

**Génération Conditionnelle De Signaux Sismiques Artificiels
Variables Dans L'espace Et Compatibles Aux Spectres De
Réponse Sans Le Problème De L'intégrabilité**

Par

RACHEDI Mohammed

Mémoire soumis à

La faculté de Technologie

En vue de l'obtention de Diplôme de Magister

Spécialité: Seismic Risk & Earthquake Engineering

To

My parents

My Sisters

My nephews

To Me

REMERCIEMENTS

Avant tout, je tiens à remercier notre Dieu tout puissant de m'avoir mené à bon chemin pour achever ce modeste travail.

J'aimerais adresser mes premiers remerciements à mes encadreurs Pr M.Djafour et Dr N.Benmansour pour leurs soutien continu, aide, encouragement, patience, et surtout leurs confiance qu'ils m'ont accordé pour mener à terme ce travail. Leurs vastes connaissances dans le domaine m'ont été très précieuses lors de mon apprentissage.

Mes sincères gratitude vont aux Pr Megnounif, Dr Zendagui et Dr Derras, qui ont pris de leurs temps précieux et m'ont fait l'honneur d'accepter d'examiner ce présent travail. Leurs remarques constitueront un véritable apport à ce travail et permettront de l'enrichir d'avantage.

A tous les membres du laboratoire Risam, je vous dois des vifs remerciement pour m'avoir supporté et encouragé tout long de mon travail.

TABLE DES MATIERES

Liste des Figures.....	iii
Liste des Tableaux.....	vii
Abstract.....	vii
Résumé.....	viii
ملخص.....	ix
1 INTRODUCTION	1
1.1 INTRODUCTION.....	1
1.2 PROBLEMATIQUE.....	4
2 GENERALITES	9
2.1 Introduction.....	9
2.2 Accélérogrammes réel.....	9
2.3 Accélérogrammes artificiels.....	11
2.4 CARACTERISTIQUES D'Un TREMBLEMENT DE TERRE.....	11
2.4.1 Valeur maximale du mouvement du sol.....	11
2.5 Durée du tremblment de terre.....	17
2.6 Intensité d'arias.....	18
2.7 Racine Carré moyenne de l'accélération –RMS-.....	19
2.8 Vitesse absolue cumulée.....	20
2.9 Contenu Fréquentiel.....	21
2.9.1 Le spectre d'amplitude de Fourier.....	21
2.9.2 La densité spectrale de puissance.....	22
2.9.3 LA DENSTE SPECTRALE DE PUISSANCE EMPIRIQUE.....	24
2.9.4 LA DENSITE SPECTRALE DE PUISSANCE EVOLUTIVE.....	26
2.10 Spectres de Réponse.....	28
2.11 Conclusion.....	29
3 Introduction à la variabilité spatiale des signaux sismique	30
3.1 Introduction.....	30

3.2	. Causes de la variabilité spatiale des ondes sismique	31
3.3	Mesure de la variabilité spatiale	33
3.4	Fonction de Cohérence	36
3.4.1	Fonctions de Cohérence Empirique	37
a.	Fonction de cohérence H&V (Harichandran and Vanmarke).....	38
b.	Fonction de cohérence d'Abrahamson	39
3.4.2	Fonction de cohérence analytique	41
□	La fonction de cohérence LW.....	41
3.4.3	Fonction de cohérence Anisotropique	42
3.5	Conclusion.....	43
4	Simulation des signaux sismiques	44
4.1	Introduction	44
4.2	Description de la methode de génération.....	45
4.3	Simulation d'un champ de mouvement sismique stochastique stationnaire n fois multi-variables unidimensionnel par la méthode de representation spectrale	45
4.4	Simulation d'un champ de mouvement sismique stochastique non stationnaire n fois multi-variables unidimensionnel	49
4.5	Déscription de l'approche proposée	54
4.6	Generation des signaux sismiques selon l'approche proposée.....	56
4.6.1	Generation des mouvements sismique compatible à un spectre de réponse 56	
4.6.2	Generation des mouvements sismiques variables dans l'espace compatibles à des spectres de réponse	60
4.7	Observations et recommandations.....	67
5	Conclusion	68
	Références Bibliographiques	70

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 Signaux sismiques simulés la méthode Gasparini & Vanmarcke (1976) Signaux obtenus par le logiciel SeismoArtif.....	5
Figure 1-2 Génération synthétique des signaux sismique Hallodorsen & Papageorgiou (2005). Signaux obtenus par le logiciel SeismoArtif	6
Figure 1-3 . (a) accélérogramme non corrigé du séisme CHI-CHI ;.....	7
Figure 2-1 Distributions d'accéléromètres dans l'Europe et le nord de l'Afrique Source: S. Godey http://www.neries-eu.org/	10
Figure 2-2 Evolutions temporelles de différentes accélérations avec la même valeur du PGA	12
Figure 2-3 Carte de l'accélération maximale (PGA en m/s^2) susceptible d'être atteinte durant une période de 475 ans (10% de chances de survenir en 50 ans). Zonage sismique proposé dans le cadre du projet GSHAP	14
Figure 2-4 L'accélération corrigée, vitesse et déplacement intégrés du tremblement de terre d'El Centro, 18 May, 1940.	15
Figure 2-5 Durée Crochet d'un signal d'accélération.	17
Figure 2-6 Comparaison de la durée du tremblement de terre de Taft, California, 18 Juillet 1982 utilisant différentes procédures. (The seismic Design Handbook).....	18
Figure 2-7 Une représentation Husid de deux accélérations enregistrées lors deux tremblements de terre à San Salvador 1982 et 1986.....	19
Figure 2-8 Intensité arias (The seismic Design Handbook).....	20
Figure 2-9 Spectre de Fourier du tremblement de terre El Centro.....	22
Figure 2-10 Densité Spectrale de Puissance du tremblement de terre El Centro.....	23
Figure 2-11 Densités spectrales de Puissance pour un mouvement horizontale [The seismic Design Handbook].....	
Figure 2-12 Densités spectrales de Puissance pour un mouvement vertical [The seismic Design Handbook].....	
Figure 2-13 Densité spectrale de puissance évolutive du model de Clough-Penzien [Cacciola et al (2012)].....	26
Figure 2-14 Densité spectrale de puissance évolutive obtenue à partir de la STFT du signal LA21	27
Figure 2-15 Densité spectrale de puissance évolutive obtenue à partir de la WT du signal LA21	27
Figure 2-16 Procédure de calcul du spectre de réponse à partir de l'accélération selon Chopra (1981)	28
Figure 3-1 Réseaux SMART 1 TAIWAN	32
Figure 3 2 Comparaison des signaux enregistrés sur le cercle intérieur avec la station C00 SMART 1 (Zerva (2009)).....	34
Figure 3 3 Comparaison des signaux enregistrés sur le cercle du milieu avec la station C00 SMART 1 (Zerva (2009)).....	34

Figure 3 4 Spectres Règlementaires correspondant à différents profils de sols selon IBC, 2009. (E.Carlos, 2011).	35
Figure 3 5 Emplacement des points et la direction de propagation d'onde	35
Figure 3 6 Observation de la variabilité spatiale des signaux sismiques	36
Figure 3-7 Variation de la fonction de cohérence HV (The seismic Design Handbook)	39
Figure 3-8 Variation de la fonction de Cohérence d' Abrahamson (The seismic Design Handbook)	40
Figure 3-9 Fonction de Coherence LW (The seismic Design Handbook)	42
Figure 4-1 Fonction de modulation donné par Jennings et al (1968)	50
Figure 4-2 Effet de la fonction de modulation sur un processus stationnaire [Zerva (2009)]	51
Figure 4-3 Procédure de génération des mouvements sismiques différentiels en termes d'accélération, vitesse et déplacement	53
Figure 4 4 Organigramme de l' Approche Proposée	55
Figure 4 5 Accélération Simulés et l'accélération de référence (KOBE)	56
Figure 4 6 Déplacement Simulé et Déplacement Intégré	57
Figure 4 7 Spectre de réponse de l'accélération de référence comparé à celui de RPOA site 1	57
Figure 4 8 Spectre de réponse moyenne calculé à partir de 10 signaux simulés	57
Figure 4 9 Accélération Simulée à partir de l'accélération du séisme SAKARIA	58
Figure 4 10 Déplacement Simulée à partir de l'accélération du séisme SAKARIA	58
Figure 4 11 Comparaison des spectres de Réponse simulé, calculé à partir de l'accélération de référence et le spectre Règlementaire RPOA	59
Figure 4 12 Spectres de réponse moyen de 10 signaux simulés corrigés complètement ou corrigé que la phase des ondes S.	59
Figure 4 13 Une Vue Schématique sur les profils de sols	60
Figure 4 14 Spectre réponse de l'accélération de KOBE comparé aux spectres cible	61
Figure 4 15 Spectre de réponse Simulé et celui du RPOA S1	62
Figure 4 16 Déplacement simulé et le déplacement intégré du séisme de KOBE	62
Figure 4 17 Accélération simulé et Accélération du séisme de KOBE	62
Figure 4 18 Les densités spectrale de puissance des évolutions temporelles des accélérations simulée et de référence pour un site Rocheux	63
Figure 4 19 Spectre de réponse Simulé et celui du RPOA S2	63
Figure 4 20 Déplacement simulé à la station 2 et le déplacement intégré du séisme de KOBE	63
Figure 4 21 Accélération simulé et Accélération du séisme de KOBE	64
Figure 4 22 Les densités spectrale de puissance des évolutions temporelles des accélérations simulée et de référence pour un site Ferme	64
Figure 4 23 Spectre de réponse Simulé et celui du RPOA S3	65
Figure 4 24 Déplacement simulé à la station 3 et le déplacement intégré du séisme de KOBE	65
Figure 4 25 Accélération simulé et Accélération du séisme de KOBE	65
Figure 4 26 Les densités spectrale de puissance des évolutions temporelles des accélérations simulée et de référence pour un site Meuble	66

Figure 4 27 Comparaison entre le déplacement obtenu sur un site rocheux à celui d'un site
meuble67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 Pics maximales de l'accélération, vitesse et déplacement, Magnitude, Distance Epicentrale, et Description du Site (The seismic Design Handbook).....	13
Tableau 2-2 Relations de prédiction du PGA (The seismic Design Handbook).....	16
Tableau 2 3 Les Constantes spectrales de Kanai Tajimi [The seismic Design Handbook, 2001].....	24
Tableau 4 1 Coefficients lies aux profils du sol pour le calcul des spectres règlementaires du RPOA correspondant à chaque support.....	60

ABSTRACT

In nonlinear seismic analysis the ground motion has to be represented through time histories. There are three types of strong motion time histories available: artificial acceleration time histories, synthetic acceleration time histories and of course recorded acceleration time histories from past earthquakes. Often, it is commonly recommended to use the recorded time histories, despite of dense strong motion arrays and the large number database providing a real recorded acceleration time histories, in practice we are confronted to lack of recording stations close by site constructions, or the acceleration time histories that are not compatible with the seismicity of the region or geological site conditions.

This difficulty is much more pronounced in the case of extended constructions like bridges, where the spatial variability of acceleration time histories needs to be considered. Therefore generation of artificial time histories seem to be a good substitute solution as they reproduce the physical characteristics of earthquakes that can be found in the recorded acceleration time histories.

In this study, a new algorithm is developed using the procedure of generating acceleration time histories of Benmansour (2003) extended by an iterative process to make artificial accelerograms compatible with a given target spectrum. Finally, proposed approach provide non stationary, spatially variable compatible with target response spectrum artificial acceleration time histories

RESUME

Lors d'une analyse dynamique non linéaire, l'excitation sismique doit être représentée par son évolution temporelle. Il existe trois types d'accélérogrammes disponibles: signaux artificiels, signaux synthétiques et bien évidemment les signaux réels enregistrés lors des tremblements de terre antérieurs. Souvent, il est recommandé d'utiliser des signaux enregistrés, mais en dépit du grand nombre de stations d'enregistrements à travers le monde et le fleurissement de base de données, dans la pratique on se confronte à l'absence d'enregistrement à proximité du projet, ou à des signaux qui ne sont pas compatibles à la sismicité de la région ou aux conditions géologiques du site.

Cette difficulté est beaucoup plus accentuée dans les projets de constructions étendues, en l'occurrence les ponts, où il y'a lieux de prendre en compte la variabilité spatiale de l'accélération du séisme. Donc les signaux générés artificiellement semblent être une bonne solution de substitution tant qu'ils reproduisent les caractéristiques physiques des tremblements de terre qu'on peut trouver dans les signaux enregistrés. En d'autres termes les signaux générés doivent refléter la sismicité d'une région. Ceci constitue l'objectif du présent travail.

La démarche proposée dans cette recherche consiste à générer d'abord des accélérogrammes non stationnaires variables dans l'espace en utilisant la procédure développé par Benmansour.N (2013). Pour rendre ces accélérogrammes générés compatibles à un spectre de réponse cible, nous avons développé un algorithme comprenant un processus de modification itératif. Cet algorithme a été validé à travers quelques exemples. Le point fort de cette étude réside dans le fait que le nombre d'itération de l'algorithme ne dépasse pas les quatre itérations.

ملخص

في التحليل الديناميكي الغير الخطي، الإثارة الزلزالية يجب أن تكون ممثلة بتطورها الزمني. هناك ثلاثة أنواع إشارات زلزالية: الإشارات الاصطناعية، والإشارات التركيبية وبالطبع الإشارات المقاسة الفعلية المسجلة خلال الزلازل السابقة. في كثير من الأحيان، من المستحسن استخدام الإشارات المسجلة، ولكن، على الرغم من العدد الكبير من محطات التسجيل في جميع أنحاء العالم وقاعدة البيانات المزهرة، في الممارسة العملية نواجه مشكل عدم وجود تسجيل عند محيط المشروع، أو نجد إشارات لا تتوافق مع النشاط الزلزالي في المنطقة أو ظروف الموقع الجيولوجية. هذه المشكلة تتضخم بكثير في مشاريع البناء واسعة النطاق، أي الجسور، اين يجب الأخذ بعين الاعتبار التغيير الفضائي للحركة الزلزالية. لذلك الإشارات المصطنعة تبدو حلا مناسباً لخلافة الإشارات المقاسة. يجب على هذه الإشارات أن تتحلل بنفس الخصائص الفيزيائية التي يمكن العثور عليها في الإشارات المسجلة. وبعبارة أخرى، يجب على إشارات الاصطناعية ان تعكس الصفة الزلزالية للمنطقة. وهذا هو الهدف من هذا العمل.

في هذا البحث نقترح منهج جديد لتوليد الإشارات المصطنعة المتوافقة مع طيف استجابة القواعد الجزائرية لمقاومة الزلازل للمنشآت الفنية (ق ج ز م ف). أولاً الإشارات الزلزالية يتم الحصول عليهم باتباع منهج بن منصور(2013). بعد ذلك نقوم بتجهيز القاعدة العدية لمنهج بن منصور(2013) بالعملية التكرارية التي تحقق التوافق مع طيف الاستجابة لقواعد مقاومة الزلازل. لنحصل في الاخير على اشارات اصطناعية غير ساكنة متوافقة مع طيف الاستجابة لقواعد مقاومة الزلازل و متغيرة فضائياً.

CHAPITRE

1 INTRODUCTION

1.1 INTRODUCTION

Dans la dernière décennie, le développement du concept et des outils pour le génie parasismique basé sur la performance a été un progrès majeur dans la recherche en génie parasismique (PBEE) (Bozorgnia et Bertero 2004). Alors que les codes traditionnels de conception des bâtiments sont prescriptifs et assurent des prescriptions minimales de sécurité et de praticabilité, les méthodes PBEE considèrent l'ensemble des risques sismiques et des comportements structurels dans le but de minimiser le risque global et le coût du cycle de vie de la structure. Cette analyse englobe le comportement non linéaire et ainsi l'effondrement des structures. Le développement d'outils d'analyse (par exemple, OpenSees, voir <http://opensees.berkeley.edu>) a été l'axe de beaucoup de recherches et de développement au cours de la dernière décennie.

Deux approches sont possibles pour l'analyse dynamique non linéaire des structures soumises à des tremblements de terre: *(1) Analyse dynamique temporelle non linéaire*, analyse par l'utilisation de plusieurs évolutions temporelles des tremblements de terre (enregistrées ou synthétiques) et *(2) l'analyse dynamique stochastique non linéaire*, utilisant une représentation stochastique des tremblements de terres. Pour l'analyse dynamique temporelle non linéaire, les méthodes et les outils sont disponibles, y compris le logiciel mentionné OpenSees ci-dessus. Par contre les méthodes stochastiques ne sont pas autant développées, bien que nous trouvons quelques chercheurs qui se sont intéressés à ce sujet (par exemple, Li et Der Kiureghian [1995]; Au et Beck [2001a, 2003]; Franchin [2004]; Fujimura et Der Kiureghian [2007] et Der Kiureghian et Fujimura [2009]).

Dans la pratique actuelle du PBEE, les signaux sismiques utilisés comme des inputs sont sélectionnés à partir d'une base de données de signaux enregistrés au cours des séismes passés, ces derniers sont souvent modifiés pour s'adapter aux conditions désirées.

Dans les dernières années, un nombre considérable de réseaux de station d'enregistrement a été installé dans le monde entier. Malgré cette initiative, la disponibilité des signaux sismiques naturels reste limitée en raison de l'absence de stations d'enregistrement à proximité ou parce que le site se trouve dans une région de sismicité faible ou modérée. En conséquence, dans la pratique, on est contraint de modifier de manière significative les mouvements enregistrés, par exemple, de les amplifier par des facteurs plus grand que 10, 20 ou de modifier leurs contenu fréquentiel, afin d'atteindre l'intensité souhaitée ou les caractéristiques fréquentielles. Ces modifications ont soulevé des inquiétudes quant à la validité de l'approche, comme les signaux modifiés peuvent ne pas représenter exactement les vrais mouvements des tremblements de terre. À la suite de cette lacune, on a vu naître un intérêt croissant pour les méthodes de génération artificielle des signaux sismiques pour un scénario de conception spécifié.

Pour *l'analyse dynamique stochastique*, il est nécessaire d'avoir un modèle de processus aléatoire de tremblement de terre. Beaucoup de ces modèles ont été développés par le passé. Cependant, pour l'analyse dynamique stochastique non linéaire, il est essentiel que le modèle stochastique reflète fidèlement l'évolution de l'intensité et le contenu fréquentiel variant dans le temps. En outre, le modèle devrait être d'une forme qui facilite l'analyse dynamique stochastique non linéaire. Bien que plusieurs modèles précédemment développés assurent une représentation adéquate des caractéristiques des vrais tremblements de terre, pour la plupart, ils ont une procédure qui rend leur utilisation dans l'analyse dynamique stochastique non linéaire encombrante. Par ailleurs, pour une analyse PBEE, il est souhaitable de disposer d'un modèle stochastique qui est paramétré en termes d'information qui est disponible à un ingénieur pour la conception d'un scénario donné. Un tel modèle actuellement n'existe pas.

La génération d'accélérogrammes synthétiques est alors importante vu qu'elle permet de fournir aux ingénieurs des excitations d'entrée fiables pour les sites n'ayant pas de données de tremblement de terre. Ainsi, les accélérogrammes simulés doivent avoir une énergie, une durée et un contenu de fréquence réalistes, représentant les conditions physiques naturelles des évolutions temporelles d'accélération enregistrées. En plus, ils doivent fournir des informations sur la variabilité aléatoire des prévisions de tremblement de terre qui est nécessaire pour l'évaluation probabiliste de l'aléa sismique. (Thrainsson et Kiremidjian, 2002; Boore, 2003).

D'autre part, l'augmentation de la puissance de calcul et le développement de méthodes numériques permettent l'utilisation de l'accélération dans l'étude du comportement dynamique linéaire et non linéaire des structures.

Plusieurs techniques sont disponibles pour la simulation de l'évolution temporelle d'un tremblement de terre. Notamment les modèles d'un processus de Poisson filtrés, les méthodes de représentation spectrale et les modèles ARMA.

Gersch et Yonemoto (1977), Polhemus et Cakmak (1981), Mignolet et Spanos (1987), Kozin (1988) , Deodatis et Shinozuka (1988) , Conte et al .(1992) et d'autres ont utilisé des modèles ARMA pour générer des accélérogrammes. Fenton et Vanmarcke (1990) proposent une méthode pour la simulation des champs stochastiques par la méthode de subdivision moyenne locale.

Une première tentative de simulation des accélérogrammes a été entreprise par filtrage et fenêtrage d'un bruit gaussien, ou en utilisant les modèles autorégressifs à moyennes mobiles (Cornell (1960), Housner et Jennings (1990), Lin (1965), Ruiz et Penzien (1971) Saragoni et Hart, 1974; Nau et al' 1982.). Ces méthodes sont toutes basées sur la théorie de vibration aléatoire. Les accélérogrammes sont en général déconnectés de tout paramètre géophysique spécifique. Une autre approche fournit des accélérogrammes dont le spectre réponse correspond au spectre de réponse cible (Kaul, 1978 ; Vanmarcke, 1979 ; Gasparini Vanmarcke, 1979).

Le problème intrinsèque est que la procédure d'ajustement des accélérogrammes peut générer trop de cycles de mouvement fort. Les accélérogrammes artificiels ont donc une teneur anormalement élevée de l'énergie, et Naiem et Lew(1995) ont démontré l'inefficacité de l'utilisation de ces enregistrements artificiels pour les analyses non linéaires.

Une deuxième catégorie de méthodes de simulation des histoires temporelles des accélérations repose sur une approche plus physique, où le mouvement du sol est modélisé par la convolution de la source, le chemin, et l'effet de site (Aki et Richards, 1980). Des efforts importants ont été consacrés à la modélisation du processus de la source. Par exemple, les fonctions de Green empirique (Hartzell, 1978; Irikura, 1983) et la sommation stochastique (Schneider et al, 1993; Zeng et al, 1994; Beresnev et Atkinson, 1997 .Hartzell et al, 2005) ont été développées afin de simuler la complexité de la source. Lorsqu'elles sont utilisées, cependant, les fonctions de Green empiriques peuvent mal représenter la variabilité des enregistrements réels pour différentes sources ou différentes conditions du site. D'autres auteurs ont concentré leurs efforts sur la modélisation précise de la propagation des ondes dans un modèle 3D basés sur la modélisation des différences finies (Kristek et Moczo, 2003), ou la méthode des éléments spectraux (Komatitsch et al ,2004). Mais ces méthodes exigent toujours des ressources de calcul élevées et une bonne connaissance des milieux, ils atteignent habituellement des fréquences jusqu'à 1 ou 2 Hz seulement (Pousse et al (2013)). D'autres comme Hallodorsen et al (2005) et Mucciarelli et al, (2004) ont établi des modèles qui fournissent des signaux compatibles à un spectre de réponse cible, par la correction de la transformée de Fourier.

