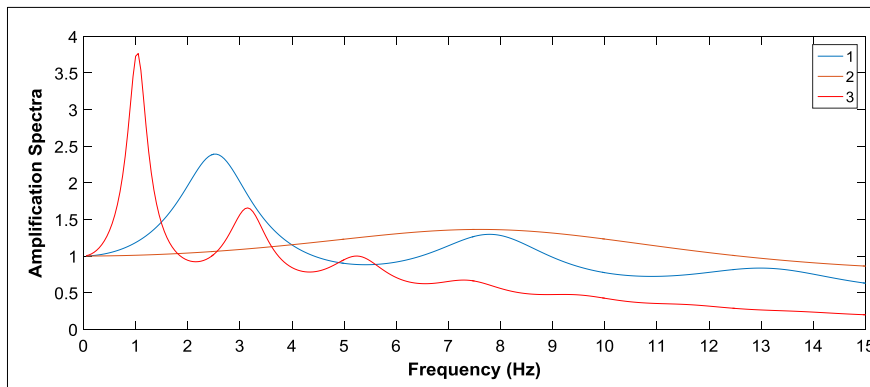


Figure 3. Amplitudes of the site amplification spectra.

Table 2. Predominant frequencies and amplifications spectra corresponding to the studied case.

Site under	Location 1	Location 2	Location 3
Amplification	1.363	2.391	3.766
F_r (Hz)	7.75	2.55	1.05
$F_{k=1}$ (Hz)	8.82	2.67	1.07

In the first step, the coherency loss, wave passage and site amplification effects are neglected. The simulation of seismic ground motions is made without considering the spatial variability of ground motion. These simulated uniform ground motions are compared with the results of the simulation

method considering the spatial variability of seismic ground motion. The simulated seismic excitations in acceleration and in displacement are given in Figure 4 and 5, respectively. The seismic excitations are completely coherent and have a PGA of 0.26 *g* and a PGD of 0.144 *m*.