Dans une série de documents , Shinozuka et ses co-auteurs (Shinozuka et Jan 1972 Shinozuka 1973, Shinozuka 1987, Shinozuka et Deodatis 1991) introduisent la méthode de représentation spectrale, qui peut être utilisée pour générer facilement des fonctions des processus stochastiques qui peuvent être stationnaires ou non stationnaires , homogènes ou non homogènes, univariées ou multivariées, gaussiens ou non gaussiens . Selon le procédé de représentation spectrale, un processus stochastique stationnaire à moyenne nulle, unidimensionnel avec une fonction de densité spectrale donnée peut être simulé comme une somme pondérée d'un grand nombre de fonctions trigonométriques orthogonales. Cette procédure peut être mise en œuvre très efficacement en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT). En 1996 Deodatis propose un nouvel algorithme avec un processus itératif permettant de rendre les processus aléatoire générés compatible à un spectre de réponse donné. Par la suite, plusieurs chercheurs ont intégré la notion de densité spectrale de puissance évolutive à l'algorithme de Deodatis (1996). On peut trouver différents modèles théoriques reproduisant la dépendance temporelle et fréquentielle de la densité spectrale de puissance, en l'occurrence ceux proposé récemment par Cacciola.P et al (2011,2012), et Gao.Y et al (2012). Une alternative possible, est de calculer la densité spectrale de puissance directement à partir d'un signal d'accélération enregistré. Karmakar.D (2012) et al donnent un aperçu sur deux méthodes qui permettent de calculer cette densité spectrale évolutive.

Dans ce travail, on utilise la méthode de représentation spectrale pour générer des fonctions d'un processus stochastique multivarié stationnaire selon une matrice de densité spectrale de puissance déduites à partir d'un accélérogramme enregistré. Les évolutions temporelles non stationnaires des accélérations et des déplacements à des endroits donnés sont ensuite obtenues par une procédure de segmentation (Benmansour. N 2013) après cela en utilisant un schéma itératif (Deodatis 1996) ces signaux sont rendus compatibles avec les spectres de réponse prescrits. Une modification du régime itératif original (Deodatis 1996) est proposée dans ce travail afin de générer des signaux compatibles à un spectre de réponse cible.

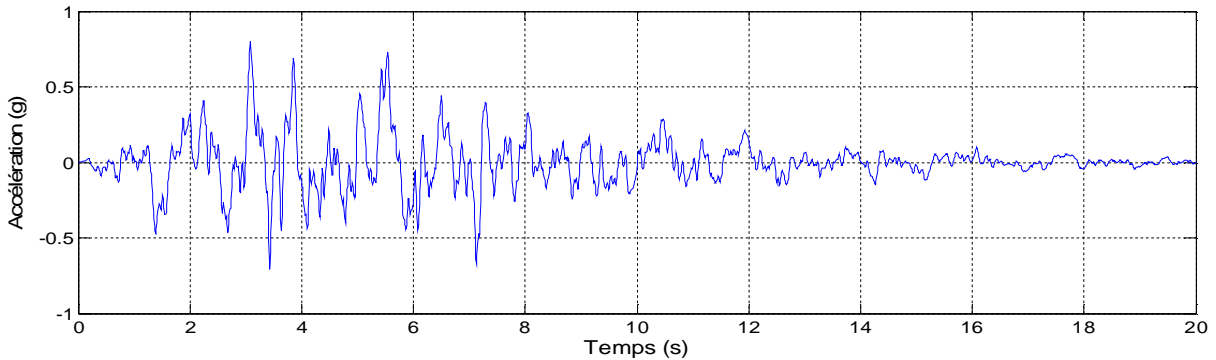
1.2 PROBLEMATIQUE

Dans la plupart des codes et pour la majorité des structures, l'analyse pseudo-statique est effectuée soit par une analyse statique équivalente ou par une analyse modale spectrale); pour ce type d'analyse un spectre de réponse tiré des règlements parasismiques caractérise les actions du tremblement de terre. Toutefois, pour certaines situations spécifiques de conception, une analyse dynamique temporelle est fortement recommandée, donc la sélection d'un ou plusieurs signaux temporaires représentatifs est nécessaire. Ces situations comprennent la conception des bâtiments avec irrégularités, ceux pour lesquels les modes plus élevés sont susceptibles d'être excités, ou ceux conçus pour des niveaux élevés de ductilité. Les représentations temporelles de l'accélération sismique sont parfois nécessaires pour évaluer la réponse des structures en terre en termes de stabilité, de déformation, le potentiel de liquéfaction et de la réponse dynamique de site.

Puisque les tremblements de terre sont fortement affectés par les conditions géologiques et sismologiques locales, une approche largement acceptée, est de simuler des accélérogrammes compatibles à un spectre de réponse cible (spectre de réponse règlementaire entre autres). La détermination du spectre de réponse, à partir d'un accélérogramme, est une procédure très bien maîtrisée. Alors que la génération d'accélérogramme à partir de la connaissance d'un spectre de réponse cible est un problème inverse dont la solution n'est pas unique.

Certaines méthodes de simulation (Gasparini & Vanmarcke, 1976) des signaux sismiques ont tendance à générer des enregistrements artificiels qui n'ont pas l'apparence d'accélérogrammes réels du tremblement de terre, avec un nombre anormalement élevé de cycles de mouvement. Ceci peut être clairement observé sur la représentation temporelle de la vitesse ou celle du déplacement, qui présente des évolutions non physiques.

(a) Accélération



(b) Déplacement

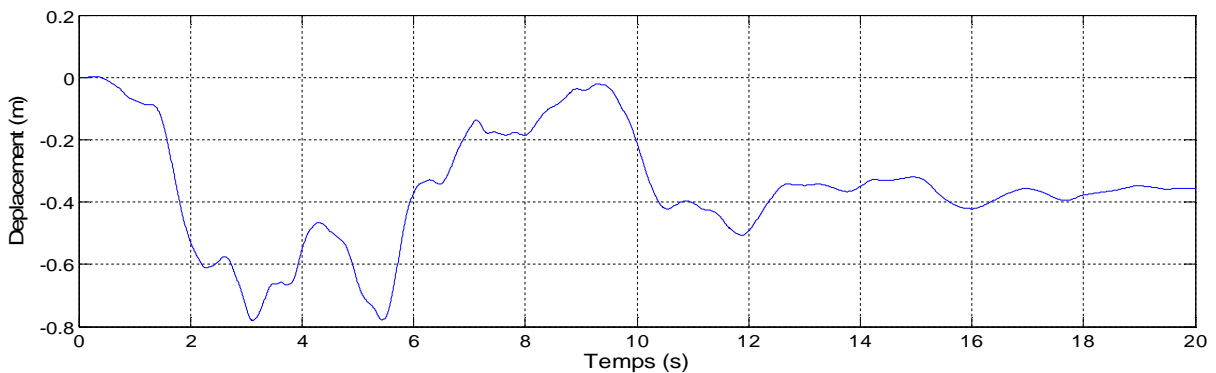


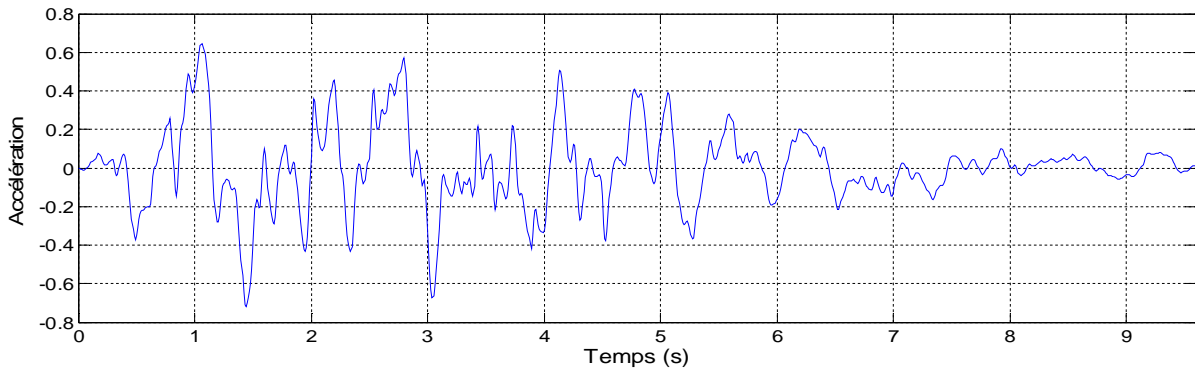
Figure 1-1 Signaux sismiques simulés la méthode Gasparini & Vanmarcke (1976) Signaux obtenus par le logiciel SeismoArtif

La figure 1-1 montre un exemple d'un signal généré artificiellement auquel une fonction de modulation a été appliquée au préalable. Bien que, le signal d'accélération est

généralisé complètement d'une manière artificielle et il ne contient aucune source de parasite (parasites dues à l'appareillement d'enregistrement ou aux bruits ambiant), on observe le même problème d'intégrabilité des signaux sismiques pour les enregistrements des signaux réels (voir figure 1-3).

Hallodorsen & Papageorgiou, (2005) ont proposé une méthode synthétique se basant sur des paramètres physiques d'un tremblement de terre. La figure 1-2 montre un exemple d'un signal sismique généré synthétiquement (en partant des hypothèses suivantes : $M=6.5$, $D_{JB}=10$ Km, $V_s=310$ m/s et champs lointain). Dans ce cas, le signal d'accélération est non réaliste. Habituellement, dans un signal temporelle de l'accélération d'un tremblement de terre, on peut voir les représentations des différents types d'ondes sismiques, alors que dans cette exemple on peine de reproduire la partie des ondes P.

(a) Accélération



(b) Déplacement

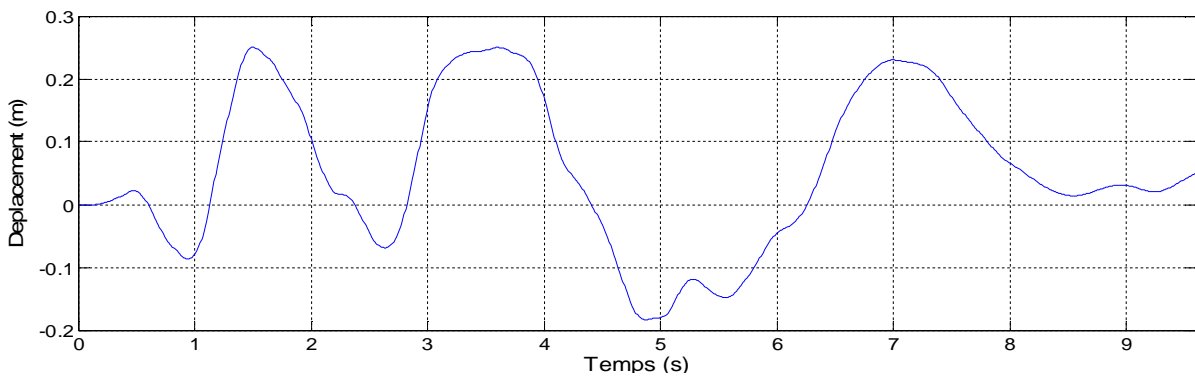


Figure 1-2 Génération synthétique des signaux sismique Hallodorsen & Papageorgiou (2005).
Signaux obtenus par le logiciel SeismoArtif

D'autre part, la procédure de simulation conditionnelle des signaux sismiques est la plus couramment utilisée à cause de sa capacité de générer des accélérogrammes qui héritent des caractéristiques physiques des accélérogrammes enregistrés, et de la facilité de l'intégrer dans le cadre de la conception basée sur la performance des structures étendues.

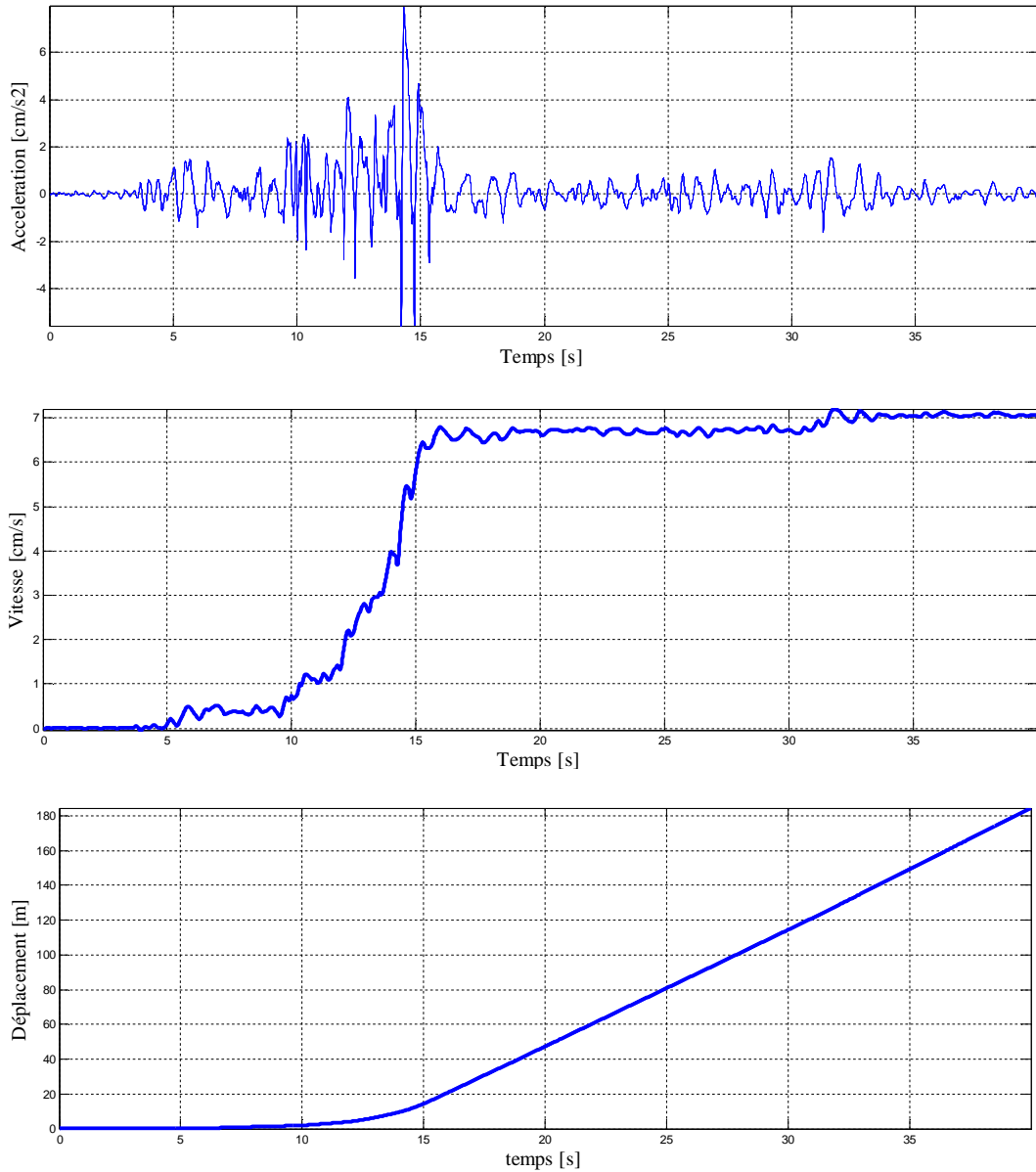


Figure 1-3 . (a) accélérogramme non corrigé du séisme CHI-CHI ;
 (b) Vitesse obtenue par intégration directe de l'accélération (c) Déplacement obtenu par intégration directe de l'accélération

Cependant, la plupart des accélérogrammes numériques ou analogiques sont en proie à des dérives non réalistes de longue ou de courte période, ceci est beaucoup plus apparent dans la vitesse et les déplacements obtenus à partir de l'intégration de l'accélération comme on peut le voir dans la figure 1-3. Ces dérives peuvent entraîner des estimations inexactes du déplacement et de la vitesse qui se traduisent souvent par des valeurs non physiques et non représentatives. En effet, si en analyse linéaire le mouvement sismique variable dans l'espace (SVGM) peut être appliqué sous forme d'accélération, dans le cas d'analyse non linéaire le SVGM doit être appliqué sous forme de déplacements. Autrement dit, les excitations sismiques en termes de déplacement doivent être évaluées. Donc lors d'une procédure de simulation conditionnelle, les signaux générés vont être tout aussi affectés par le bruit contenu dans un signal enregistré.

L'objectif de ce travail est de fournir des signaux sismiques, générés artificiellement par une procédure conditionnelle, compatibles à un spectre de réponse cible sans qu'ils soient affectés par le problème d'intégrabilité.

Afin de rendre l'utilisation des signaux sismiques simulés plus répandus dans les différentes analyses dynamiques des structures, il faut diminuer aussi les carences que peuvent avoir ces signaux simulés artificiellement (l'ajustement de ligne de base des évolutions temporelles des signaux, la non-stationnarité dans les amplitudes et le contenu fréquentiel).

Deux approches de simulation conditionnelle sont revisitées, celle de Deodatis (1996) et celle de Benmasour (2013). De ces deux approches, on essaiera d'émaner une procédure qui sera capable de simuler des signaux sismiques artificiels compatibles à un spectre sans le problème d'intégrabilité.

Pour cela nous proposons dans ce mémoire de conserver le processus de génération par segmentation de Benmansour en y rajoutant un processus d'itération semblable à celui donné par Deodatis (1996). La procédure proposée devra générer des évolutions temporelles d'accélération qui sont à la fois non stationnaires grâce à la segmentation et compatibles à un spectre de réponse cible.

Le contenu de ce mémoire est réparti en quatre chapitres : dans le premier chapitre on expose l'intérêt de générer artificiellement les signaux sismique, dans le deuxième chapitre on présente quelques paramètres qui sont déduits des évolutions temporelles et qui caractérisent un tremblement de terre, une introduction à la variabilité spatiale des signaux sismique est traitée dans le troisième chapitre et enfin dans le derniers chapitre on expose la méthode de simulation des signaux sismiques.

CHAPITRE

2 GENERALITES

2.1 INTRODUCTION

Les Accélérogrammes sont la représentation la plus détaillée des tremblements de terre et contiennent une mine d'informations sur la nature de la secousse. Lorsque les accélérogrammes sont nécessaires, ils peuvent être obtenus grâce aux banques de données d'accélérogrammes réels ou ils peuvent être générés de manière synthétique. Dans tous les cas, les accélérogrammes utilisés dans la conception parasismique doivent être compatibles avec le niveau de risque sismique défini et ils doivent tenir compte de la nature du mouvement du sol prévu sur le site.

Trois différents types d'accélérogrammes sont disponibles: réel, synthétique et artificiel.

2.2 ACCELEROGRAMMES REEL

L'avantage d'utiliser des accélérogrammes réels, c'est qu'ils sont de véritables enregistrements des secousses produites par les tremblements de terre. Par conséquent, ils portent toutes les caractéristiques d'un séisme (amplitude, contenu fréquentiel, contenu énergétique, la durée et les caractéristiques de phase), et tiennent compte de tous les facteurs qui influencent les accélérogrammes (caractéristiques de la source, le chemin et le site). Les accélérogrammes ne sont généralement pas compatibles aux spectres règlementaires, ce qui représente un grand inconvénient quant à leurs utilisations.

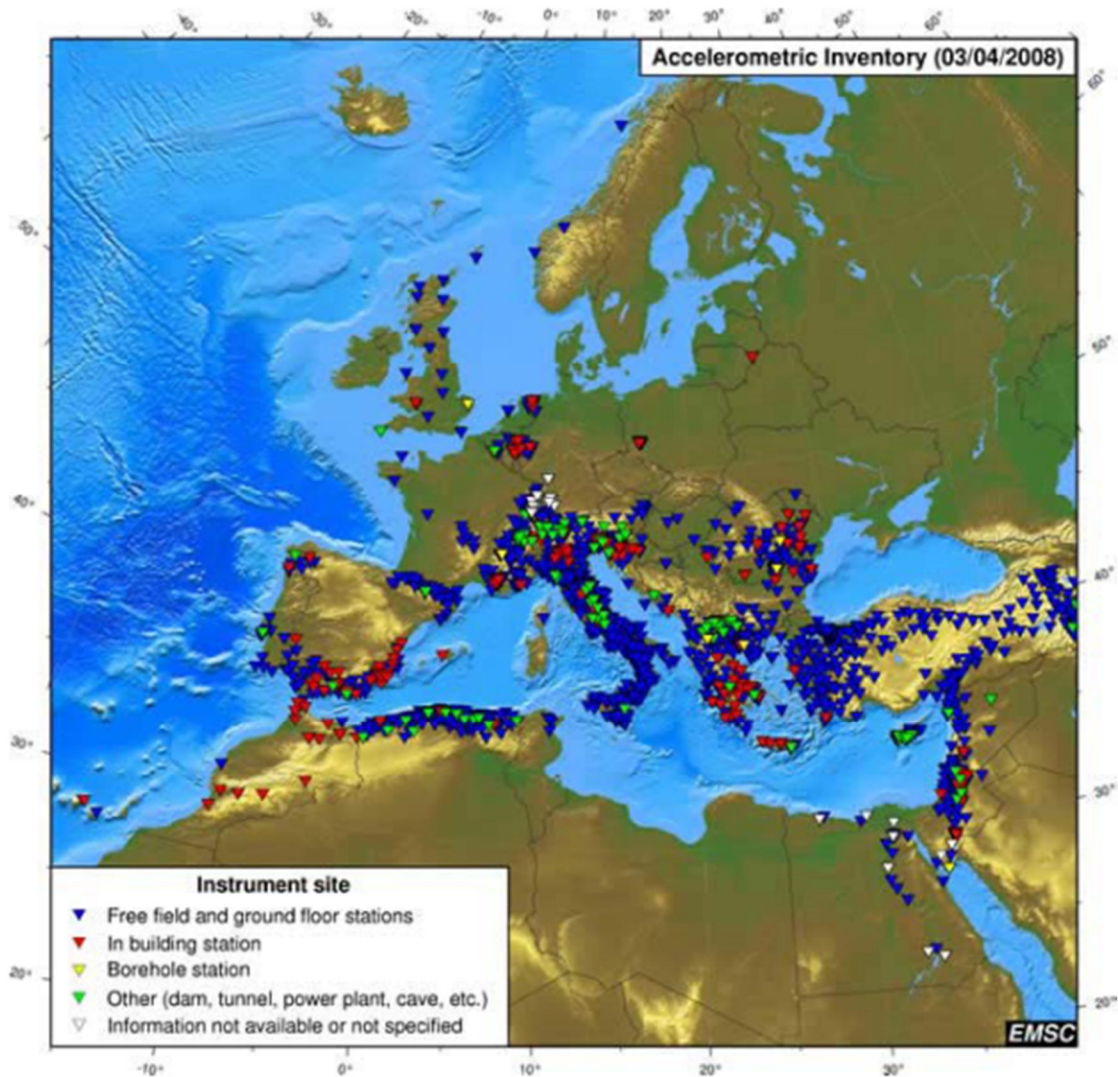


Figure 2-1 Distributions d'accéléromètres dans le bassin méditerranéen Source: S. Godey <http://www.neries-eu.org/>

Il existe actuellement beaucoup de bases de données où on peut avoir des accélérogrammes. Parmi ces bases de données on peut citer :

- ❖ Earthquake Strong Motion Collection (<http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/fliers/se-0308.shtml>)
- ❖ European Strong Motion database (<http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/ESD/>)
- ❖ Worldwide: Center for engineering strong motion data including COSMOS (worldwide) <http://www.strongmotioncenter.org/>
- ❖ Base de données suisse: http://seispc2.ethz.ch/strong_motion/home_en.jsp
- ❖ Réseaux Français de station d'enregistrement RAP <http://www-rap.obs.ujf-grenoble.fr>

2.3 ACCELEROGRAMMES ARTIFICIELS

Les accélérogrammes artificiels sont générés pour correspondre à un spectre de réponse ou de puissance cible. Le logiciel SIMQKE de Gasparini et Vanmarcke (1976) et le logiciel SeismoArtif (2012) sont des outils disponibles parmi tant d'autres pour la génération de signaux sismiques compatibles à un spectre de réponse. L'utilisation de ces méthodes a tendance à générer des enregistrements artificiels qui n'ont pas l'apparence d'accélérogrammes réels des tremblements de terre, avec un nombre anormalement élevé de cycles de mouvement.