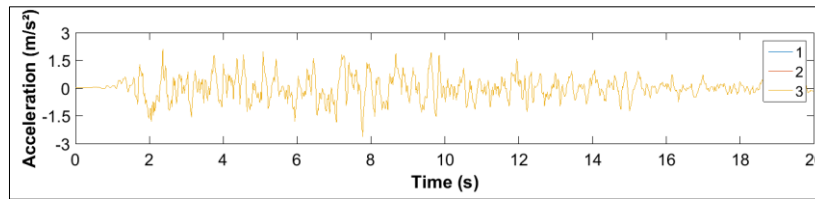


Figure 4. Simulated uniform seismic excitations in acceleration

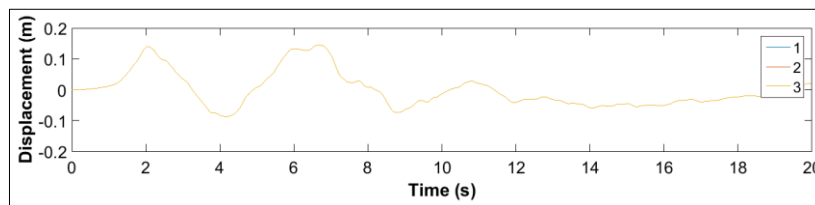


Figure 5. Simulated uniform seismic excitations in displacement

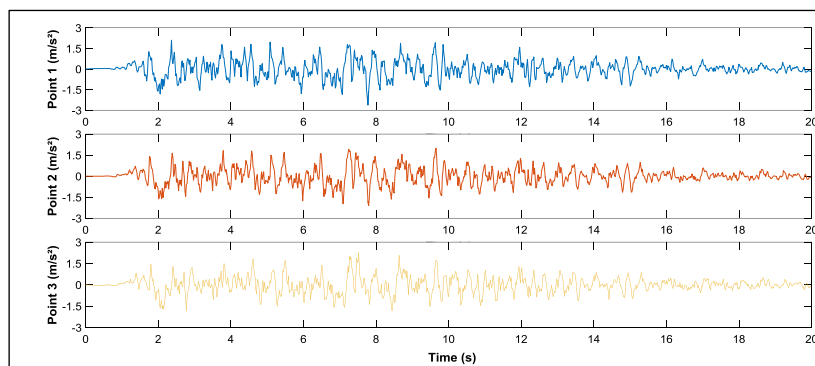


Figure 6. Simulated seismic excitations in acceleration at the base rock

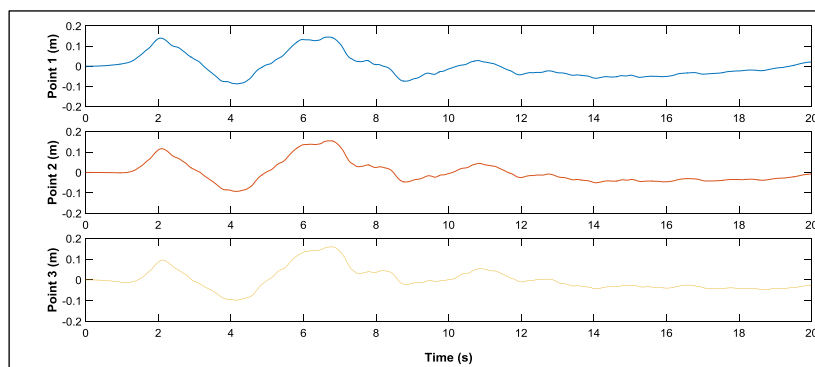


Figure 7. Simulated seismic excitations in displacement at the base rock

In the second step, the seismic ground motions are simulated at the base rock considering coherency loss and wave passage effects. Here, the local site effect is not included. For this case, the simulated seismic excitations are illustrated in Figure 6 and 7, respectively. At the location 1', 2' and 3', the PGAs are 0.26*g*, 0.22*g* and 0.23*g* respectively. While, the corresponding PGDs 0.144 *m*, 0.155 *m* and 0.159 *m* respectively.

The third step consists to project all simulated seismic ground motions localised at the base rock to the ground surface. These projections are performed by considering site amplification according to the parameters of sites and the depths of soil layer. The simulated accelerations and displacements at the

ground surface are illustrated by Figure 9 and 10, respectively. At the location 1, 2 and 3, the PGAs are 0.30g, 0.26g and 0.29g respectively. While, the corresponding PGDs 0.165 m, 0.152 m and 0.202 m respectively. The effect of site amplification on the ground motions at the surface is clearly visible especially for the point 3.