2.4 CARACTERISTIQUES D'UN TREMBLEMENT DE TERRE

Les caractéristiques d'un séisme qui sont généralement les plus utilisées dans les applications d'ingénierie de parasismique sont :

1. Les valeurs maximales du Mouvement du sol (accélération maximale du sol-Peak Groud Acceleration, vitesse maximale du sol-Peak Groud Velocity, et le déplacement maximale du sol-Peak Ground Displacement),
2. La durée de la secousse sismique, et
3. le contenu fréquentiel.

Chacun de ces paramètres influence la réponse d'une structure. Les valeurs maximales du mouvement du sol influence principalement les amplitudes de vibration. La durée de la secousse sismique a un effet prononcé sur la gravité de la secousse. Un mouvement du sol avec un PGA modéré et une longue durée peut causer plus de dégâts qu'un mouvement du sol avec un PGA plus important et une durée plus courte. Le contenu en fréquence affecte fortement la réponse d'une structure. Dans une structure, le séisme est amplifié lorsque le contenu fréquentiel du séisme et les fréquences propres de la structure sont proches les uns des autres. Chacune de ces caractéristiques sont brièvement présentées ci-dessous:

2.4.1 VALEUR MAXIMALE DU MOUVEMENT DU SOL

L'un des paramètres les plus couramment associé à la gravité des séismes est l'accélération maximale du sol (PGA), qui est obtenue directement à partir des données enregistrées. Elle est la valeur absolue maximale de l'accélération dans l'évolution temporelle. Il est reconnu que le PGA ne permet pas seul de caractériser le potentiel de dommage. À la fois une impulsion de courte durée de haute fréquence et une impulsion de longue durée de basse fréquence peuvent avoir la même valeur de crête d'accélération du sol, tout en produisant une réponse très différente dans les structures. Ceci peut être observé sur la figure 2-2

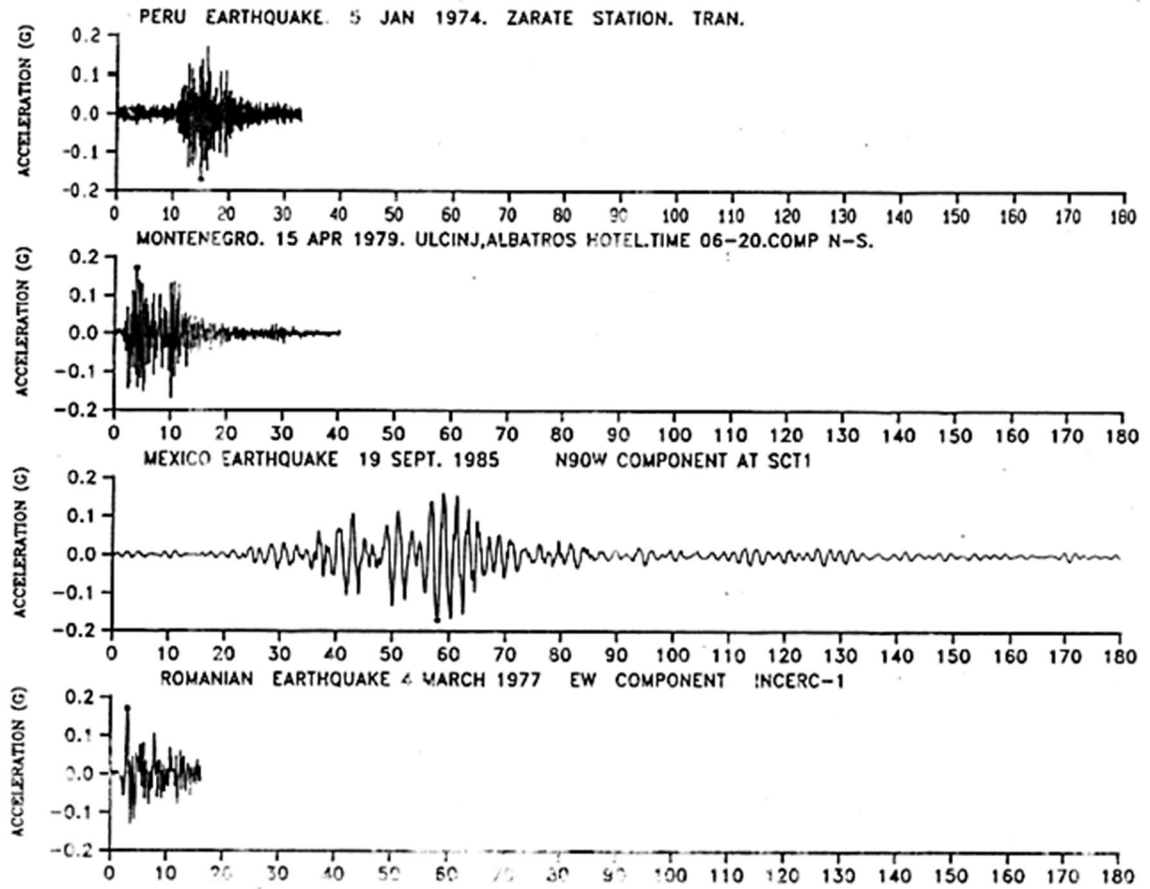


Figure 2-2 Evolutions temporelles de différentes accélérations avec la même valeur du PGA (The Seismic Design Handbook, 2001).

Le tableau 2-1 donne l'accélération maximale du sol, vitesse, déplacement, magnitude, distance épacentrale, et la description du site d'un certain nombre d'événements sismiques de l'ouest des Etats-Unis. (The Seismic Design Handbook, 2001).

Accelerograms							
Earthquake and location	Mag.	Epicentral distance (km)	Comp.	Peak Acc. (g)	Peak Vel. (in/sec)	Peak Disp. (in)	Site Description
Helena, 10/31/1935 Helena, Montana Carroll College	6.0	6.3	S00W	0.146	2.89	0.56	Rock
			S90W	0.145	5.25	1.47	
			Vert	0.089	3.82	1.11	
Imperial Valley, 5/18/1940 El Centro site	6.9	11.5	S00E	0.348	13.17	4.28	Alluvium, several 1000 ft
			S90W	0.214	14.54	7.79	
			Vert	0.210	4.27	2.19	
Western Washington, 4/13/1949 Olympia, Washington Highway Test Lab	7.1	16.9	N04W	0.165	8.43	3.38	Deep cohesionless soil, 420 ft
			N86E	0.280	6.73	4.09	
			Vert	0.092	2.77	1.59	
Northwest California, 10/7/1951 Ferndale City Hall	5.8	56.2	S44W	0.104	1.89	0.94	Deep cohesionless soil, 500 ft
			N46W	0.112	2.91	1.08	
			Vert	0.027	0.87	0.64	
Kern County, 7/21/1952 Taft Lincoln School Tunnel	7.2	41.4	N21E	0.156	6.19	2.64	40 ft of alluvium over poorly cemented sandstone
			S69E	0.179	6.97	3.60	
			Vert	0.105	2.63	1.98	
Eureka, 12/21/1954 Eureka Federal Building	6.5	24.0	N11W	0.168	12.44	4.89	Deep cohesionless soil, 250 ft deep
			N79E	0.258	11.57	5.53	
			Vert	0.083	3.23	1.83	
Eureka, 12/21/1954 Ferndale City Hall	6.5	40.0	N44W	0.159	14.04	5.58	Deep cohesionless soil, 500 ft deep
			N46E	0.201	10.25	3.79	
			Vert	0.043	2.99	1.54	
San Francisco, 3/22/1957 San Francisco Golden Gate Park	5.3	11.5	N10E	0.083	1.94	0.89	Rock
			S80E	0.105	1.82	0.33	
			Vert	0.038	0.48	0.27	
Hollister, 4/8/1961 Hollister City Hall	5.7	22.2	S01W	0.065	3.06	1.12	Unconsolidated alluvium over partly consolidated gravel
			N89W	0.179	6.75	1.51	
			Vert	0.050	1.85	0.85	
Parkfield, 6/27/1966 Cholame Shandon, California Array No. 5	5.6	56.1	N05W	0.355	9.12	2.09	Alluvium
			N89E	0.434	10.02	2.80	
			Vert	0.119	2.87	1.35	
Borrego Mountain, 4/8/1968 El Centro site	6.4	67.3	S00W	0.355	9.12	2.09	Alluvium
			S90W	0.434	10.02	2.80	
			Vert	0.119	2.87	1.35	
San Fernando, 2/9/1971 8244 Orion Blvd., 1 st Floor	6.4	21.1	N00W	0.255	11.81	5.87	Alluvium
			S90W	0.134	9.42	5.45	
			Vert	0.171	12.58	5.76	
San Fernando, 2/9/1971 Castaic Old Ridge Route	6.4	29.5	N21E	0.315	6.76	1.66	Sandstone
			N69W	0.271	10.95	3.74	
			Vert	0.156	2.54	1.38	
San Fernando, 2/9/1971 Pacolma Dam	6.4	7.2	S15W	1.170	44.58	14.83	Highly jointed diorite gneiss
			S74W	1.075	22.73	4.26	
			Vert	0.709	22.96	7.61	
San Fernando, 2/9/1971 Griffith Park Observatory	6.4	32.5	S00W	0.180	8.08	2.87	Granitic
			S90W	0.171	5.73	2.15	
			Vert	0.123	2.92	1.33	
Loma Prieta, 10/17/1989 Corralitos, Eureka Canyon Road	7.0	7.0	90	0.479	18.70	4.54	Landslide deposits
			360	0.630	21.73	3.76	
			Vert	0.439	7.33	3.06	
Loma Prieta, 10/17/1989 Santa Cruz – UCSC/LICK Lab	7.0	16.0	90	0.409	8.36	2.68	Limestone
			360	0.452	8.36	2.60	
			Vert	0.331	4.71	2.65	
Loma Prieta, 10/17/1989 Sunnyvale – Colton Avenue	7.0	43.0	360	0.219	13.16	5.45	Bay sediments/alluvium
			270	0.215	13.42	4.98	
			Vert	0.103	2.91	1.21	
Landers, 6/28/1992 SCE Lucerne Valley Station	7.3	1.8	350	0.800	12.91	28.32	Stiff alluvium overlying hard granitic rock
			260	0.730	58.84	107.21	
			Vert	0.860	16.57	17.03	
Northridge, 1/17/1994 Pacolma Dam	6.6	19.3	265	0.434	12.05	1.97	Highly jointed diorite gneiss
			175	0.415	17.59	1.83	
			Vert	0.184	6.33	1.03	
Northridge, 1/17/1994 Santa Monica – City Hall Ground	6.6	22.5	90	0.883	16.44	5.64	Alluvium
			360	0.370	9.81	2.57	
			Vert	0.232	5.52	1.49	
Northridge, 1/17/1994 Sylmar – County Hospital Parking Lot	6.6	15.8	90	0.604	30.29	5.99	Alluvium
			360	0.843	50.74	12.81	
			Vert	0.535	7.34	2.97	

Tableau 2-1 Pics maxima de l'accélération, vitesse et déplacement, Magnitude, Distance Epicentrale, et Description du Site (The seismic Design Handbook, 2001)

Le PGA est aussi un paramètre qui sert dans la construction des cartes de zonage sismique quantifiant le niveau sismique à prendre en compte pour l'application des règles de constructions parasismiques (Figure2-3).

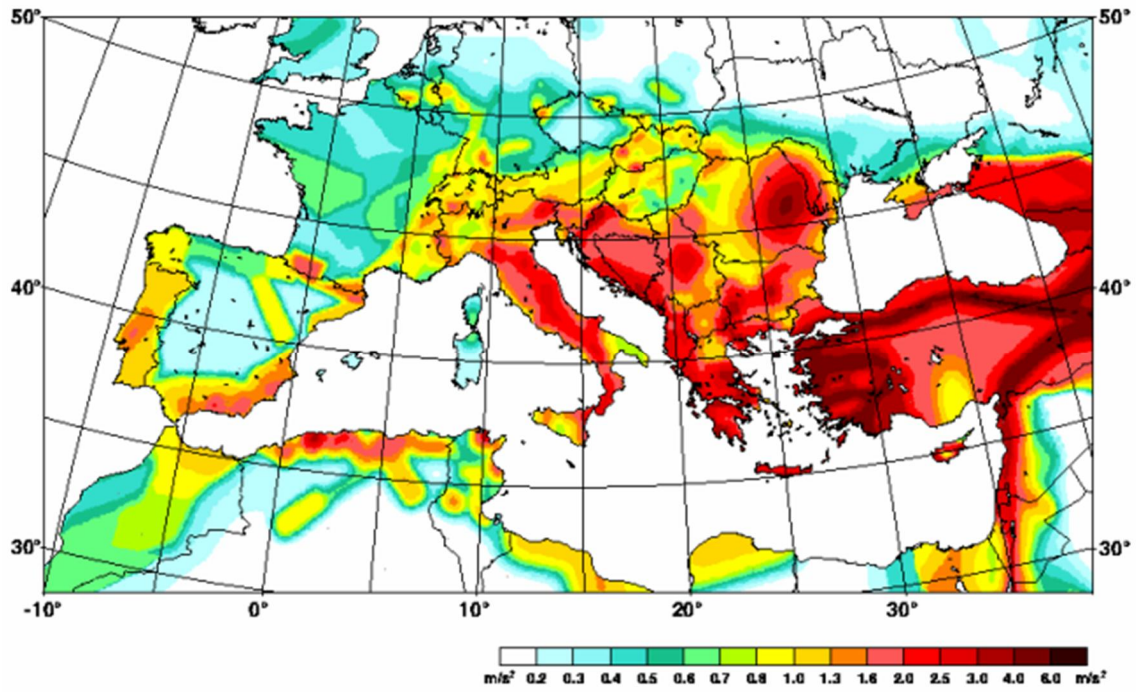


Figure 2-3 Carte de l'accélération maximale (PGA en m/s^2) susceptible d'être atteinte durant une période de 475 ans (10% de chances de survenir en 50 ans). Zonage sismique proposé dans le cadre du projet GSHAP

Deux autres paramètres également obtenus directement à partir de l'intégration des données enregistrées sont la vitesse maximale du sol (PGV) et le déplacement maximum du sol (PGD). Cependant, les mouvements intégrés, en particulier les déplacements, sont très sensibles au traitement appliqué pour éliminer le bruit de numérisation du dossier, ce qui tend à diluer les composantes de hautes fréquences du mouvement et de renforcer les composantes de basses fréquences. Les valeurs rapportées de vitesse et les déplacements doivent toujours être interprétés avec prudence. La figure 2-4 présente un accélérogramme avec la vitesse et de déplacement pour un tremblement de terre spécifique.

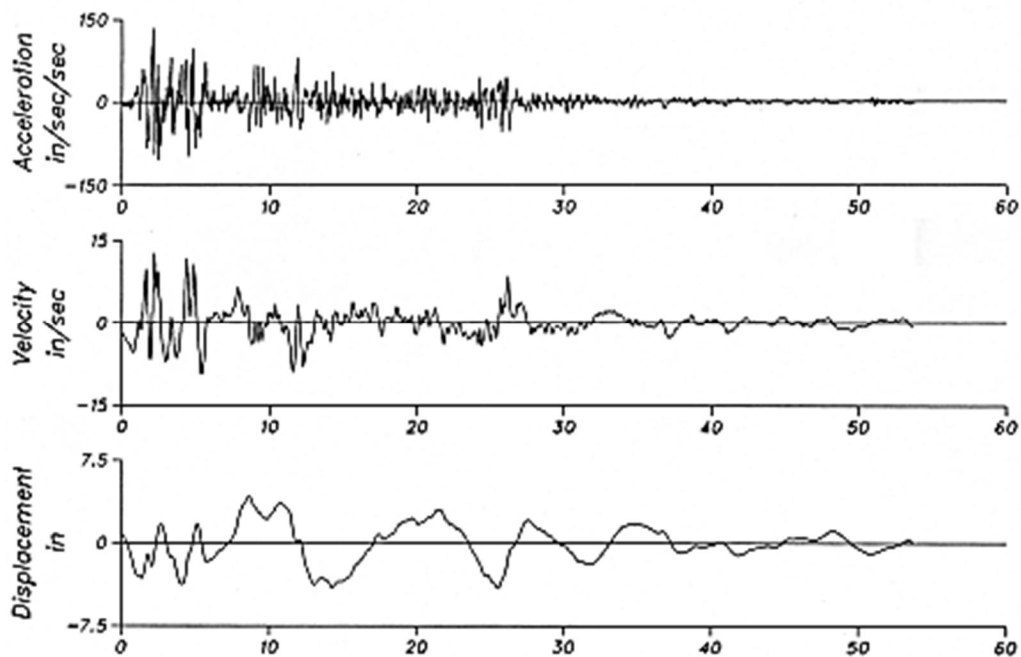


Figure 2-4 L'accélération corrigée, vitesse et déplacement intégrés du tremblement de terre d'El Centro, 18 May, 1940.

Étant donné l'importance que peut avoir la valeur du PGA dans la conception parasismique, plusieurs chercheurs ont établi des équations de prédiction pour l'estimation de la valeur maximale de l'accélération du sol. Ces relations appelées GMPE donnent un aperçu sur la valeur du pic de l'accélération et ne fournissent pas des évolutions temporelles. Quelques relations sont données dans le tableau 2-2

*Génération Conditionnelle De Signaux Sismiques Artificiels
Sans Le Problème De L'intégrabilité*

Data Source	Relationship*	Reference
1. San Fernando earthquake February 9, 1971	$\log PGA = 190 / R^{1.83}$	Donovan (2-23)
2. California earthquake	$PGA = y_0 / (1 + (R'/h)^2)$ where $\log y_0 = -(b+3) + 0.81M - 0.027M^2$ and b is a site factor	Blume (2-26)
3. California and Japanese earthquakes	$PGA = \frac{0.0051}{\sqrt{T_G}} 10^{(0.61M - p \log R + 0.167 - 1.83/R)}$ where $P = 1.66 + 3.60/R$ and T_G is the fundamental period of the site	Kanai (2-27)
4. Cloud (1963)	$PGA = 0.0069e^{1.64M} / (1.1e^{1.1M} + R^2)$	Milne and Davenport (2-28)
5. Cloud (1963)	$PGA = 1.254e^{0.8M} / (R + 25)^2$	Esteva (2-29)
6. U.S.C. and G.S.	$\log PGA = (6.5 - 2 \log(R'+80)) / 981$	Cloud and Perez (2-25)
7. 303 Instrumental Values	$PGA = 1.325e^{0.67M} / (R + 25)^{1.6}$	Donovan (2-23)
8. Western U.S. records	$PGA = 0.0193e^{0.8M} / (R^2 + 400)$	Donovan (2-23)
9. U.S., Japan	$PGA = 1.35e^{0.58M} / (R + 25)^{1.52}$	Donovan (2-23)
10. Western U.S. records, USSR, and Iran	$\ln PGA = -3.99 + 1.28M - 1.75 \ln[R = 0.147e^{0.732M}]$ - M is the surface wave magnitude for M greater than or equal to 6, or it is the local magnitude for M less than 6.	Campbell (2-30)
11. Western U.S. records and worldwide	$\log PGA = -1.02 + 0.249M - \log \sqrt{R^2 + 7.3^2} - 0.00255 \sqrt{R^2 + 7.3^2}$	Joyner and Boore (2-31)
12. Western U.S. records and worldwide	$\log PGA = 0.49 + 0.23(M - 6) - \log \sqrt{R^2 + 8^2} - 0.0027 \sqrt{R^2 + 8^2}$	Joyner and Boore (2-32)
13. Western U.S. records	$\ln PGA = \ln \alpha(M) - \beta(M) \ln(R + 20)$ - M is the surface wave magnitude for M greater than or equal to 6, or it is the local magnitude for smaller M . - R is the closest distance to source for M greater than 6 and hypocentral distance for M smaller than 6. - $\alpha(M)$ and $\beta(M)$ are magnitude-dependent coefficients.	Idriss (2-33)
14. Italian records	$\ln PGA = -1.562 + 0.306M - \log \sqrt{R^2 + 5.8^2} + 0.169S$ - S is 1.0 for soft sites or 0.0 for rock.	Sabetta and Pugliese (2-34)
15. Western U.S. and worldwide (soil sites)	For M less than 6.5, $\ln PGA = -2.611 + 1.1M - 1.75 \ln[R + 0.822e^{0.418M}]$ For M greater than or equal to 6.5, $\ln PGA = -2.611 + 1.1M - 1.75 \ln[R + 0.316e^{0.629M}]$	Sadigh et al. (2-35)
16. Western U.S. and worldwide (rock sites)	For M less than 6.5, $\ln PGA = -1.406 + 1.1M - 2.05 \ln[R + 1.353e^{0.406M}]$ For M greater than or equal to 6.5, $\ln PGA = -1.406 + 1.1M - 2.05 \ln[R + 0.579e^{0.537M}]$	Sadigh et al. (2-35)
17. Worldwide earthquakes	$\ln PGA = -3.512 + 0.904M - 1.328 \ln \sqrt{R^2 + [0.149e^{0.647M}]^2}$ $+ [1.125 - 0.112 \ln R - 0.0957M]F + [0.440 - 0.171 \ln R]S_{sr}$ $+ [0.405 - 0.222 \ln R]S_{hr}$ - $F = 0$ for strike-slip and normal fault earthquakes and 1 for reverse, reverse-oblique, and thrust fault earthquakes. - $S_{sr} = 1$ for soft rock and 0 for hard rock and alluvium - $S_{hr} = 1$ for hard rock and 0 for soft rock and alluvium	Campbell and Bozorgnia (2-36)
18. Western North American earthquakes	$\ln PGA = b + 0.527(M - 6.0) - 0.778 \ln \sqrt{R^2 + (5.570)^2} - 0.371 \ln \frac{V_s}{1396}$ - where $b = -0.313$ for strike-slip earthquakes = -0.117 for reverse-slip earthquakes = -0.242 if mechanism is not specified - V_s is the average shear wave velocity of the soil in (m/sec) over the upper 30 meters - The equation can be used for magnitudes of 5.5 to 7.5 and for distances not greater than 80 km	Boore et al. (2-37)

* Peak ground acceleration PGA in g , source distance R in km, source distance R' in miles, local depth h in miles, and earthquake magnitude M . Refer to the relevant references for exact definitions of source distance and earthquake magnitude.

Tableau 2-2 Relations de prédiction du PGA (The seismic Design Handbook)

2.4.2 DUREE DU TREMBLEMENT DE TERRE

Plusieurs chercheurs ont proposé différentes procédures pour caractériser la durée la secousse sismique. Page et al (1972) et Bolt et al (1969) ont proposé la " durée crochets ", qui est l'intervalle de temps entre le premier et le dernier pic d'accélération supérieure à une valeur donnée (généralement 0,05 g) comme c'est illustré dans la figure 2-4.

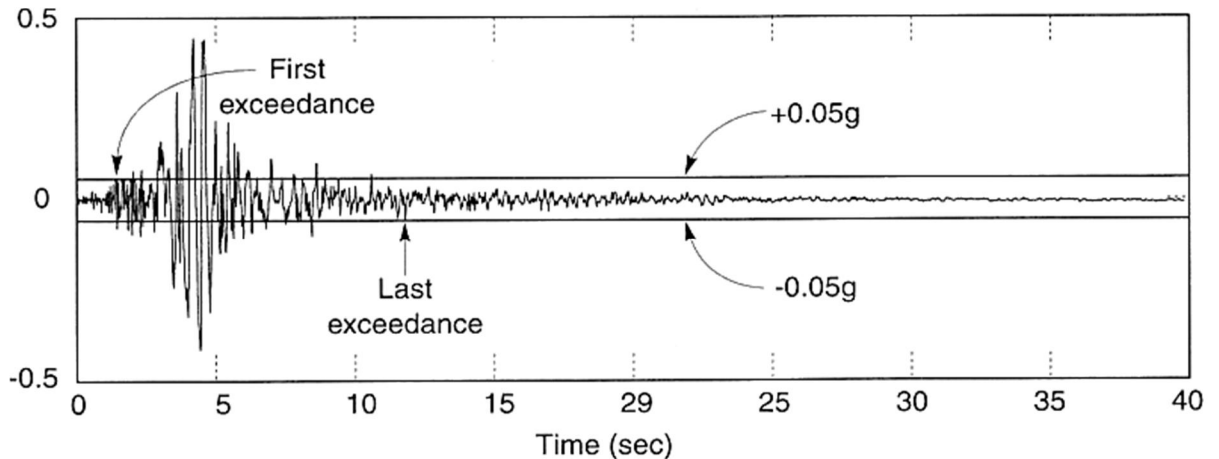


Figure 2-5 Durée Crochet d'un signal d'accélération

Trifunac et Brady (1975) définissent la durée par l'intervalle de temps dans lequel une contribution significative à l'intégrale du carré de l'accélération dénommé l'intensité d'accélérogramme prend place. Ils choisissent l'intervalle de temps entre 5 % et les 95 % des contributions comme durée de la secousse sismique.

Une troisième procédure suggérée par McCann et Shah est basée sur la moyenne du taux d'énergie d'arrivée. La durée est obtenue en examinant la racine de l'accélération (RMS). Une recherche est effectuée sur le taux de variation de la valeur efficace cumulative pour déterminer les deux limites de la durée. Le temps de coupure finale T2 est obtenu lorsque le taux de variation de l'accélération efficace cumulée devient négatif. Le temps initial T1 est obtenu de la même manière, sauf que la recherche est effectuée à partir de la fin de l'enregistrement (on procède en sens inverse). La Figure 2-6 montre une comparaison entre les durées de tremblement de terres en utilisant des procédures différentes. Les comparaisons de ces méthodes montrent que ces procédures aboutissent à différentes durées du tremblement de terre. Ceci est normal puisque les procédures sont basées sur des critères différents. Il convient de noter que, comme il n'existe pas de définition standard de la durée des tremblements de terre, le choix d'une procédure de détermination de la durée dépend de l'objectif de l'application visée. Par exemple, il semble raisonnable d'utiliser la définition de McCann et de Shah, qui est basée sur le RMS de l'accélération lorsque l'on étudie les caractéristiques fixes des enregistrements du tremblement de terre et dans le calcul de la densité spectrale de puissance. En revanche, la durée crochets proposée par Page et al (1972),

et de Bolt (1969) peuvent être plus appropriées pour calculer la réponse élastique et inélastique et l'évaluation des dommages aux structures.

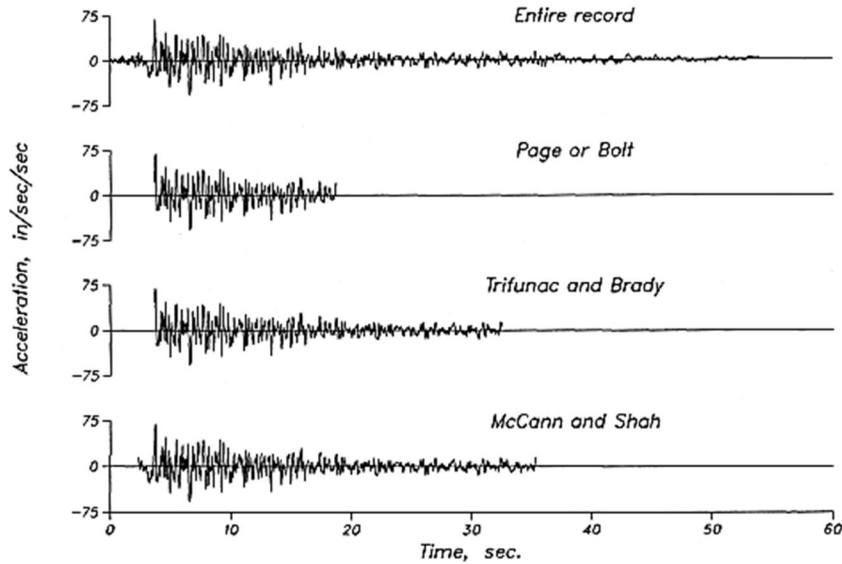


Figure 2-6 Comparaison de la durée du tremblement de terre de Taft, Californie, 21 Juillet 1982 utilisant différentes procédures. (The seismic Design Handbook 2001)

2.4.3 INTENSITE D'ARIAS

L'intensité d'Arias, AI, est un paramètre de mouvement du sol qui est utilisé pour évaluer le potentiel de dommages. Il est défini comme suit:

$$AI = \frac{\pi}{2g} \int_0^T a^2(t) dt$$

où $a(t)$ est l'évolution temporelle d'une accélération d'une durée totale T. L'intensité Arias peut quantifier l'énergie dans l'accélérogramme.

Une représentation Husid est une représentation graphique de l'accumulation de l'IA en fonction que l'on peut voir dans la figure 2-7. Il indique à la fois la quantité totale d'énergie entraînée par le séisme et la vitesse avec laquelle sont excitées les structures.

Le niveau de dommage produit par un mouvement du sol dépendra à la fois de la quantité totale d'énergie et de la vitesse dont cette énergie découle (Bommer, 2001).

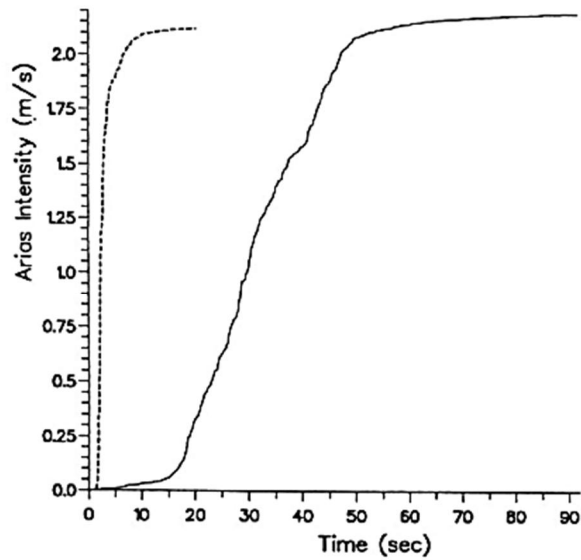


Figure 2-7 Une représentation Husid de deux accélérations enregistrées lors deux tremblements de terre à San Salvador 1982 et 1986 (The Seismic Design Handbook, 2001).

2.4.4 RACINE CARRE MOYENNE DE L'ACCELERATION –RMS-

Un autre paramètre qui peut être utilisé pour estimer le potentiel d'endommagement est la RMS qui est définie comme l'intégrale du carré de l'accélération du sol, ce qui peut être apparenté à une mesure de la capacité en énergie du tremblement de terre. Néanmoins, un mouvement fort du sol à courte durée pourrait avoir la même valeur de RMS qu'un mouvement du sol plus faible à très longue durée.

$$a_{rms}^2 = \frac{1}{(t_2 - t_1)^2} \int_{t_1}^{t_2} a^2(t) dt$$

où $(t_2 - t_1)$ désigne la durée significative comme celle définie par Trifunac et Brady (1975) $t_2 - t_1$ correspond à $t_{95} - t_5$.

Figure 2.7 montre la racine carrée moyenne de l'accélération RMS pour quatre différents accélérogrammes du tremblement de terre de San Fernando 1971.

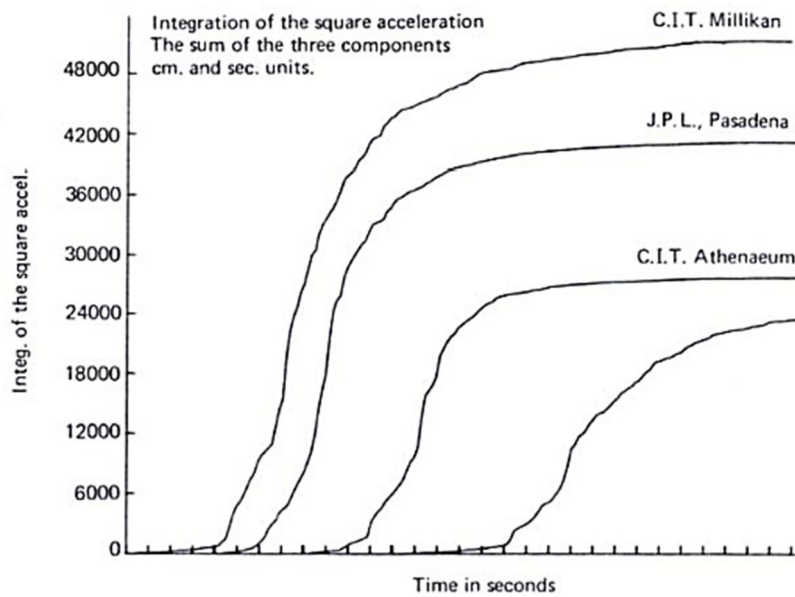


Figure 2-7 Représentation du RMS de quatre Accélérations du tremblement de terre 1971 (The seismic Design Handbook, 2001)

2.4.5 VITESSE ABSOLUE CUMULEE

La vitesse absolue cumulée (CAV), est défini comme l'intégrale de l'accélération absolue, elle est représentée mathématiquement par l'équation

$$CAV = \int_0^{t_{max}} |a(t)| dt$$

Où $|a(t)|$ est la valeur absolue de l'accélération à l'instant t et t_{max} est la durée totale. Bien que nommée vitesse absolue cumulée, le CAV n'est pas directement liée à la vitesse d'un séisme, même si elle a la dimension d'une vitesse. Il est évident à partir de la définition de CAV que sa valeur augmente avec le temps jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale à t_{max} . Par conséquent, la CAV comprend des effets cumulatifs de la durée du mouvement du sol. Ceci est un avantage clé que la CAV possède par rapport aux valeurs maximale, ce qui a poussé EPRI (1988) de considérer cette mesure la mieux adaptée pour corrélérer le niveau de dommages

2.4.6 CONTENU FREQUENTIEL

Le contenu fréquentiel peut être examiné en transformant le mouvement du domaine temporel au domaine des fréquences par l'intermédiaire d'une transformée de Fourier. Le spectre d'amplitude de Fourier et la densité spectrale de puissance, qui sont basés sur cette transformation, peuvent être utilisés pour caractériser le contenu en fréquences. Ils sont brièvement décrits ci-dessous:

2.4.6.1 Le spectre d'amplitude de Fourier

.La transformée de Fourier d'un accélérogramme $a(t)$ est obtenu par l'intégrale suivante :

$$F(\omega) = \int_0^T a(t) e^{i\omega t} dt$$

Où T est la durée de l'accélérogramme. Le spectre d'amplitude de Fourier est défini comme la racine carrée de la somme des carrés des parties réelle et imaginaire de F (ω).

Ainsi, le spectre d'amplitude de Fourier :

$$FS(\omega) = \sqrt{\left[\int_0^T a(t) \sin \omega t dt \right]^2 + \left[\int_0^T a(t) \cos \omega t dt \right]^2}$$

Le spectre d'amplitude de Fourier est intéressant pour les sismologues afin de caractériser le mouvement du sol. La figure 2-9 montre un spectre typique d'amplitude de Fourier pour la composante S00E de El Centro, le tremblement de terre Imperial Valley du 18 mai 1940. La figure indique que la plupart de l'énergie contenue dans l'accélérogramme est dans la gamme de fréquences de 0,1 à 10 Hz, et que la plus grande amplitude est à une fréquence de 1,5 Hz environ.

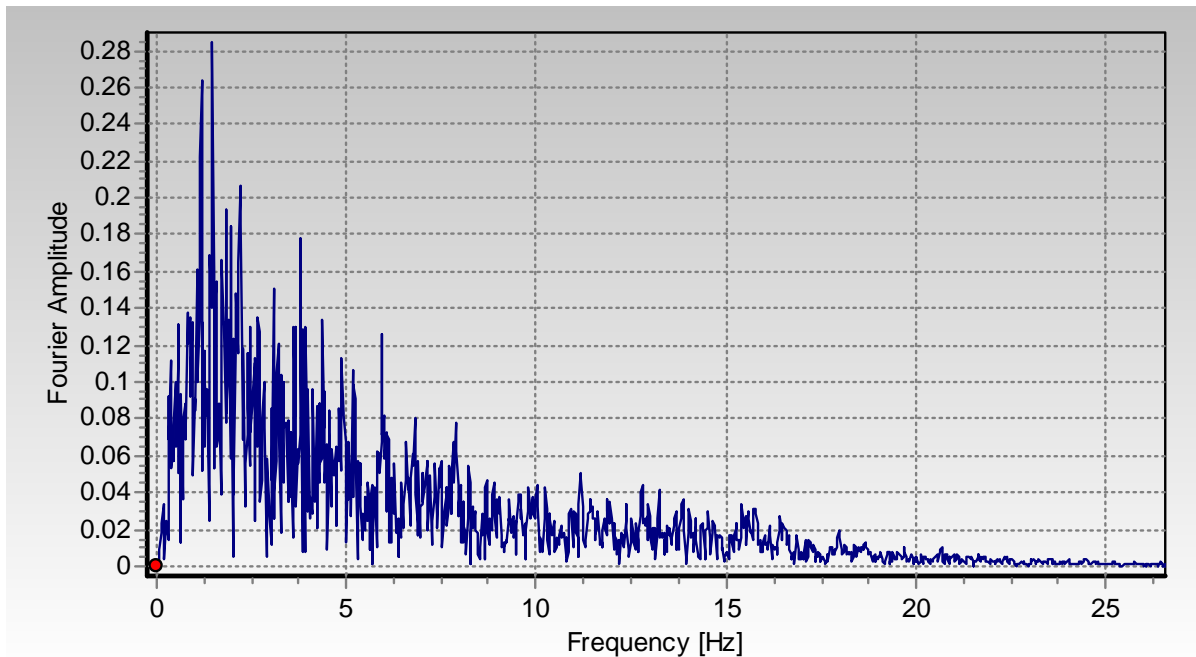


Figure 2-9 Spectre de Fourier du tremblement de terre El Centro.

2.4.6.2 La densité spectrale de puissance

L'analyse spectrale d'un signal consiste à calculer la quantité d'énergie (ou de puissance) contenue dans les différentes composantes fréquentielles du signal. Pour cela, on associe au signal $a(t)$ une fonction définie dans le domaine fréquentiel appelée densité spectrale d'énergie (DSE) ou de puissance (DSP) suivant la nature de $a(t)$. Cette grandeur notée par $S(\omega)$ mesure la quantité d'énergie (respectivement de puissance) entraînée par $a(t)$ dans une gamme de fréquence.

Le séisme est un phénomène imprévisible dont la modélisation est complexe, la complexité vient du fait que c'est de l'aléatoire. Le séisme est caractérisé par des variables aléatoires dont l'accélération et sa fonction d'autocorrélation $R(\tau)$ qui est définie par l'expression suivante :

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t)a^*(t - \tau)dt$$

La densité spectrale de puissance d'un signal est la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation :

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int R(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau$$

La densité spectrale de puissance d'un processus aléatoire peut être calculée à partir de la transformée de Fourier.

$$S(\omega) = \frac{1}{T\pi} |F(\omega)|^2$$

La Densité Spectrale de Puissance est utilisée dans une analyse dynamique des structures dans le cas des vibrations aléatoires car on peut connaître le maximum de la réponse d'un oscillateur. Une densité spectrale de puissance peut être utilisée pour constituer un spectre de réponse compatible avec celle-là.

Tout comme la transformée de Fourier, la DSP est aussi utilisée pour connaître le contenu fréquentiel d'une secousse sismique cela veut dire représenter des accélérogrammes dans un domaine fréquentiel.

Lorsqu'un signal n'est pas déterministe, on se limite à une certaine durée d'observation, en essayant de la prendre telle que l'on ait toutes les variations possibles du signal. La notion de densité spectrale d'un signal déterministe est alors remplacée par celle de la moyenne des densités spectrales obtenues sur plusieurs intervalles d'observations. On obtient alors un périodogramme.

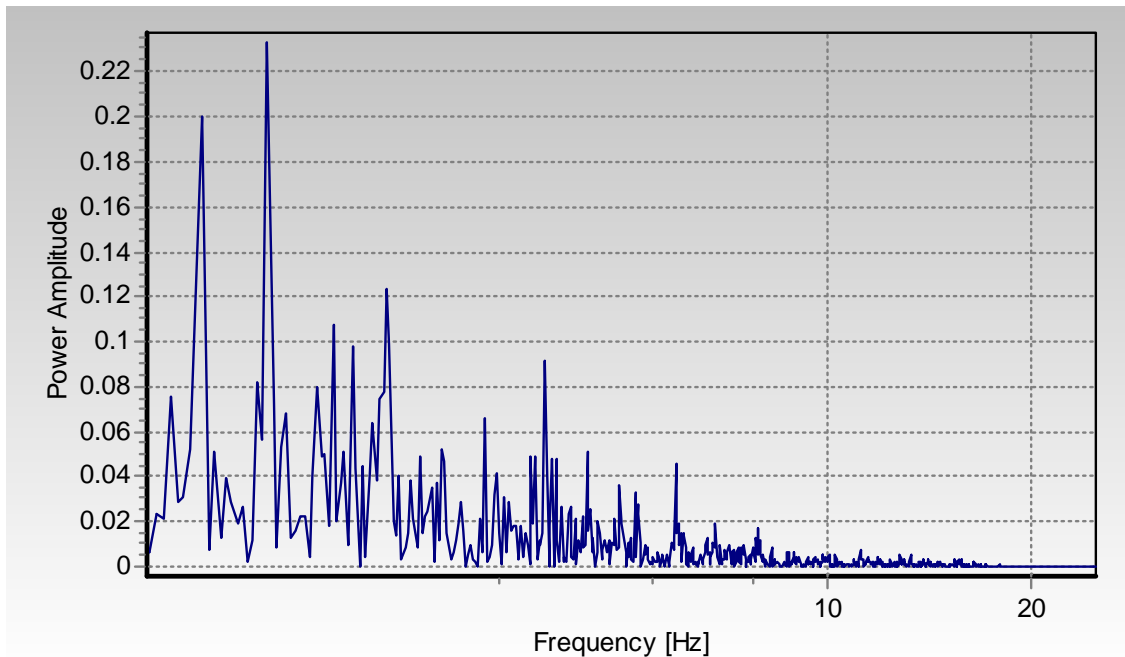


Figure 2-10 Densité Spectrale de Puissance du tremblement de terre El Centro.