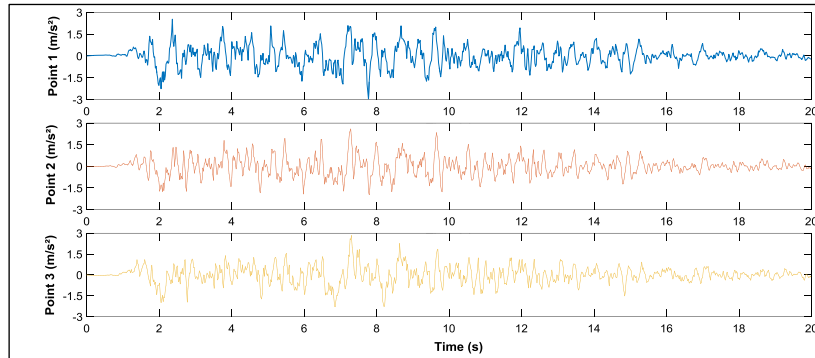


Figure 8. Simulated seismic excitations in acceleration at the ground surface

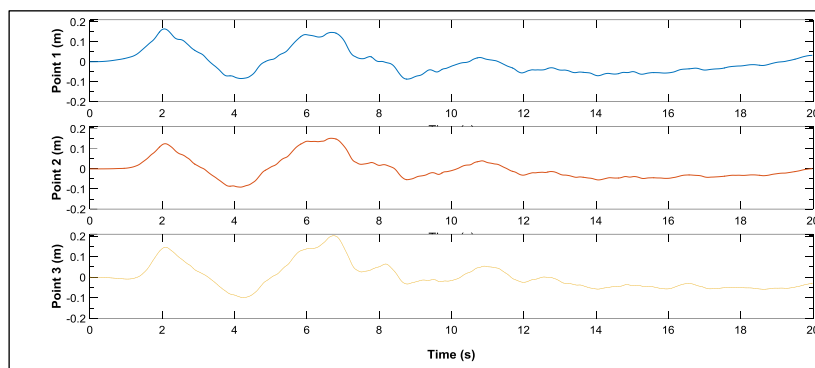


Figure 9. Simulated seismic excitations in displacement at the ground surface

Finally, this last case of simulating seismic ground motion takes into account only the site effect i.e. that the coherency loss and wave passage effects are ignored. This simulating case is performed to evaluate the contribution of the site effect alone in the representation of the seismic excitations. The simulated accelerations and displacements considering only site amplification are given by Figure 14 and 15, respectively.

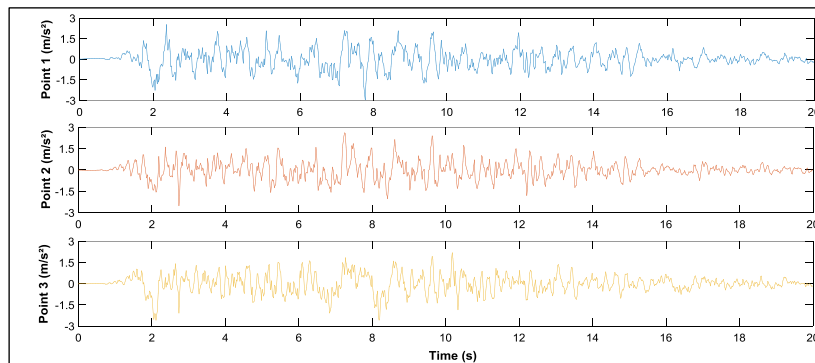


Figure 10. Simulated seismic excitations in acceleration at the ground surface (only site effect)

Conclusion

A study was carried out to evaluate the sensitivity of spatial variable seismic motions to the local site condition. A simulation technique is developed to take account into account all factors of the spatial variability of ground motion especially the local site effect. The site amplification of the three sites with different parameters are discussed. Results of site amplification demonstrate that when the soil layer

increase in depth, the predominant frequency is lower. The site amplification is highly sensitive to the depth and it is weakly depending to the site rigidity. The effect of site amplification on the ground motions at the surface is predominant. For large-scale structures, neglecting local site conditions can lead to an underestimation of seismic excitations.

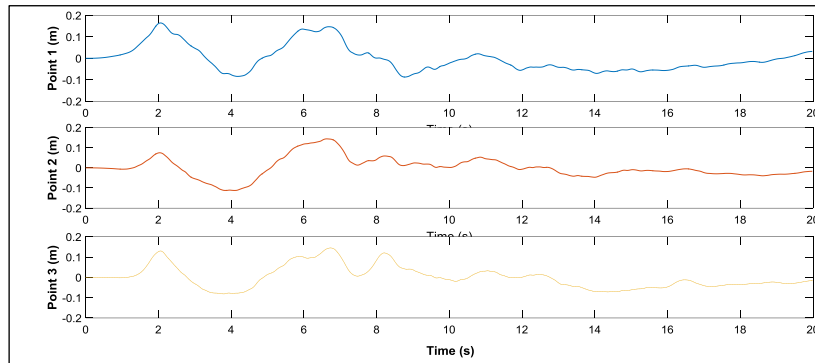


Figure 11. Simulated seismic excitations in displacement at the ground surface (only site effect)

References

- Benmansour N, Djafour M, Bekkouche A, Zendagui D, and Benyacoub A (2012) "Seismic response evaluation of bridges under differential ground motion: a comparison with the new Algerian provisions," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(7): 863-881.
- Benmansour N (2013) Effet de la variabilité spatiale du mouvement sismique sur le comportement dynamique des ponts, Doctoral Thesis. University of Tlemcen, Algeria.
- Bi K, Hao H and Ren W (2010) "Response of a frame structure on a canyon site to spatially varying ground motions", *Structural Engineering and Mechanics*, Techno press, 36(1): 111-127.
- Konakli K and Der Kiureghian (2012) "A Simulation of spatially varying ground motions including incoherence, wave, passage and differential site response effects," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(3): 495-513.
- Bi K and Hao H (2012) "Modelling and simulation of spatially varying earthquake ground motions at sites with varying conditions," *Probabilistic Engineering Mechanics*, 29: 92-104.
- Clough RW and Penzien J (1993) Dynamics of Structures, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Company, New York
- Deodatis G (1996) "Non-stationary stochastic vector processes: seismic ground motion applications," *Probabilistic Engineering Mechanics*, 11: 149-168.
- Der Kiureghian A (1996) "A coherency model for spatially varying ground motions," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25(1): 99-111.
- Derbal R, Benmansour N, Djafour M, Matallah M and Ivorra S (2019) "Viaduct seismic response under spatial variable ground motion considering site conditions," *Earthquakes and Structures*, 17(6): 557-566.
- Derbal R, Benmansour N and Djafour M (2018) "Impact of spatial variability of earthquake ground motion on seismic response of a railway bridge," *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 6(5): 910-920.
- Djafour M, Meddane N, Derbal R, Megnounif A, Zendagui D and Bekkouche A (2006) "Response of a gravity arch dam to spatially varying earthquake ground motion," *8th National Conference on Earthquake Engineering, 100th Anniversary Earthquake Conference*, April 18-22, San Francisco, California, USA.
- Fontara IK, Titirla MD, Wuttke F, Athanatopoulou AM, Manolis GD and Sextos AG (2015) "Multiple support excitation of a bridge based on BEM analysis of the subsoil-structure-interaction phenomenon," *5th Conf.on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Greece, 25-27 May.
- Jennings PC, Housner GW and Tsai NC (1968) Simulated earthquake motions, Report of Earthquake Engineering Research Laboratory, EERL-02, California Institute of Technology.
- Miao Y, Yao E, Ruan B and Zhuang H (2018) "Seismic response of shield tunnel subjected to spatially varying earthquake", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 77: 216-226.
- MTP (2010) (Algerian seismic code for bridges) Règles parasismiques applicables au domaine des ouvrages d'art, Document Technique Règlementaire (DTR), Ministère des Travaux Publics, Algérie.
- Safak E (1995) "Discrete-time analysis of seismic site amplification," *Journal of Engineering Mechanics*, 121(7): 801-809.
- Tajimi H (1960) "A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake," *Proc. of 2nd World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan, 781-796.

Amplification de l'action sismique spatialement variable due aux conditions géologiques locales du site

Rachid Derbal^{1,3}, Nassima Benmansour¹, Mustapha Djafour¹, Mohammed Matallah¹ and Salvador Ivorra²

¹ *RISk Assesment & Management Laboratory (RISAM), University of Tlemcen, Po Box 230, Tlemcen, Algeria.*

² *Department of Civil Engineering, University of Alicante, San Vicente del Raspeig, Apartado 99, 03080, Spain.*

³ *Department of Civil Engineering, Ctr. Univ. Ain Temouchent, Po. Box 284, Ain Temouchent, Algeria.*