2.4.6.3 LA DENSITÉ SPECTRALE DE PUISSANCE EMPIRIQUE

a. La densité spectrale de puissance de Kanai et Tajimi

La densité spectrale de puissance d'une accélération peut être aussi représentée par la forme proposée par Kanai (1957) et Tajimi (1960) laquelle est obtenue à partir d'un bruit blanc.

$$S(\omega) = \frac{1+4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2}{[1-(\omega/\omega_g)^2]^2+(2\xi_g\omega/\omega_g)^2} S_0$$

Les paramètres de Kanai-Tajimi ξ_g, ω_g, S_0 reflètent respectivement l'amortissement, pulsation et l'intensité du sol. Ces paramètres sont calculé par (en assimilant) *rms* de l'accélération, la fréquence centrale, et le facteur de forme.

Le Tableau 2-3 donne les valeurs de ξ_g, ω_g, S_0 pour des différentes conditions de sol (elghadamsi et al.). Les figures 2-11 et 2-12 montrent des DSP calculées à partir de la formule de Kanai-Tajimi. A partir des figures on peut remarquer que plus le sol devient rigide, moins est l'intensité de la fréquence prédominante et aussi une plus grande gamme de fréquences. Cette observation met en évidence l'influence des conditions de site sur le contenu de fréquence des excitations sismiques. Comparés à ceux du mouvement vertical, les pics du de la DSP du mouvement horizontal sont beaucoup plus prononcés. En conséquence, le mouvement vertical recouvre une gamme de fréquence plus étendue que celle recouverte par le mouvement horizontal.

Catégorie du site	Nbre d'enregistrements	Fréquence Centrale f_c (Hz)	Facteur de Forme δ	Fréquence du sol (Hz)	Amortissement du sol ξ_g	Intensité du Sol
Horizontale						
Alluvions	161	4.10	0.65	2.92	0.34	0.102
Alluvion sur roche	60	4.58	0.59	3.64	0.30	0.078
Roche	26	5.41	0.59	4.30	0.34	0.070
Vertical						
Alluvions	78	6.27	0.63	4.17	0.46	0.080
Alluvion sur roche	29	6.68	0.62	4.63	0.46	0.072
Roche	13	7.53	0.55	6.18	0.46	0.053

Tableau 2-3 Les Constantes spectrales de Kanai Tajimi [The seismic Design Handbook, 2001]

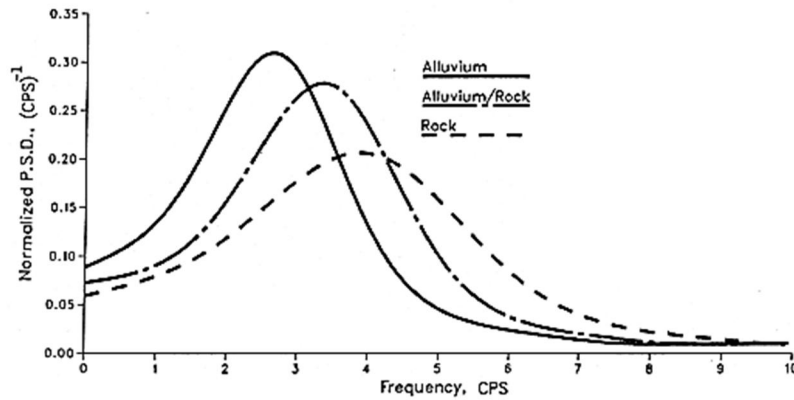


Figure 2-11 Densités spectrales de Puissance pour un mouvement horizontale [The seismic Design Handbook, 2001]

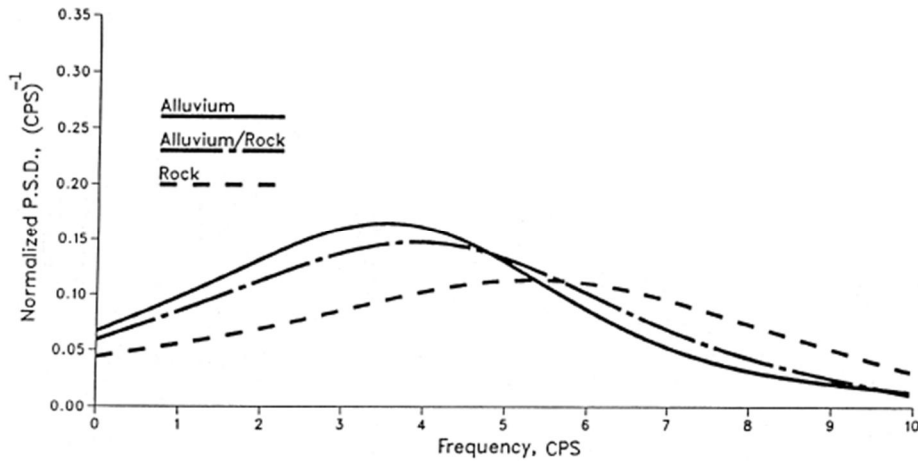


Figure 2-12 Densités spectrales de Puissance pour un mouvement vertical [The seismic Design Handbook, 2001]

b. La densité spectrale de puissance de Clough and Penzien

Clough et Penzien modifièrent la DSP de Kanai-Tajimi en introduisant un autre filtre pour tenir compte des difficultés numériques attendues au voisinage de $\omega=0$. Afin d'obtenir la DSP de la vitesse et du déplacement, la formule proposé par Kanai-Tajimi doit être divisée par ω^2 et ω^4 respectivement ; ce qui est à l'origine des problèmes au voisinage de 0. Les singularités rencontrées près du zéro peuvent être éliminées par le passage à travers un autre filtre qui atténuera les basses fréquences. La nouvelle écriture prend la forme suivante :

$$S(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + (2\xi_g\omega/\omega_g)^2} \times \frac{(\omega/\omega_1)^2}{[1 - (\omega/\omega_1)^2]^2 + 4\xi_1^2(\omega/\omega_1)^2} S_0$$

Où ω_1 et ξ_1 sont respectivement la fréquence et l'amortisseur du filtre.

2.4.6.4 LA DENSITE SPECTRALE DE PUISSANCE EVOLUTIVE

Plusieurs études (Elghadamsi, F et al (1988), Moayyad, P et al (1982)) ont démontré qu'un accélérogramme peut être divisé en plusieurs segments, chacun de ces segments représente un processus local aléatoire stationnaire. Suite à cela, la DSP peut être présentée sous une forme de dépendance temporelle et fréquentielle $S(t, \omega)$.

$$S(t, \omega) = A(t) * S(\omega)$$

On trouve, dans la littérature, plusieurs formes théoriques pour le terme temporel de la densité spectrale évolutive entre autres celle de Cacciola et al qui propose la décomposition suivante de la densité spectrale de puissance évolutive :

$$S(\omega, t) = |A(\omega, t)|^2 S(\omega)$$

avec $|A(\omega, t)|^2 = t^\gamma e^{-\alpha(\omega)t}$

$$\alpha(\omega) = \alpha_0 + \alpha_1 \omega + \alpha_2 \omega^2$$

Où $\gamma, \alpha_0, \alpha_1, et \alpha_2$ sont des paramètres d'ajustement

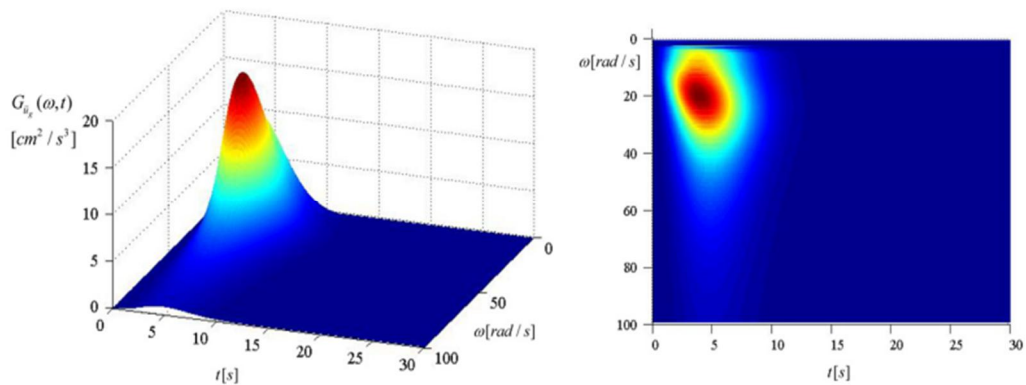


Figure 2-13 Densité spectrale de puissance évolutive du modèle de Clough-Penzien [Cacciola et al (2012)]

Tout comme la densité spectrale de puissance, la densité évolutive (DSPE) peut être obtenue à partir d'une évolution temporelle d'accélération. Karmakar et al (2012) ont donné deux approches pour l'évaluation de la densité spectrale de puissance évolutive. La première, est comme Liang et al l'ont suggéré, de calculer la DSPE à partir de la transformée de Fourier à temps court STFT (Short time Fourier Transform). La deuxième approche est de générer la DSPE d'un signal d'accélération donné en utilisant la transformée d'ondelette (Wavelet Transform). (Lia et al (2007), Daubechies (1992))

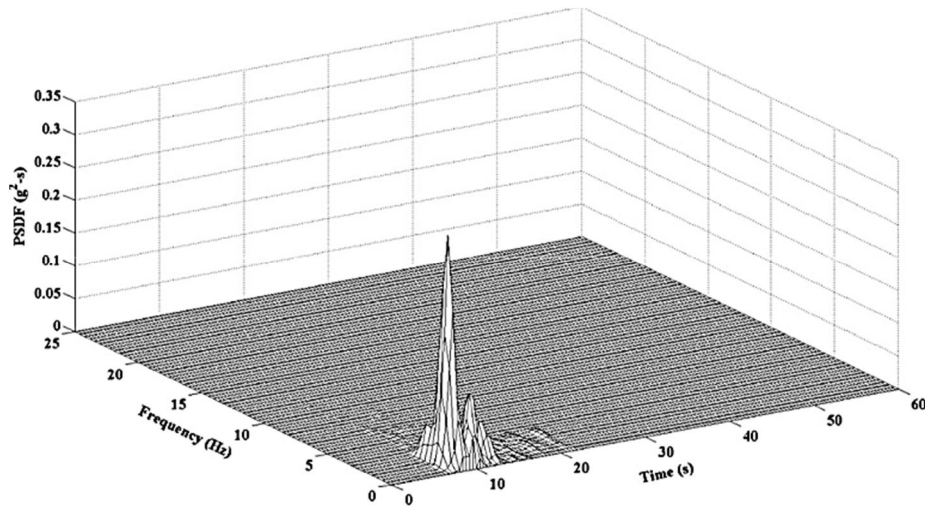


Figure 2-14 Densité spectrale de puissance évolutive obtenue à partir de la STFT du signal LA21 Karmakar et al (2012)

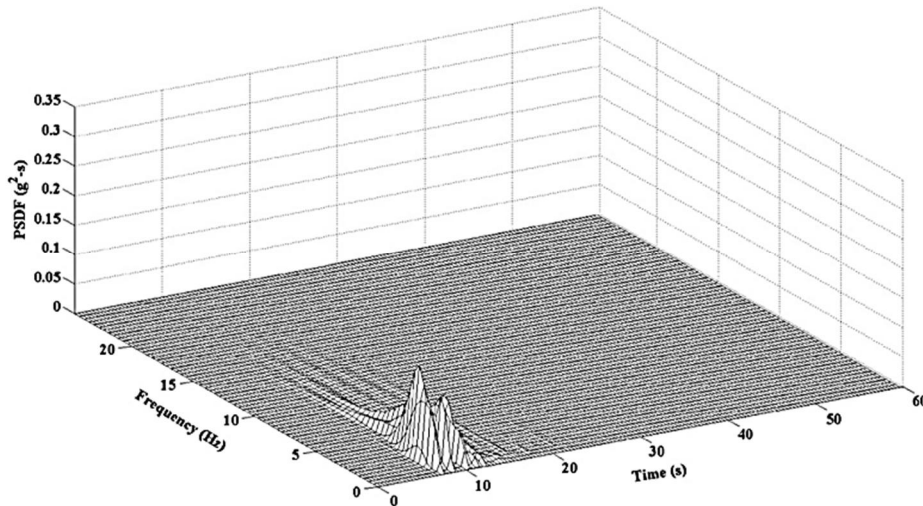


Figure 2-15 Densité spectrale de puissance évolutive obtenue à partir de la WT du signal LA21 Karmakar et al (2012)

Les deux figures 2-14 et 2-15 montrent deux DSPE, calculées par les deux approches citées précédemment, d'un même signal d'accélération (LA21 est un signal d'accélération obtenu par ajustement de l'accélération de tremblement de terre de KOBE (1995), FEMA/SAC /http://nisee.berkeley.edu/data/strong_motion/sacsteel/ground_motions.html; (1997).). Les deux approches ne donnent pas les mêmes résultats et on remarque quelques disparités dans l'évaluation de l'amplitude de la DSPE mais donne le même contenu fréquentielle.

2.4.7 SPECTRES DE REPONSE

Dans la pratique, l'ingénieur de construction n'a besoin que de la réponse maximale pour dimensionner sa structure. Pour faciliter sa tâche, on introduit la notion de spectre de réponse. Le spectre de réponses est un outil très important lors d'une analyse sismique ou pour la conception des structures et les équipements. A la différence de la densité spectrale de puissance laquelle donne des informations sur le contenu énergétique et fréquentiel d'un séisme, les spectres de réponses exposent les maximums des réponses des structures soumises à un tremblement de terre. Les spectres de réponses introduits par Biot (1941) et Housner (1941) décrivent le maximum de la réponse d'un oscillateur amorti d'un seul degré de liberté (SDOF) à différentes périodes.

Une représentation schématique du calcul du spectre de déplacement pour la composante nord-sud de la motion enregistré à El Centro, sur le 18 mai 1940 a été présentée par Chopra (1981) et est illustrée à la figure 2-16.

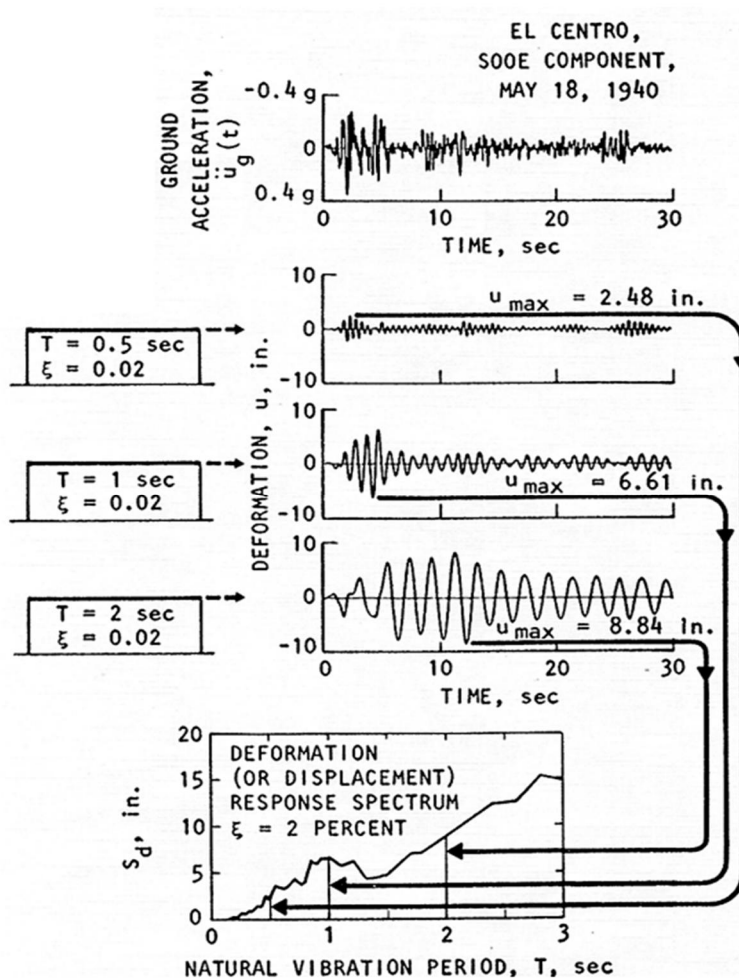


Figure 2-16 Procédure de calcul du spectre de réponse à partir de l'accélération selon Chopra (1981)

2.5 CONCLUSION

Les évolutions temporelles des accélérations sont considérées comme une mine riche d'informations très utiles pour la classification des tremblements de terre, la quantification du potentiel de risque qu'encourent les structures lors d'un séisme et aussi pour être une base pour l'établissement de code parasismique.

Les paramètres des tremblements de terre peuvent être basés sur l'accélération comme : le pic maximal de l'accélération (PGA), Intensité d'Arias (AI), Durée Trifunac et vitesse absolue cumulé (CAV) ; les autres paramètres sont basé sur la vitesse du mouvement sismique on peut citer bien évidemment le pic maximale de la vitesse (PGV).

L'autre particularité des tremblements des terres, qui a été observé à travers les enregistrements réels, est la variabilité spatiale des ondes sismiques. Il a été déjà démontré l'importance de prendre en compte cette variabilité lors de la conception des ouvrages

CHAPITRE

3 INTRODUCTION A LA VARIABILITE SPATIALE DES SIGNAUX SISMIQUE

3.1 INTRODUCTION

En 1979, lors d'une étude exposée lors d'un workshop à Hawaï (IWAN 1979), il a été démontré qu'un tremblement de terre peut être significativement variable dans l'espace. De cette étude a découlé une suggestion qui est le déploiement de certain nombre de réseau dense de stations d'enregistrements dans des régions spécifiques comme la Californie, Taiwan et le Japon. Après cela, l'étude de la variabilité spatiale a acquis une nouvelle dimension quand une grande quantité d'accéléromètres ont été installés à différentes places. L'un des plus importants et surtout le plus influent des réseaux implantés était SMART-1-, qui était la base de plusieurs recherches autour de la description de la variabilité spatiale. Par conséquent l'excitation sismique qui sollicite une structure peut différer d'un support à un autre en termes d'amplitude, phase et contenu fréquentiel.

C'est une pratique très courante, lors d'une analyse dynamique, de considérer que toutes les fondations d'une structure sont soumises simultanément à une identique évolution temporelle d'accélération. Implicitement, c'est comme si on admettait les hypothèses suivantes: (a) les ondes sismiques ont une vitesse infinie, (b) les ondes se propagent à travers un milieu (le sol) homogène d'une profondeur infinie et (c) les caractéristiques géotechniques du sol sont les mêmes pour tous les supports. La plupart des bâtiments ont des dimensions

structurelles qui permettent l'utilisation de ces hypothèses sans introduire une erreur importante. Cependant, certaines structures peuvent être très étendues et l'utilisation de ces hypothèses peut entraîner une erreur significative dans l'estimation de leur réponse structurelle.

3.2 . CAUSES DE LA VARIABILITE SPATIALE DES ONDES SISMIQUES

Il est généralement admis que la variabilité spatiale des ondes sismiques est principalement due aux causes suivantes [Saxena (2000), Sextos et al (2003)]:

1) **Effet de passage d'onde**, due à la différence de temps d'arrivée de l'onde sismique aux différents points,

2) **Effet d'incohérence** ou de la **perte de cohérence** de l'onde sismique pour raison des multiples réflexions, réfractions et / ou de superposition de l'onde qui se propage à travers un sol hétérogène,

3) **Effet de site local**, à cause de la variation de l'amplitude, du contenu fréquentiel et/ou de la vitesse de propagation de l'onde sismique lorsqu'elle rencontre des changements dans le type de sol et,

4) **Effet d'atténuation du mouvement**, du fait de la propagation géométrique du front d'onde et la perte d'énergie cinétique, qui est une fonction de la distance à l'épicentre.

L'effet d'atténuation du mouvement peut être écarté si l'on considère le fait que les dimensions de la structure sont généralement de petite taille par rapport à la distance épacentrale, ce qui implique que tous les supports sont pratiquement à égale distance de l'épicentre.

Les effets de passage d'onde peuvent être pris en compte par une fonction déterministe correctement dérivée qui induit un décalage de phase. Le décalage de phase correspond à la différence de temps d'arrivée des ondes à chaque emplacement de support et il dépend de la vitesse de propagation des ondes et la distance entre les piliers.

L'effet d'incohérence peut s'expliquer plus facilement en utilisant une approche stochastique, où les ondes sismiques sont modélisées comme des processus stochastiques [Shinozuka (1972, 1988), Deodatis (1996)]. L'effet d'incohérence peut alors être décrit par une fonction stochastique, généralement connue comme fonction de cohérence, qui représente le degré de corrélation des évolutions temporelles des accélérations entre deux points voisins. Beaucoup de fonctions de cohérence sont disponibles dans la littérature [Harichandran et Vanmarke (1986), Luco et Wong (1986), Abrahamson et al (1991)] et certaines ont été obtenues à partir de modèles stochastiques analytiques, mais la plupart d'entre elles ont une

base empirique et ont été calculées à partir de l'étude des données enregistrées dans les réseaux (principalement le réseau SMART-1 fig3-1). Les fonctions de cohérence empiriques sont dépendantes du site et de l'événement sismique, car elles sont tirées des données d'un réseau dense spécifique en utilisant un événement sismique particulier. Certaines fonctions de cohérence empiriques ont démontré avoir une gamme d'applications plus large lorsque leur validité a été vérifiée dans d'autres réseaux, ou dans le même réseau mais avec d'autres événements sismiques.