RESUME La communauté scientifique reconnaît l'effet de la variabilité spatiale des séismes. En effet, le mouvement du sol est spatialement et temporellement variable. Les causes principales de cette variabilité spatiale du mouvement sismique sont : l'effet d'incohérence, l'effet de passage d'ondes sismiques et particulièrement les conditions géologiques locales du site. Les structures étendues sont les plus concernées par ce phénomène de variabilité spatiale du mouvement sismique. La définition de l'input sismique qui sera appliqué à des structures étendues doit prendre en compte tous les causes de la variabilité spatiale du mouvement sismique. Le travail présenté consiste à définir l'input sismique à n'importe quelle structure étendue. Prendre en compte la variabilité spatiale du mouvement sismique contribue à une représentation fidèle de l'action sismique réelle. En fait, l'apport de l'effet de site dans la détermination des excitations sismiques spatialement variables est prépondérant. A cet effet, l'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'impact de l'effet de site dans la représentation des chargement sismiques différentiels. Une méthode de simulation des signaux sismiques spatialement variables est développée en se basant sur l'approche inconditionnelle. Cette dernière consiste à considérer que le mouvement sismique cible est défini par une densité spectrale de puissance. Un modèle d'incohérence empirique et l'effet de passage d'onde sont utilisés pour définir le mouvement sismique au substratum rocheux. La projection de ce mouvement sismique vers la surface est réalisée en adoptant l'effet d'amplification du site. Les résultats de ce travail ont montré que les mouvements sismiques spatialement variables sont conditionnés par la nature géologique du site étudié. En effet, l'action sismique est susceptible d'être amplifiée tout dépend du type de site considéré conformément aux codes parasismiques en vigueur.

Mots-clés variabilité spatiale, modèle d'incohérence, passage d'onde, conditions géologiques locales du site, amplification du site.

I. INTRODUCTION

Il est reconnu que les structures étendues sont affectées par le phénomène de la variabilité spatiale du mouvement sismique. En effet, cette variabilité spatiale et temporelle du mouvement sismique

résulte de la combinaison de la propagation des ondes sismiques entre la source et le site d'enregistrement. Les principales causes de cette variabilité spatiale du mouvement sismique sont l'effet d'incohérence, l'effet de passage d'onde et l'effet de site (Der Kiureghian, 1996). L'effet d'incohérence provient des différences aléatoires dans les amplitudes et les phases des ondes sismiques dues aux réfractions et réflexions multiples. L'effet de passage d'onde n'est qu'un retard d'arrivée des ondes sismiques aux différents supports de la structure. Il dépend de la distance parcourue et la vitesse de propagation. L'effet de site est dû à la variation spatiale des caractéristiques géologiques locales du profil de sol.

Le travail élaboré par Bi et al. (2010) consiste à étudier la réponse sismique d'un portique d'un pont en tenant en considération la variabilité spatiale du mouvement sismique. Le mouvement sismique au substratum rocheux est défini en utilisant la fonction de densité spectrale de puissance Tajimi-Kanai filtrée. L'effet de site est pris en compte dans cette étude sous forme d'un sol reposant sur le substratum rocheux. Ensuite, les mouvements sismiques à la surface sont calculés en utilisant l'amplification de chaque site étudié. Les résultats ont montré que l'amplification des mouvements sismiques est liée directement à l'effet de site.

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 (Derbal et al., 2017, 2018).

L'objectif principal de cette étude est de simuler des mouvements sismiques en adoptant l'effet de la variabilité spatiale des séismes. Ce travail vise à quantifier l'influence que peut engendrer les conditions géologiques locales du site sur le mouvement sismique. Pour cela, une méthode de simulation des signaux sismiques en tenant en considération l'ensemble des causes de la variabilité spatiale du mouvement de sol est présenté. L'amplification du site est incorporée dans cette méthode en se basant sur la théorie de propagation des ondes, développée par Wolf (1988).

II. DESCRIPTION DES MOUVEMENTS SISMIQUES VARIABLES

II.1. Effet d'incohérence

L'effet d'incohérence est défini dans le domaine fréquentiel par la fonction suivante (Der Kiureghian, 1996 ; Bi et al., 2010) :

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

Avec : ω est la fréquence angulaire. $S_j(\omega)$ et $S_k(\omega)$ sont les fonctions de densité spectrale de puissance. $S_{jk}(\omega)$ est la fonction d'inter-densité spectrale de puissance entre deux mouvements.