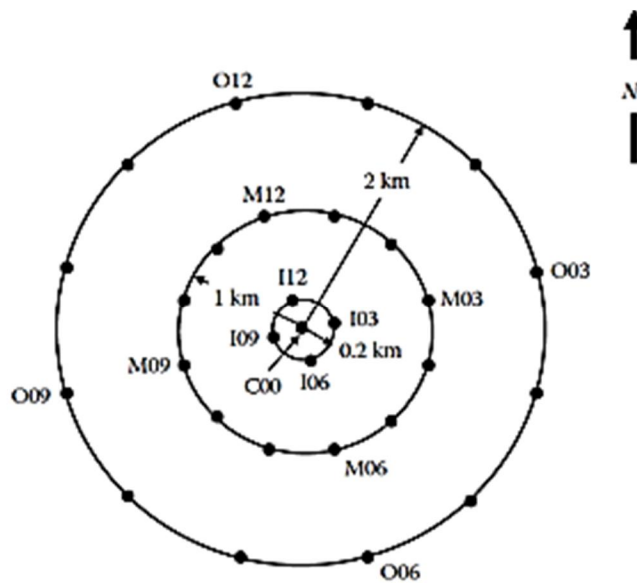


Figure 3-1 Réseau SMART 1 TAIWAN

Actuellement, les fonctions de cohérence ne sont pas directement associées à une compréhension conceptuelle d'un mécanisme physique particulier qui entraîne une perte de cohérence de l'onde. Elles sont tout simplement un rapport de paramètres pratiques qui semblent modéliser de manière appropriée les effets d'incohérence. Par conséquent, le choix d'une fonction de cohérence particulière est principalement basé sur la préférence personnelle, mais on peut s'attendre à des différences dans les processus stochastiques générés quand on utilise différentes fonction. Il est recommandé d'utiliser les fonctions de cohérence qui se sont avérées avoir un comportement fiable et cohérent pour un site donné

Les fonctions de cohérence analytiques ne sont pas basées sur les enregistrements réel au sein d'un réseau et sont donc, en principe, indépendantes de l'emplacement du réseau et de l'événement sismique. Ces fonctions peuvent être des alternatives intéressantes lorsque l'utilisation des fonctions de cohérence empiriques est discutable sur un site particulier.

3.3 MESURE DE LA VARIABILITE SPATIALE

L'analyse des enregistrements temporels des accéléromètres des réseaux de stations situés partout dans le monde ont montré que les mouvements sismiques peuvent varier considérablement en amplitude, phase et contenu fréquentiel à des distances comparables aux dimensions de certains ouvrages de génie civil.

Un des réseaux qui a été largement utilisé pour étudier la variation spatiale des ondes sismiques est le réseau- Taiwan-Phase 1 (SMART 1), situé à Lotung, dans le nord de Taiwan.

La figure 3-1 montre la distribution des stations d'enregistrements dans ce réseau. Le réseau SMART-1 est formé par trois cercles concentriques ayant douze équidistants accéléromètres, et un situé en plein centre. La dénomination des stations dans le cercle avec le plus grand diamètre se fait par la lettre O (de la station O01 à la station O12), pour le deuxième cercle du milieu, toutes les stations commence par la lettre M (de M01 à M12), et la lettre I pour le dernier cercle intérieur (de I01 à I12).

La figure 3.2 montre quelques enregistrements à différents endroits du réseau SMART 1 lors d'un tremblement de terre. La direction épiscopentrale du tremblement de terre a pratiquement coïncidé avec le diamètre passant par les stations O06 O12 et, donc, les ondes sismiques se propageaient dans le sens Nord-Sud. La preuve de la variabilité spatiale des ondes sismiques peut être clairement observée dans les différences de phase (décalage horizontal des pics), d'amplitude et de contenu fréquentiel (nombre de pics dans un intervalle de temps donné). En outre, de telles variations sont observées comme une fonction de la distance qui existe entre les accéléromètres. Par exemple, sur la figure 3-2, où la distance entre les accéléromètres ne dépasse pas 0,2 km, ces différences se révèlent être relativement petite. Cependant, sur la figure 3-3, où la distance entre les accéléromètres augmente à 1 km, des différences significatives entre les enregistrements peuvent être observées. Comme de nombreux ouvrages d'art longs, comme les ponts et les pipelines, peuvent dépasser 1 km de long, la variabilité de l'excitation sismique doit être prise en compte lors de l'analyse dynamique.

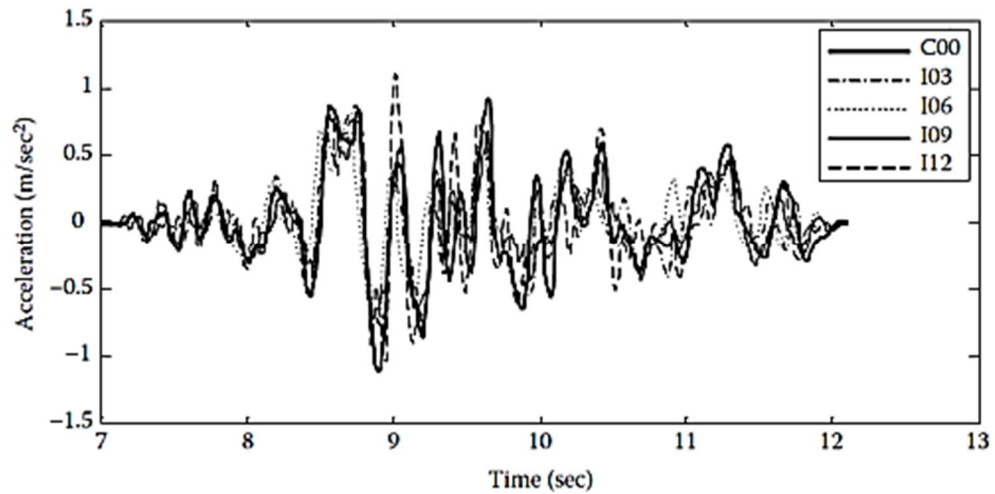


Figure 3-2 Comparaison des signaux enregistrés sur le cercle intérieur avec la station C00 SMART 1 (Zerva (2009))

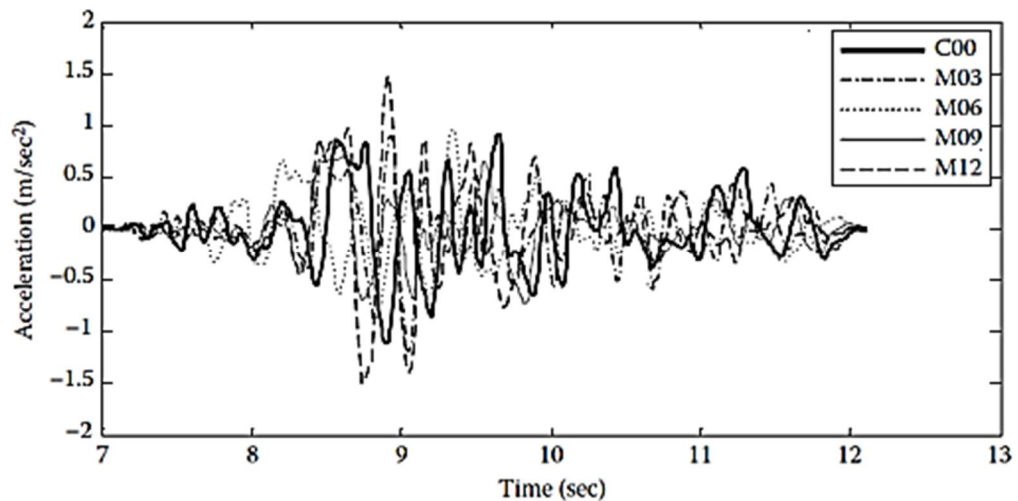


Figure 3-3 Comparaison des signaux enregistrés sur le cercle du milieu avec la station C00 SMART 1 (Zerva (2009))

Les effets de passage d'onde, d'incohérence et de site local peuvent être illustrés par un exemple simple. La figure 3.5 montre trois signaux temporels d'accélération correspondants à trois points sur le trajet d'une onde se propageant à 1000 mètres / seconde. Chaque point est supposé situé sur différents types de profondeur infinie du sol pour tenir compte des effets de site local (c'est à dire les variations des propriétés de type de sol sont supposées n'intervenir que dans la direction de propagation de l'onde et pas avec la profondeur). La distance entre les trois points est clairement indiquée dans la Figure 3. 5. Le profil mécanique de chaque type de sol est représenté par les spectres de réponses réglementaires sur la Figure3.4

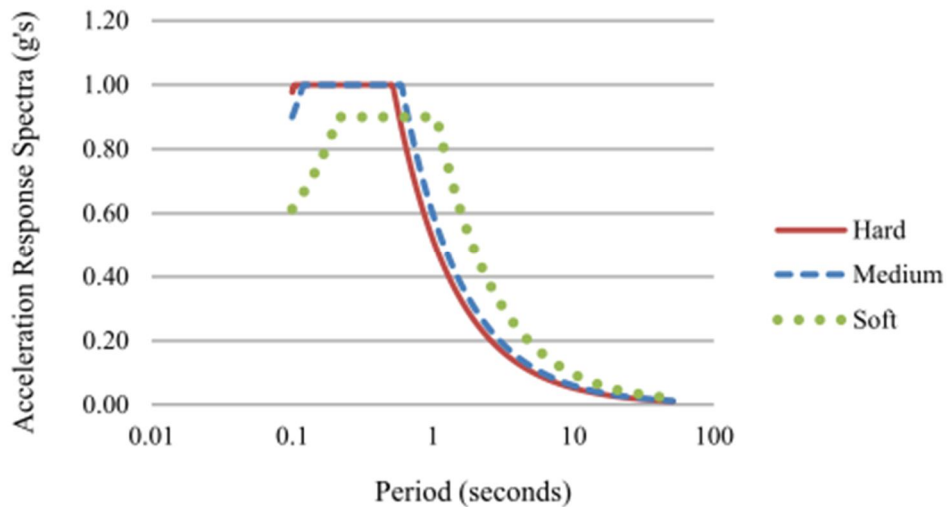


Figure 3-4 Spectres Règlementaires correspondant à différents profils de sols selon IBC, 2009. (E.Carlos, 2011).

La fonction déterministe qui reproduit l'effet de passage d'onde génère un décalage horizontal dans le temps du pic A de la figure 3.6 et cela est tout à fait compatible avec le fait que l'onde arrive en premier au point 1 et en dernier au point 3. Les variations de l'amplitude et du contenu fréquentiel sont en accord avec la nature du sol sous chaque point, comme décrit par les spectres de réponse correspondants. Le degré de corrélation est clairement visible dans les similitudes présentées par les trois évolutions temporelles, ce qui explique le fait que l'effet de l'incohérence est faible car les points sont séparés par des distances relativement courtes.

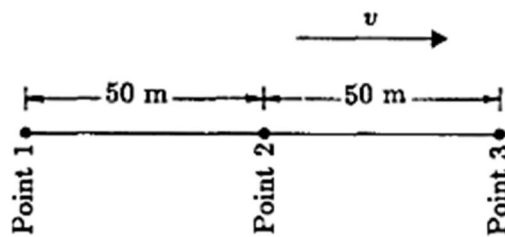


Figure 3-5 Emplacement des points et la direction de propagation d'onde

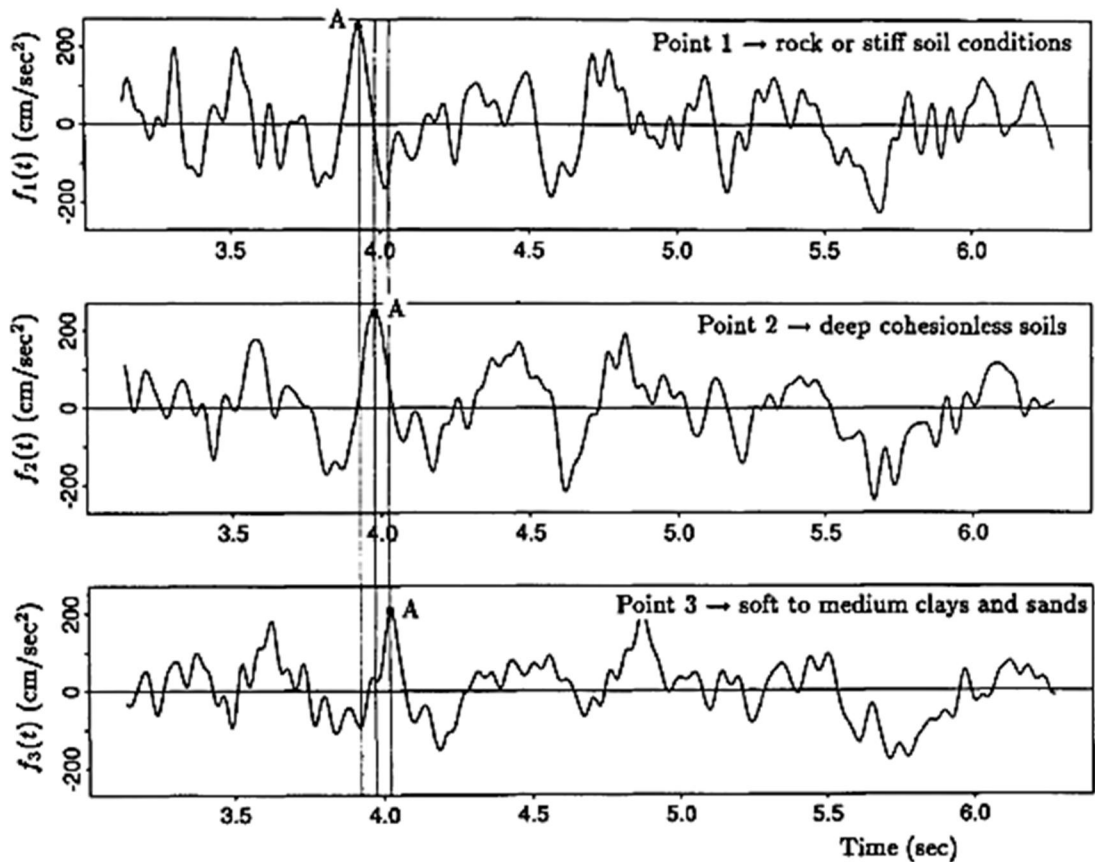


Figure 3-6 Observation de la variabilité spatiale des signaux sismiques

3.4 FONCTION DE COHERENCE

Soient deux processus discrets aléatoire centrés $x(n)$ et $y(n)$. Le carré du module de la fonction de cohérence (MFC) entre ces deux processus est définie par

$$MFC = |\gamma_{xy}(f)|^2 = \frac{S_{xy}(f)S_{yx}(f)}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}$$

Où $S_{xx}(f)$ et $S_{yy}(f)$ représentent les densités spectrales DSP de $x(n)$ et $y(n)$ respectivement et $S_{xy}(f)$ et $S_{yx}(f)$ représentent leurs inter-densités spectrales. Le module de la fonction de cohérence est une quantité utile qui donne une mesure de similarité en fréquence existant entre deux séries temporelles $x(n)$ et $y(n)$.

La fonction de cohérence a de nombreuses applications dans le traitement du signal : dans la mesure du rapport signal sur le bruit, dans l'estimation de la relation linéaire entre deux processus, ou dans les méthodes de soustraction de bruit. Une manière classique

d'estimer cette cohérence est de calculer les DSP des signaux par la méthode des transformées de Fourier rapides.

Les Fonctions de cohérence sont d'une importance fondamentale dans la modélisation de la variabilité spatiale des excitations sismiques car elles expriment la corrélation qui il peut y avoir entre les enregistrements entre les stations voisines. Les effets de passage d'ondes et l'incohérence sont généralement intégrés dans une expression appelée la fonction de cohérence complexe qui est donné par l'expression suivante:

$$\Gamma_{jk}(\omega) = \gamma_{jk}(\omega) \exp\left(\frac{-i\omega\zeta}{v}\right)$$

Où : $\gamma_{jk}(\omega)$ Fonction de cohérence entre deux stations j et k ;

$\exp\left(\frac{-i\omega\zeta}{v}\right)$ Le terme complexe reflétant l'effet de passage d'onde ;

v Vitesse apparente d'onde ;

ζ La distance entre la station j et la station k ;

ω Fréquence en rad/sec ;

Et $i = \sqrt{-1}$.

La vitesse de propagation des ondes v est généralement donnée en terme de vitesse des ondes S (Shear wave) et son intensité dépendra des caractéristiques du milieu à travers lequel elle se propage.

Plusieurs expressions pour la fonction de cohérence, qu'elle soit empirique ou analytique, sont disponibles dans la littérature. Zerva (2009) a regroupé certaines de ces fonctions.

3.4.1 FONCTIONS DE COHERENCE EMPIRIQUES

Les fonctions de cohérence empiriques sont générées à partir de l'analyse et du traitement des données d'historiques des enregistrements d'un réseau dense. Etant donné que différents chercheurs utilisent différentes techniques de traitement, les expressions des fonctions de cohérence sont en général différentes même lorsque les mêmes accélérogrammes d'un réseau sont utilisés.

a. Fonction de Cohérence H&V (Harichandran and Vanmarke)

La fonction de cohérence HV était développée par Harichandran et Vanmarke (1986) et ce par l'analyse et le traitement des enregistrements du réseau SMART-1, et c'est l'une des fonctions empiriques les plus utilisées. L'expression de la fonction HV est donnée comme suit :

$$\gamma_{jk}(f) = A \exp\left(-\frac{2B\zeta}{av(f)}\right) + (1 - A) \exp\left(-\frac{2B\zeta}{v(f)}\right)$$

$$\text{Avec : } v(f) = \kappa \left[1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^b\right]^{-1/2}$$

$$B = (1 - A + \delta A)$$

ζ : C'est la distance entre les stations j et k

$A, \delta, b, \kappa, f_0$: sont des paramètres spécifique d'un évènement sismique.

En prenant par exemple, dans la base de données du réseau SMART-1, l'évènement prénommé "Event 20", les valeurs des paramètres spécifiques sont :

$$A = 0.736, \quad \delta = 0.147, \kappa = 5210, f_0 = 1.09 \text{ Hz et } b = 2.78$$

Dans la figure 3-7 on peut voir la représentation de la fonction de cohérence HV en utilisant les valeurs données ci-dessus. On peut déceler facilement que pour une fréquence donnée la valeur de la fonction de cohérence est plus grande quand les stations sont rapprochées les unes des autres, et vice versa. Aussi, quelle que soit la distance entre les stations, la cohérence est plus faible dans la plage des hautes fréquences. L'inconvénient de cette fonction de cohérence est qu'elle ne permet pas de prédire entièrement la cohérence des accélérogrammes au voisinage des fréquences nulles. Cela peut entraîner des erreurs dans la prédiction de l'effet d'incohérence dans les basses fréquences. Puisque, quelques sols mous peuvent avoir des fréquences fondamentales faibles, l'erreur de prédiction sera probablement transmise à la réponse structurale des ponts qui ont des sols d'assises mous.

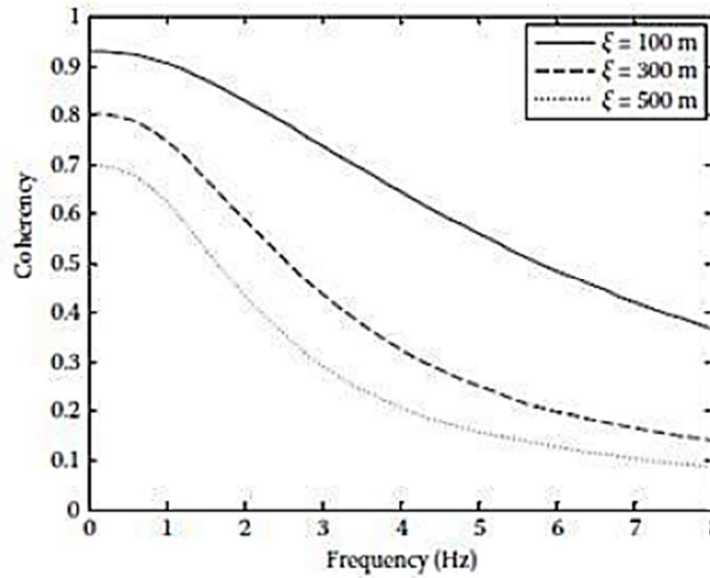


Figure 3-7 Variation de la fonction de cohérence HV (E. Carlos, 2011)

b. Fonction de cohérence d'Abrahamson

Abrahamson et al (1991) proposèrent une fonction de cohérence empirique en utilisant une analyse non linéaire régressive des évènements enregistrés du réseau SMART-1. Ils trouvèrent que leur fonction est compatible aux résultats obtenus de l'évaluation de la cohérence calculée dans le réseau EPRI Parkway (Parkway valley, Wainuiomata, New Zealand), qui a démontré une certaine indépendance de leur fonction vis à vis les conditions du site et les évènements sismiques.

Abrahamson a rassemblé et intégré d'autres enregistrements temporels des sites d'autres réseaux et proposa une version plus raffinée de sa fonction de cohérence empirique. Sa fonction de cohérence pour les ondes se propageant à l'horizontale est donnée par l'expression suivante: ((E. Carlos, 2011)

$$\gamma_{jk}(\omega) = \tanh \left\{ \frac{c_1(\zeta)}{1 + \frac{c_2(\zeta)\omega}{2\pi} + c_4(\zeta)[\omega/2\pi]^2} + (4.8 - c_1(\zeta))\exp[c_3(\zeta)\omega/2\pi] + 0.35 \right\}$$

Avec : ζ : C'est la distance entre les stations j et k

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

$$c_2(\zeta) = \frac{0.4 \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{\zeta}{5} \right)^3 \right]^{-1} \right\}}{\left[1 + \left(\frac{\zeta}{190} \right)^8 \right] \left[1 + \left(\frac{\zeta}{180} \right)^3 \right]}$$

$$c_3(\zeta) = 3[\exp(-0.05\zeta) - 1] - 0.0018\zeta$$

$$c_4(\zeta) = -0.589 + 0.106 \ln(\zeta + 325) - 0.015 \exp(-0.06\zeta)$$

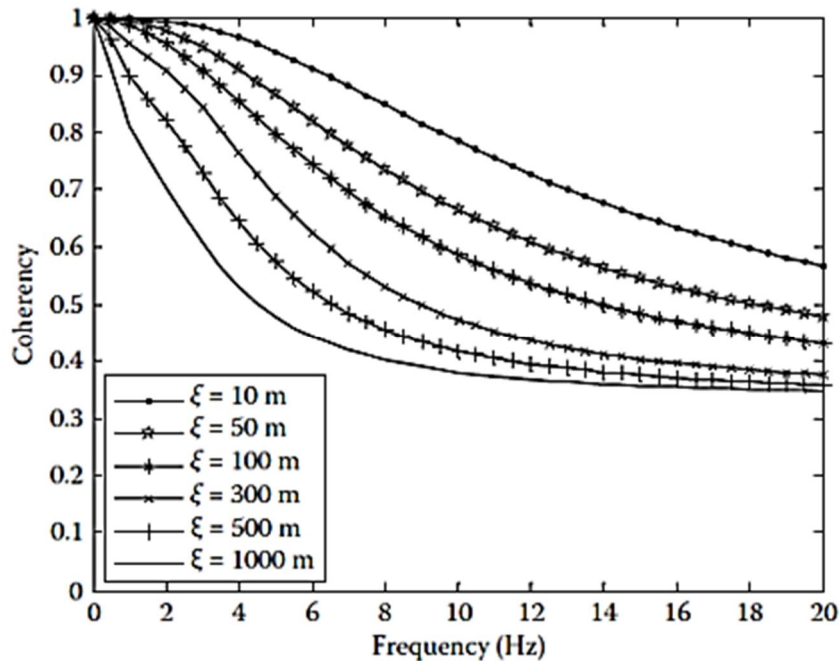


Figure 3-8 Variation de la fonction de Cohérence d'Abrahamson (E. Carlos, 2011)

Par la représentation de la fonction de cohérence d'Abrahamson dans la figure 3-8, on peut constater qu'une valeur unitaire de la cohérence est appliquée au niveau des basses fréquences qui apparaît dans la fonction de cohérence HV. La fonction de cohérence d'Abrahamson est considérée comme l'un des modèles les plus complets pour l'estimation de la propagation d'ondes à travers un sol, puisque il a été dérivé des accélérogrammes enregistrés sur des sites de sol. Mais aussi, le modèle montre des indépendances vis-à-vis des sites, puisque les enregistrements ont été obtenus de différents réseaux comme par EPRI LSST, EPRI Parkfield, Chiba, USGS Parkfield, El Centro Differential, Hollister Differential, Stanford, Coalinga, UCSG ZAYA, entre autres [Zerva (2009)]. En outre, Abrahamson a pris un soin particulier à séparer les termes de la fonction de cohérence des stations qui sont proche entre elles de celle qui sont éloignées. Ainsi, le modèle est autant applicable aux ouvrages étendus que pour les ouvrages rapprochés.

3.4.2 FONCTION DE COHERENCE ANALYTIQUE

Les fonctions de cohérence analytiques ont été développées à partir de la théorie stochastique des ondes et sont, indépendantes vis à vis les conditions de site. Ces fonctions de cohérence peuvent être subdivisées en fonctions semi-empiriques et purement analytiques. Les fonctions semi-empiriques ont une base analytique, mais peuvent être ajustées en fonction des données enregistrées. La plupart des fonctions de cohérence analytiques décrites dans la littérature entrent dans cette catégorie. Par exemple, DerKiureghian (1996) dérivait une fonction de cohérence semi-empirique de la théorie des processus aléatoires qui prend en compte les effets de passage d'onde, l'incohérence et les conditions locales du site. Laouami et Labbe (2001) développèrent une fonction de cohérence analytique en utilisant une combinaison de l'effet de propagation des ondes (composante cohérente) et un facteur aléatoire à moyenne nulle (effet d'incohérence). Le modèle a été comparé avec celui d'Abrahamson, et a montré de bons résultats.

➤ La Fonction De Cohérence LW

Luco et Wong (1986) ont développé la fonction cohérence semi-empirique LW depuis un modèle de propagation d'onde à travers des milieux différents. Ce modèle est le plus utilisé, en raison de sa simplicité. La fonction est donnée par l'expression suivante:

$$\gamma_{jk}(\omega) = \exp(-\alpha^2 \zeta^2 \omega^2)$$

Avec α = paramètre de décroissance exponentielle

ζ = distance entre les stations j et k .

Quand la valeur de α est bien choisie, la fonction donne de bon modèle pour la simulation de la variabilité spatiale. La valeur la plus recommandée par Luco et Wong $\alpha = 2.5 * 10^{-4} \text{ sec/m}$.

On peut remarquer des similarités au modèle d'Abrahamson, mais la nature analytique du modèle LW le rend indépendant du site.

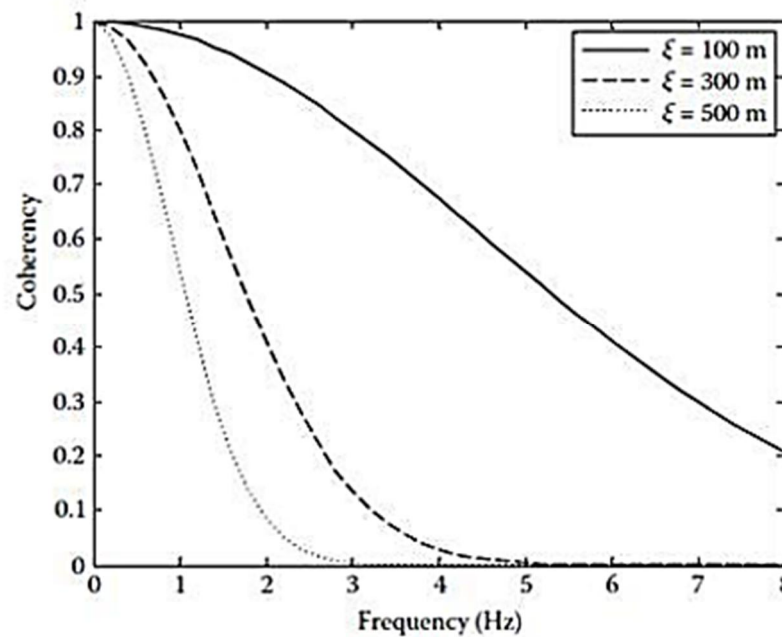


Figure 3-8 Fonction de Cohérence LW (E. Carlos, 2011)

3.4.3 FONCTION DE COHERENCE ANISOTROPIQUE

La plupart des chercheurs supposent que les fonctions de cohérence sont isotropes, c'est-à-dire qu'ils supposent que la même fonction de cohérence peut modéliser les corrélations de l'évolution temporelle de l'accélération entre les stations indépendamment de la direction de propagation de l'onde. Cependant, Loh et Lin (1990), en analysant le réseau SMART-1, ont constaté que la cohérence de la propagation horizontale des ondes est une fonction de la directivité ainsi que de la fréquence. Un modèle mathématique pour la cohérence anisotrope a été proposé ainsi qu'un procédé pour simuler les ondes stochastiques non stationnaires. Hao et al (1989) ont également proposé une fonction anisotrope de cohérence pour la propagation horizontalement des ondes sur la base d'enregistrements de points d'un réseau répandus horizontalement sur deux directions.

Les chercheurs ont aussi exprimé un intérêt pour étudier la cohérence de propagation verticale des ondes sismique, car ils peuvent donner un aperçu sur la stratification des sols à travers lesquels elles se propagent. Zendagui et al (1999) ont présenté un modèle analytique qui permet la prédiction des caractéristiques statistiques des séismes à tout point dans les couches du sol à partir des données statistiques des séismes à la surface libre. Ils ont montré que la réduction de l'intensité des ondes SH est beaucoup plus prononcée dans un milieu stratifié que dans un demi espace homogène. Ils se sont également rendu compte qu'une plus grande cohérence est présente dans les ondes de compression P que dans les ondes de cisaillement SH. Zendagui et Berrah (2002) ont mené des études sur la cohérence de la propagation des ondes SH, SV et P à travers un sol stratifié. Ils ont conclu que les cohérences des ondes SH et SV sont en général différente et que la cohérence est supérieure à une

certaine profondeur que sur la surface libre. Cependant, aucune fonction de cohérence explicite n'a été proposée. Lui et al (2004) en se basant sur les études menées par Hao (1989) ont proposé une fonctions de cohérence verticale et ont étudié sa relation avec l'espace et les fréquences. Ils ont également conclu que la fonction de cohérence est anisotropique. Abrahamson (1993) a également reconnu la propriété anisotrope de la fonction de cohérence et a développer une fonction de cohérence pour la propagation verticale des ondes.

3.5 CONCLUSION

L'analyse des enregistrements des stations sismique des différents réseaux implantés dans le monde a démontré que le mouvement de sol au cours d'un même séisme peut varier significativement en amplitude, phase et contenu fréquentiel d'un endroit à un autre. Le réseau SMART-1 a été intensivement utilisé par les chercheurs pour étudier la variabilité spatiale des évènements sismiques et dans l'établissement de fonctions de cohérence.

La variabilité spatiale peut être traitée d'une manière déterministe ou stochastique. Parce que l'approche déterministe ne prend pas en compte l'effet de passage d'onde, une approche stochastique a été pensée. Dans ce cas le signal est modélisé comme un vecteur d'un processus aléatoire avec un contenu fréquentiel bien défini. La variabilité spatiale est décrite par le module de la fonction de cohérence et la vitesse apparente et tous deux définissent la matrice d'inter-densité spectrale La procédure stochastique pour générer des signaux temporels synthétiques d'accélération qui tient compte de tous les effets illustrés dans l'exemple ci-dessus est présentée dans le quatrième chapitre.

CHAPITRE

4 SIMULATION DES SIGNAUX SISMIQUES

4.1 INTRODUCTION

L'approche la plus commune pour la génération des signaux sismiques variables dans l'espace est la simulation (inconditionnel) de champs aléatoires décrits par une fonction de densité spectrale de puissance et un modèle de cohérence spatiale (voir, par exemple, Shinozuka et Deodatis, 1996; Zerva et Zervas, 2002). Plusieurs modèles plus sophistiqués (par exemple, Saxena et al, 2000), générèrent des accélérogrammes par la simulation d'un champ aléatoire stationnaire, puis appliquent une fonction de modulation enveloppe à la série de temps pour tenir compte de la non-stationnarité d'amplitude, et, enfin, modifient de manière itérative les accélérogrammes afin de les rendre compatibles avec le spectre de réponse prescrit. Même si ces simulations des signaux sismiques variables dans l'espace fournissent l'information la plus utile pour l'évaluation de la réponse sismique, leur inconvénient est qu'ils sont essentiellement basés sur une série de bruit blanc et portent peu d'informations à partir d'enregistrements de séismes réels.

D'autre part, la simulation conditionnelle des champs aléatoires utilise un ou plusieurs accélérogrammes prédéfinis considérés comme des signaux de références. Dans ce cas les signaux sismiques générés sont variables dans l'espace et compatibles avec le signal d'origine et le modèle de cohérence spatial prescrit. Les signaux prédéfinis peuvent être des enregistrements réels de séismes ou des reproductions synthétiques. De cette façon, les signaux temporels variables dans l'espace générés héritent des caractéristiques physiques des

signaux initiaux, tels que la non-stationnarité des amplitudes et le contenu fréquentiel, des effets de la magnitude des tremblements de terre, la distance entre la source et le site, des conditions du sol locales, etc.

4.2 DESCRIPTION DE LA METHODE DE GENERATION

Shinozuka et Deodatis (1988) présentèrent un aperçu sur les principales méthodes stochastiques utilisées dans la modélisation des ondes sismiques se propageant à une direction donnée. L'approche stochastique fait appel en général à l'analyse dans le domaine fréquentiel pour générer des accélérogrammes variant dans l'espace. Les méthodes stochastiques sont mathématiquement complexes et ont au mieux un sens physique faible, mais ils fournissent des résultats acceptables et sont largement utilisés. (Carlos Enrique Peña Ramos 2011).

Probablement l'une des techniques stochastiques les plus couramment utilisées pour modéliser la variabilité spatiale des enregistrements des séismes est la méthode de représentation spectrale. Cette méthode est basée sur des techniques de simulation d'un vecteur de processus non-stationnaires. Elle a été lancée par Shinozuka (1972, 1988) et mise à jour par Deodatis (1996). L'algorithme de Deodatis permet de simuler des accélérogrammes variant dans l'espace tout en assurant la compatibilité avec la propagation des ondes, l'incohérence et de l'effet de site local. La procédure qui il l'a proposé se base sur l'association d'une fonction de modulation qui permet le control de l'amplitude et la durée totale de l'accélérogramme. La procédure utilise un processus itératif qui à chaque itération actualise la DSP afin de générer des accélérogrammes compatibles au spectre de réponse qui satisfait les critères géotechniques. Saxena (2000) améliora l'algorithme de Deodatis par l'incorporation une procédure de lissage numérique dans l'étape d'actualisation de la DSP et en limitant le nombre d'itération, conduisant à la simulation d'accélérogrammes qui reflète mieux la fonction de cohérence. (Songtao Liao, 2006)

4.3 SIMULATION D'UN CHAMP DE MOUVEMENT SISMIQUE STOCHASTIQUE STATIONNAIRE N FOIS MULTI-VARIABLES UNIDIMENTIONNEL PAR LA METHODE DE REPRESENTATION SPECTRALE

Cette section décrit l'algorithme qui simule les signaux sismiques non stationnaires basés sur la méthode de représentation spectrale. Le model est basé sur l'algorithme proposé par Deodatis (1996).

Les enregistrements des signaux temporels de l'accélération peuvent être considérés comme des vecteurs d'un processus aléatoire $a_j(t)$, avec j est la position de l'emplacement ou un signal en accélération est requis. Ainsi, le processus aléatoire peut être généré en n points.

La description stochastique du processus aléatoire se fait par sa moyenne $E[f_j^0(t)]$ et la fonction d'autocorrélation est décrite par l'expression suivante :

$$R_j(t_1, t_2) = E[a_j(t_1)a_j(t_2)] - E[a_j(t_1)]E[a_j(t_2)] \quad (4.1)$$

Lors de la simulation on suppose que les signaux d'accélération comme des processus aléatoires. Ainsi, il est commode de supposer que ce processus est gaussien, stationnaire et ergodique. On rappelle que'un processus aléatoire est dit Gaussien si l'on peut supposer être entièrement caractérisé par ses paramètres stochastiques. Un processus aléatoire est dit stationnaires si ces paramètres stochastiques ne dépendent plus de l'intervalle de temps (t_1, t_2) mais plus tôt à la différence de temps $\tau = t_1 - t_2$. En conséquence de l'indépendance absolue vis-à-vis au temps, un processus stationnaire gaussien sera perpétuelle (sans commencement ni fin) avec les mêmes caractéristiques stochastiques tout au long de sa durée infinie. Par définition, les processus stationnaires gaussiens ont une valeur moyenne constante et pour l'accélération cette valeur est généralement égale à zéro. Par conséquent, les paramètres d'un processus stochastique gaussien stationnaire à n'importe quelle station j deviennent

$$E[a_j(t)] = 0 \quad (4.2)$$

$$R_j(t_1, t_2) = R_j(\tau) \quad (4.3)$$

Lorsqu'on compare les signaux d'accélération enregistrés à différentes stations disposées en configurations de réseaux, tels que SMART-1, on remarque des similitudes en amplitude et des variations en fréquences, ce qui est particulièrement évident lorsque les distances entre les stations sont relativement courtes. Par conséquent, si un processus aléatoire est utilisé pour décrire de façon réaliste les signaux temporels de l'accélération, il doit tenir compte de cette corrélation.

Les processus aléatoires qui prennent en compte des variables aléatoires corrélées multiples sont appelés processus aléatoires multivariées. Pour plus de simplicité, un processus aléatoire à deux variables, ce qui implique que seulement deux variables aléatoires corrélées, seront considérées par les paramètres stochastiques.

Considérons deux accélérations à moyennes nulles $a_j(t)$ et $a_k(t)$, qui sont définis comme des variables aléatoires corrélées et enregistrées respectivement dans les stations j et k . Donc les paramètres stochastiques d'un processus aléatoire bidimensionnel sont donnés par l'expression suivante:

$$R_{jk}(t_1, t_2) = R_{jk}(\tau) \quad (4.4)$$

Avec $R_{jk}(\tau)$ est la matrice d'inter-corrélation entre $a_j(t)$ et $a_k(t)$. La matrice correspondante dans le domaine fréquentiel est la matrice d'inter-densité spectrale croisée, est donnée par l'expression suivante:

$$S_{jk}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{jk}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (4.5)$$

Considérons maintenant un processus aléatoire n fois multivarié. Pour être plus précis, considérant un vecteur de processus stochastique stationnaire n fois multi-variables uni dimensionnel noté 1D- n V, avec des composants $\{a_j^0(t)\}_{j=1,2,\dots,n}$ ayant une moyenne égale à zéro (i.e. $E[a_j^0(t)] = 0 ; j = 1, 2, \dots, n$) et une matrice d'inter-corrélation $R^0(\tau)$;

$$R^0(\tau) = \begin{bmatrix} R_{11}(\tau) & R_{12}(\tau) & \dots & R_{1n}(\tau) \\ R_{21}(\tau) & R_{22}(\tau) & \dots & R_{2n}(\tau) \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ R_{n1}(\tau) & R_{n2}(\tau) & \dots & R_{nn}(\tau) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Et la matrice d'inter-densité spectrale correspondante est la suivante $S^0(\omega)$

$$S^0(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(\omega) & \dots & S_{1n}(\omega) \\ S_{21}(\omega) & S_{22}(\omega) & \dots & S_{2n}(\omega) \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ S_{n1}(\omega) & S_{n2}(\omega) & \dots & S_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Avec $S_{jj}(\omega)$ et $S_{kk}(\omega)$ (éléments de la diagonale de la matrice) représentent les densités spectrales DSP des vecteurs $a_j^0(t)$ et $a_k^0(t)$ respectivement et $S_{jk}(\omega)$ et $S_{kj}(\omega)$ (éléments hors diagonale) représentent leurs inter-densités spectrales.

Afin de tenir compte de l'effet d'incohérence et de passage d'onde dans la corrélation entre les deux vecteurs $a_j^0(t)$ et $a_k^0(t)$ due à la variabilité spatiale, la fonction de cohérence doit être introduite. En se référant à la définition de la fonction de cohérence les fonctions d'inter-densités spectrales s'écrivent alors comme suit :

$$S_{jk}(\omega) = \gamma_{jk}(\omega) \sqrt{S_{jj}(\omega) S_{kk}(\omega)} ; (j, k = 1, 2, \dots, n); j \neq k \quad (4.8)$$

En se basant sur l'hypothèse de stationnarité on peut écrire les relations suivantes :

$$R_{jj}(\omega) = R_{jj}(-\omega), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.9)$$

$$R_{jk}(\omega) = R_{kj}(-\omega), \quad j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, n; j \neq k \quad (4.10)$$

Et par conséquent :

$$S_{jj}(\omega) = S_{jj}^*(-\omega) \quad (4.11)$$

$$S_{jk}(\omega) = S_{jk}^*(-\omega) \quad (4.12)$$

L'exposant * indique le conjugué de la matrice.

La matrice $S^0(\omega)$ est Hermitienne et définie positive. Alors, on peut la décomposer en un produit d'une matrice à triangle inférieur $H(\omega)$ et son Hermitien $H^{*T}(\omega)$.

$$S_{jk}(\omega) = H(\omega)H^{*T}(\omega) \quad (4.13)$$

Avec : l'exposant T dénote la transposé de la matrice.

$$H(\omega) = \begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & 0 & \cdots & 0 \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1}(\omega) & H_{n2}(\omega) & \cdots & H_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Les éléments diagonaux de la matrice $H(\omega)$ sont réels et positifs et vérifient la relation $H_{jj}(\omega) = H_{jj}(-\omega)$, alors que les éléments hors de la diagonale sont généralement complexes.

Les éléments de la matrice $H(\omega)$ peuvent s'écrire sous une forme polaire :

$$H_{jk}(\omega) = |H_{jk}(\omega)| \exp(i\theta_{jk}(\omega)); \quad (j = 2, \dots, n; k = 1, \dots, n-1); j > k \quad (4.15)$$

Où:

$$\theta_{jk}(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[H_{jk}(\omega)]}{\text{Re}[H_{jk}(\omega)]} \right) \quad (4.16)$$

$\text{Im}(H_{jk}(\omega))$ et $\text{Re}(H_{jk}(\omega))$ sont respectivement les parties imaginaire et réelle du nombre complexe $H_{jk}(\omega)$. Ces derniers vérifient la relation :

$$H_{jk}(\omega) = H_{jk}(-\omega); \quad (j = 2, \dots, n; k = 1, \dots, n-1); j > k \quad (4.17)$$

Une fois la matrice $S^0(\omega)$ est décomposée suivant l'équation 4.13, le vecteur des processus stochastiques stationnaires $\{a_j^0(t)\}_{j=1,2,\dots,n}$ peut être simulé par la série suivante pour N qui tend vers ∞ :

$$a_j(t) = 2 \sum_{m=1}^n \sum_{l=1}^N |H_{jm}(\omega_l)| \sqrt{\Delta\omega} \cos(\omega_l t - \theta_{jm}(\omega_l) + \Phi_{ml});$$

$$(j = 1, 2, \dots, n) \quad (4.18)$$

Où:

$$\omega_l = l\Delta\omega \quad ; \quad l = 1, 2, \dots, N \quad (4.19)$$

$$\Delta\omega = \frac{\omega_u}{N} \quad (4.20)$$

Les Φ_{ml} ; ($m=1,2,\dots,n$); ($l=1,2,\dots,N$) utilisées dans l'équation (4.18) sont des phases aléatoires indépendantes uniformément distribuées sur l'intervalle $[0,2\pi]$.

Dans l'équation (4. 20) ω_u représente la fréquence angulaire limite ou de coupure à partir de laquelle les éléments de la matrice donnée par (4.7) deviennent nuls. Et N est le nombre total de pas de fréquence angulaire $\Delta\omega$ pour atteindre cette limite.

Pour la génération des processus $a_j(t)$; ($j = 1, 2, \dots, n$) selon l'équation (4. 18) le pas de temps Δt doit être inférieur ou égale à (π/ω_u) afin d'éviter le phénomène d'Aliasing.

4.4 SIMULATION D'UN CHAMP DE MOUVEMENT SISMIQUE STOCHASTIQUE NON STATIONNAIRE N FOIS MULTI-VARIABLES UNIDIMENTIONNEL

Un processus aléatoire stationnaire ne peut pas donner une représentation réelle de la propagation des ondes sismiques. Généralement les ondes sismiques ont une durée bien déterminée avec des variations de l'amplitude et du contenu fréquentiel, par d'autre terme, le processus généré doit décrire un processus non stationnaire.

Pour reproduire la non-stationnarité des signaux sismiques, plusieurs chercheurs ont fait appel à un artifice qui réside en une fonction mathématique dite fonction de modulation. Cette fonction permet la modulation de l'amplitude et le contenu en fréquence. La modulation de l'amplitude fournit un moyen pour contrôler la durée de l'excitation sismique ainsi la variation temporelle de l'amplitude, donnant ainsi un modèle plus réel pour une représentation des ondes sismiques. Donc, le processus non-stationnaire est donné par l'expression suivante :

$$A_j(t) = M_j(t)a_j(t) \quad (4.21)$$

Avec $M_j(t)$ est la fonction de modulation qui peut prendre plusieurs forme l'une de représentation possible est montré dans la figure 4-1.