II.2. Effet de site

La fonction de transfert pour la propagation d'onde de cisaillement dans une couche horizontale de sol est donnée par l'équation suivante (Wolf, 1988) :

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

Où : ξ_j est le coefficient d'amortissement, τ_j est le temps de propagation de l'onde sismique et r_j est le coefficient de réflexion.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. Exemple numérique

La figure 1 représente un schéma de structure de pont supporté par quatre piles. La longueur des travées entre les piles est égale à 100 m. Les points de contact des piles avec le sol sont notés 1, 2, 3 et 4 tandis que leurs projections au substratum sont notées 1', 2', 3' et 4' respectivement.

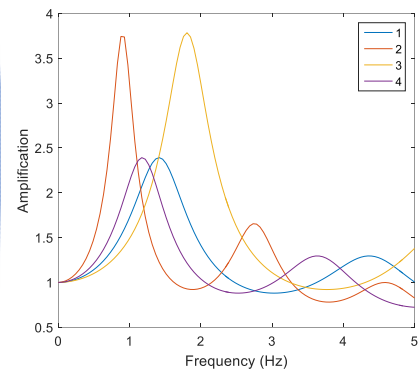
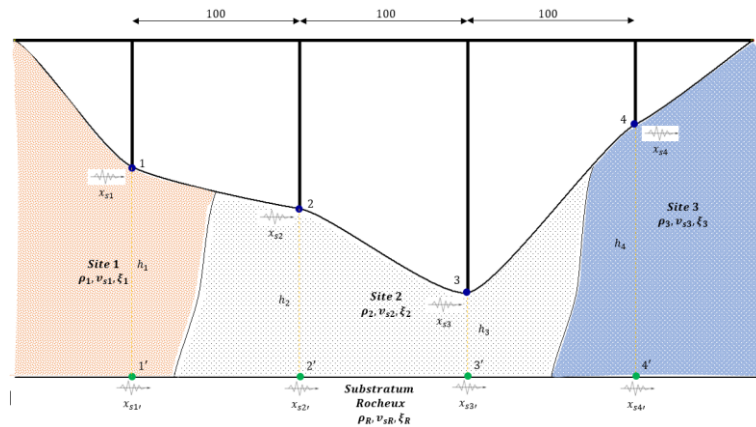


Figure 1. Schéma d'un pont implanté à des sites différents

Figure 2. Fonctions de transfert

III.2. Résultats

En premier lieu, la réponse du sol de fondation est étudiée où les fonctions de transfert des quatre points 1, 2, 3 et 4 situés à la surface sont illustrées dans la Figure 2. Ensuite, quatre cas de simulation des signaux sismiques en accélération et en déplacement ont été adoptés.

1. La variabilité spatiale sismique (SVG) est négligée (cas uniforme).
2. Seuls les effets de passage d'onde et de cohérence sont considérés (sans effet de site).
3. Seul l'effet de site est pris en compte (sans les effets de passage d'onde et de cohérence).
4. L'ensemble des facteurs de la SVG sont considérés.

Dans ce résumé, les résultats du 4^{ème} cas sont illustrés ci-dessous (Figure 3 et 4). Les autres résultats et des comparaisons seront présentés ultérieurement.

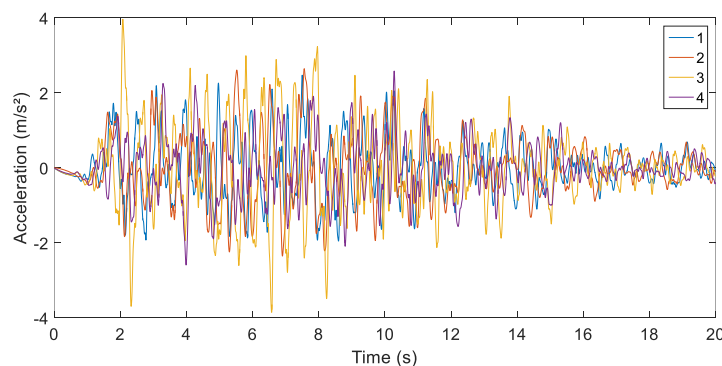


Figure 3. Accélérations simulées dans le cas considérant tous les facteurs de la SVG

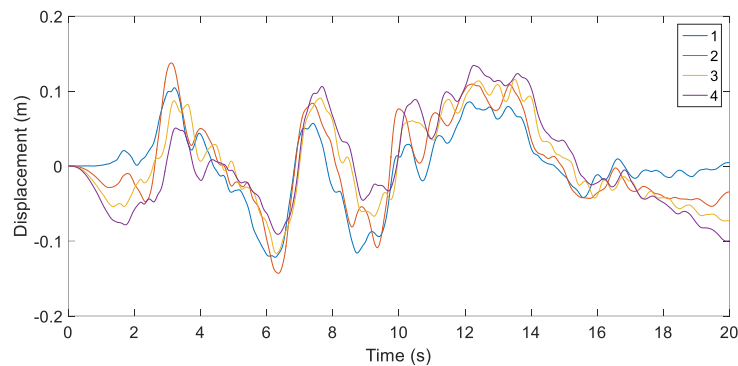


Figure 4. Déplacements simulés dans le cas considérant tous les facteurs de la SVGM

REFERENCES

- Der Kiureghian, A. (1996). A coherency model for spatially varying ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25(1), 99-111.
- Benmansour, N., Djafour, M., Bekkouche, A., Zendagui, D., & Benyacoub, A. (2012). Seismic response evaluation of bridges under differential ground motion: a comparison with the new Algerian provisions. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(7), 863-881.
- M. Djafour, N. Meddane, R. Derbal, D. Zendagui, & A. Bekkouche. (2007). Étude du comportement dynamique d'un barrage poids-voûte face au mouvement sismique différentiel. *18ème Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 Août*.
- M. Djafour, N. Meddane, R. Derbal, A. Megnounif, D. Zendagui, & A. Bekkouche. (2006). Response of a gravity arch dam to spatially varying earthquake ground motion. *8th National Conference on Earthquake Engineering*. San Francisco, California.
- Bi, K., Hao, H., & Ren, W. (2010). Response of a frame structure on a canyon site to spatially varying ground motions. *Structural Engineering and Mechanics*, 36(1), 111-127.
- Bi, K. & Hao, H. (2012). Modelling and simulation of spatially varying earthquake ground motions at sites with varying conditions, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 29, 92-104.
- Adanur, S., Altunişik, A.C., Soyluk, K., Bayraktar, A., & Dumanoglu, A.A. (2016). Multiple-support seismic response of Bosphorus Suspension Bridge for various random vibration methods. *Case Studies in Structural Engineering*, 5, 54-67.
- Shiravand, M.R., & Parvanehro, P. (2019). Spatial variation of seismic ground motion effects on nonlinear responses of cable stayed bridges considering different soil types. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, 104-117.
- R. Derbal, N. Benmansour, & M. Djafour. (2017). Influence de l'effet de site sur le comportement dynamique des ponts. *23ème Congrès Français de Mécanique, Lille, 28 Août au 1er Septembre*.
- Derbal, R., Benmansour, N., & Djafour, M. (2018). Impact of spatial variability of earthquake ground motion on seismic response of a railway bridge. *International journal of computational methods*, 6(5), 910-920.
- Benmansour, N. (2013). Effet de la variabilité spatiale du mouvement sismique sur le comportement dynamique des ponts. *Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie*.
- Shinozuka, M. (1971). Simulation of multivariate and multi-dimensional random processes. *Journal of Acoustic Society of America*, 49, 357-367.