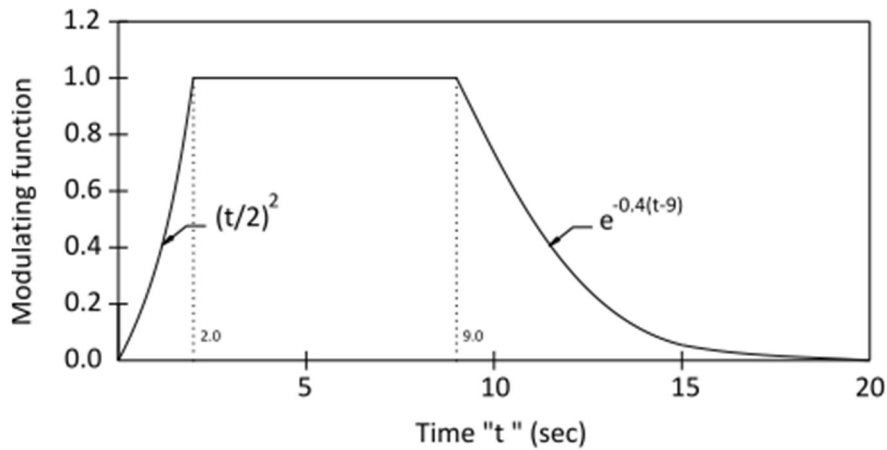
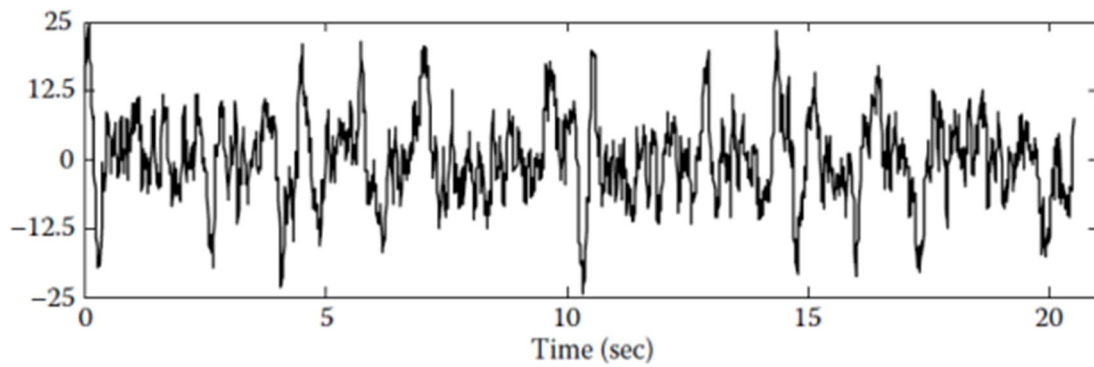


Figure 4-1 Fonction de modulation donné par Jennings et al (1968)

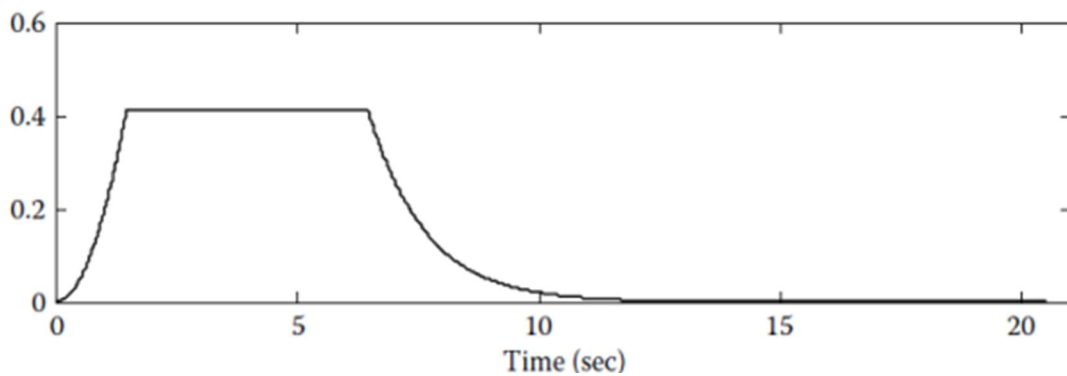
LA figure 4-2 montre très bien l'effet de la fonction de modulation sur un signal en accélération stationnaire.

La DSP définie précédemment représente une mesure du contenu fréquentiel dans un processus aléatoire stationnaire. Pour utiliser cette équation, il faut assumer que l'histoire temporelle du séisme est stationnaire et sa DSP est indépendante du temps. Cependant, les enregistrements des tremblements de terre sont caractérisés par leur non-stationnarité et leurs densités spectrales de puissance évolutive expriment une dépendance dans le domaine temporel et fréquentiel. De nombreux auteurs ont illustré la dépendance temps fréquence de la densité spectrale de puissance évolutive en la divisant en deux termes. Le premier terme dépendant que de la fréquence est la DSP comme définie précédemment $S(\omega)$, et le deuxième est une fonction temporelle dite fonction de modulation $M(t)$. Le produit de ces deux termes définit une DSP évolutive.

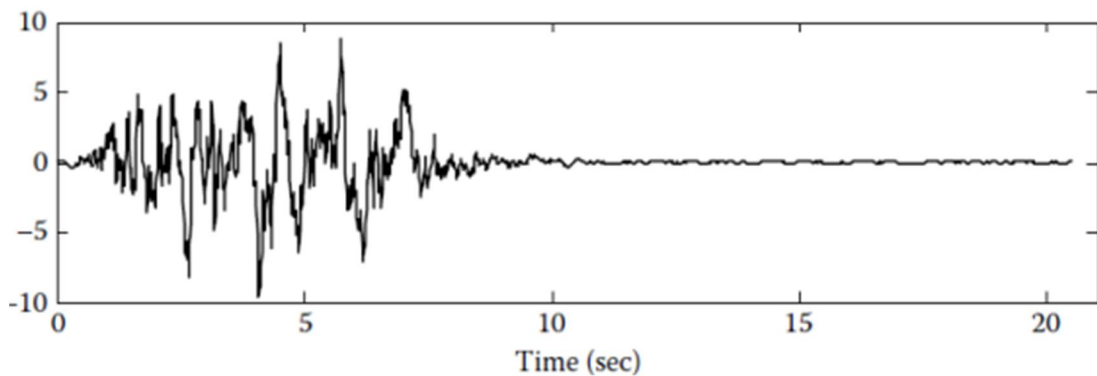
$$S(\omega, t) = M(t) * S(\omega) \tag{4.21}$$



(a) Signal d'accélération stationnaire



(b) Fonction de modulation



(c) Signal d'accélération modulé

Figure 4-2 Effet de la fonction de modulation sur un processus stationnaire [Zerva (2009)]

Il faut noter que depuis le développement de modèles pour le calcul de la densité spectrale de puissance évolutive, plusieurs chercheurs ont délaissé le concept de fonction de modulation. Cette densité spectrale de puissance évolutive peut être calculée directement à partir d'un signal d'accélération (Karmakar (2012)), ou par des modèles théoriques (Yufeng Gao (2012)).

Une approche très satisfaisante et beaucoup plus pratique pour le traitement de la non stationnarité a été démontrée, c'est le fait d'assumer que le tremblement de terre est subdivisé en segments approximativement stationnaires (Benmansour, 2013). Cette supposition est fondée sur la base que la propagation des ondes sismiques dans la terre se fait par trois différents types d'ondes, les ondes P (ondes de compression), les ondes S (ondes de cisaillement), et les ondes de surfaces (Ondes Rayleigh et Love). La propagation de chaque type d'onde peut s'apparaître à un processus stationnaire. Le mouvement global est la combinaison de tous ces types d'ondes qui ont chacune un temps d'arrivée différent, et une quantité d'énergie différente à divers fréquence. Cette procédure peut être aussi utilisée pour le traitement de signaux sismique réels (Boukli Hacène et al. 2011).

La procédure proposé par Benmansour, 2013 consiste à la génération de signaux sismiques par la méthode de segmentation est décrite par l'algorithme de Benmansour, est décrite dans la Figure 4-3.

Alors, pour joindre les différents segments de l'accélération et construire les évolutions temporelles des accélérations différentielles non stationnaires, l'intégrabilité de ces derniers doit être possible et cela en assurant la continuité lors de l'assemblage des des signaux stationnaire générés par chaque segment. Cette intégrabilité par ailleurs 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. Pour cela, nous avons adopté le chevauchement proposé par Benmansour entre les intervalles de temps de génération des accélérations stationnaires. Ils sont donc déterminés de façon à prendre en compte la durée du segment ainsi que la durée de la zone de transition avec les segments adjacents. Finalement, l'accélération non stationnaire est obtenue en reliant ces segments. Dans les zones de transition elle est égale à la somme des accélérations stationnaires des deux segments correspondant.

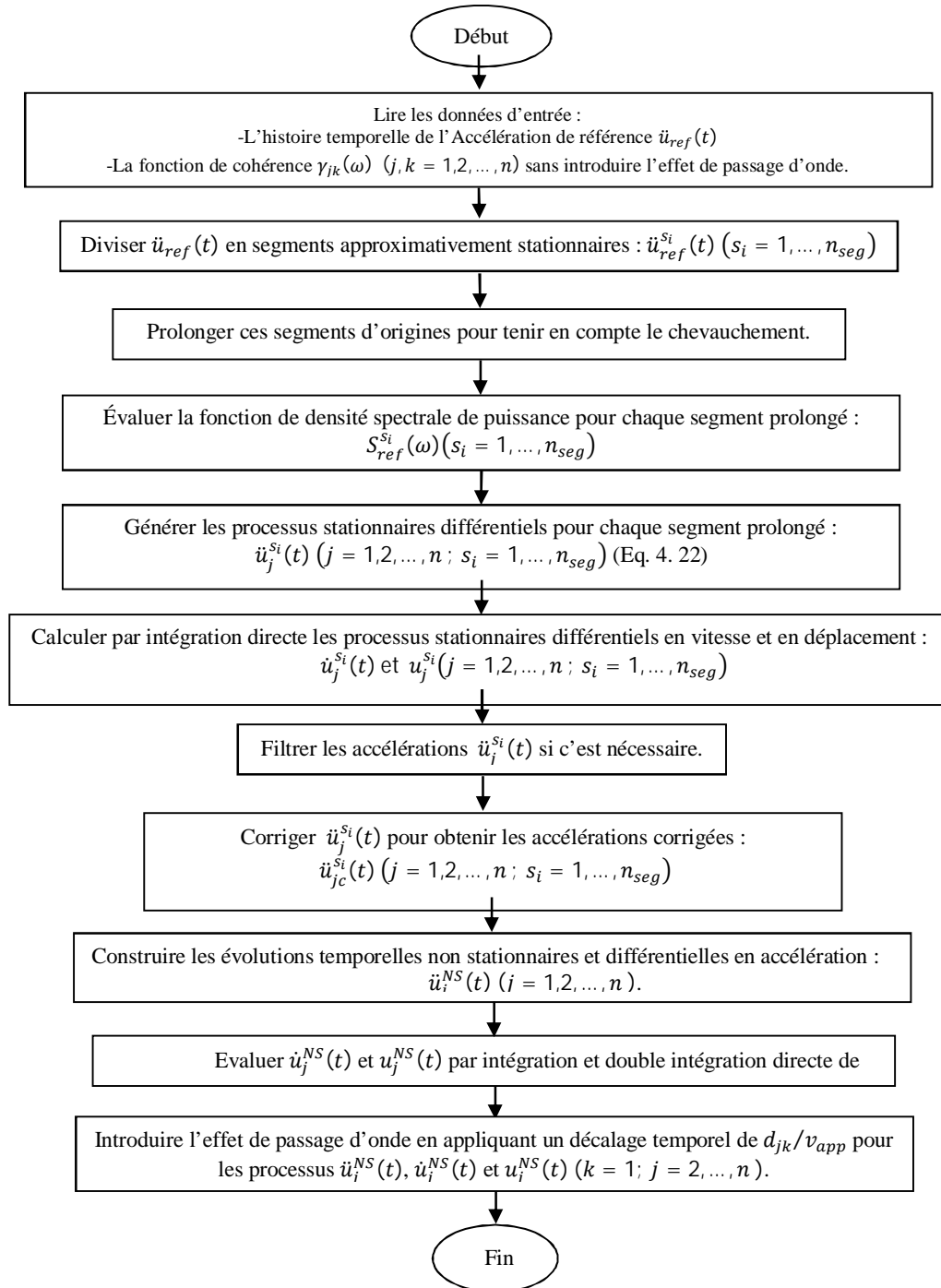


Figure 4-3 Procédure de génération des mouvements sismiques différentiels en termes d'accélération, vitesse et déplacement

Dans le cadre de ce travail, nous voulons des signaux à la fois compatible à des spectres de réponse et qui hérite des propriétés d'un signal réel. on a procédé à un changement sur l'algorithme de Benmasour. Dans le nouveau algorithme de simulation on propose d'ajoute une procedure itérative semblable à celle proposé par Deodatis, 1996. Cette procedure consiste à actualiser la valeur de la densité spectrale de puissance en la multipliant par le rapport du spectre de réponse réglementaire ou cible et le spectre calculé à partir du

signal simulé. Pour notre approche, chaque DSP de chaque segment est actualisée à chaque itération par le schéma suivant :

$$S_j^{k+1}(\omega) = S_j^k(\omega) \left[\frac{RSA_j(\omega)}{RSA_j^k(\omega)} \right]^2 \quad (4.22)$$

Avec : $S_j^k(\omega) = S(\omega)$ actualisé à la k-ième itération de la position j

$S_j^{k+1}(\omega) = S(\omega)$ actualisé à la k+1-ième itération de la position j

$RSA_j^k(\omega)$ Spectre de réponse obtenu à partir du processus généré à la k-ième itération de la position j

$RSA_j(\omega)$ Spectre de réponse cible à la position j

4.5 DESCRIPTION DE L'APPROCHE PROPOSEE

Un algorithme itératif est proposé dans la présente étude pour la génération des signaux sismiques variables dans l'espace, compatibles aux spectres de réponse réglementaire. Fig. 4-4 fournit l'organigramme pour l'algorithme proposé. Les étapes sont expliquées en détail dans ce qui suit:

- (1) Obtenir les spectres de réponse en accélération cible (RSA) spécifique aux différents profils géotechniques des emplacements des fondations selon les spécifications du code.
- (2) Estimer les fonctions de cohérence entre les différents points de fondation en utilisant un modèle de cohérence choisi et les coordonnées de différents points.
- (3) Diviser le signal d'accélération de référence en plusieurs segments (généralement c'est trois segments).
- (4) Calculer la densité spectrale de puissance pour chaque segment.
- (5) Générer les processus aléatoires stationnaires, selon la méthode expliquée précédemment, correspondants à chaque segment
- (6) Assembler les segments générés afin d'en obtenir un ou plusieurs processus non stationnaires
- (7) Calculer les spectres de réponse des accélérations générées et les comparer avec les Spectres de réponses cibles. Si l'erreur moyenne est supérieur à la limite de tolérance prescrite (critère de convergence), mettre à jour les densités spectrales de puissance et aller à l'étape 5 pour répéter la simulation et générer une nouvelle série d'accélération simulées.

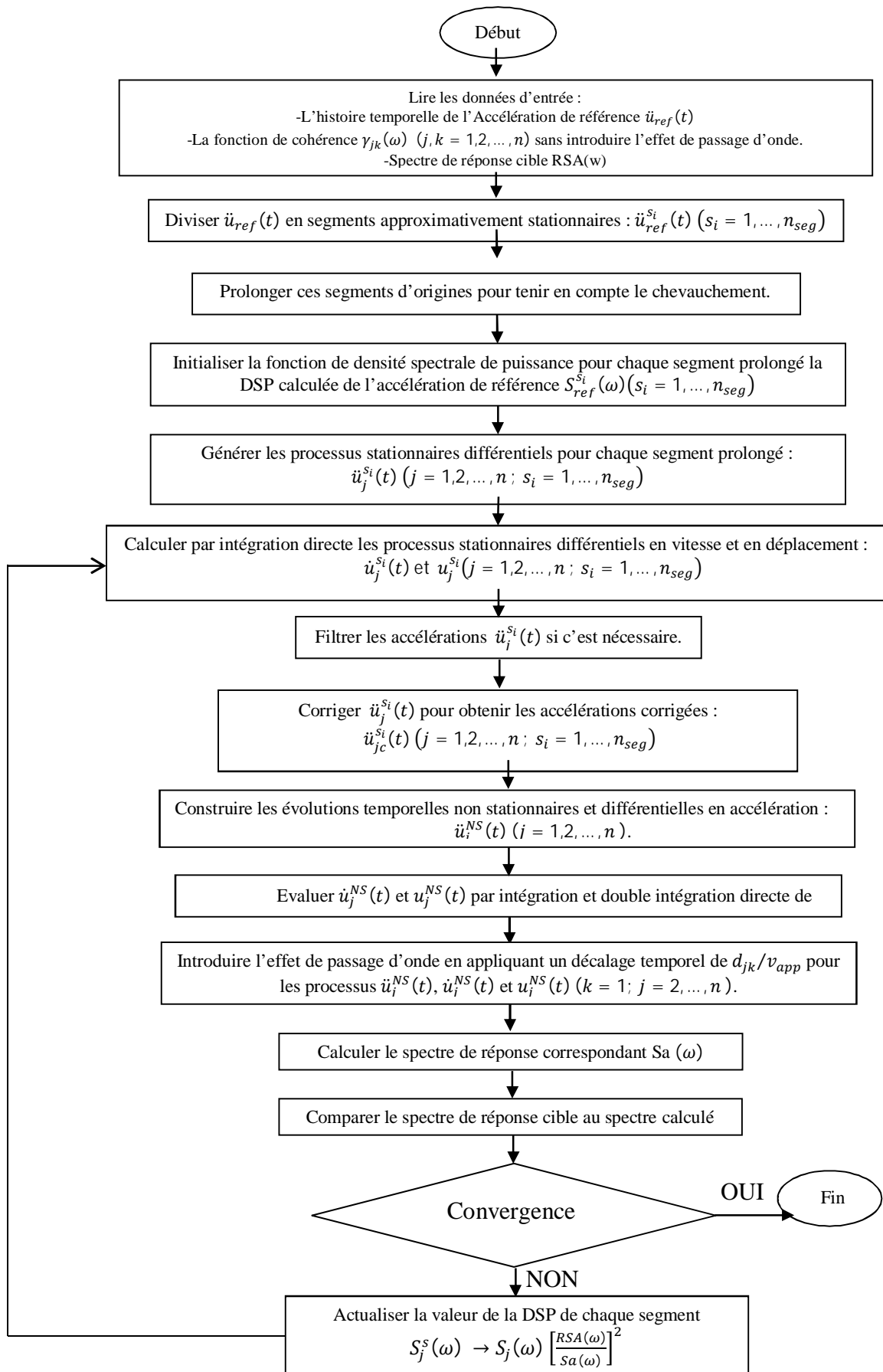


Figure 4-4 Organigramme de l'Approche Proposée

(8) Arrêtez l'itération si elle satisfait le critère de convergence prédéfini.

4.6 GENERATION DES SIGNAUX SISMIQUES SELON L'APPROCHE PROPOSEE

4.6.1 GENERATION DES MOUVEMENTS SISMIQUE COMPATIBLE A UN SPECTRE DE REPONSE

Souvent l'ingénieur lors d'une analyse dynamique temporelle a besoin d'avoir des signaux temporels en accélération qui doit être compatible au spectre de réponse réglementaire, ceux du RPOA entre autres.

Les figures 4-5 et 4-6 montrent les évolutions temporelles en termes d'accélération et de déplacement générés à partir de l'accélération mesurée lors du tremblement de terre de KOBE (1995). Le signal a obtenu à partir de la base de données de PEER BERKLEY (http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database). Il faut savoir que les signaux dans cette base de données d'enregistrements de tremblement subissent un traitement au préalable A partir de la figure 4-5 on remarque que le PGA de l'accélération simulé et celui de l'accélération de référence reste dans le même ordre de grandeur.(PGA simulé = 0.31 g et le PGA de référence = 0.34g)

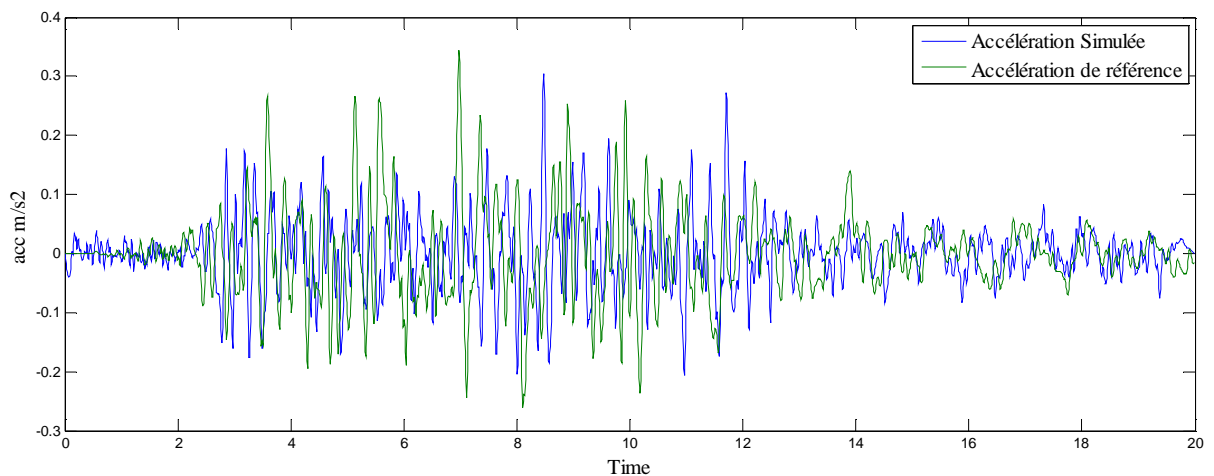


Figure 4-5 Accélération Simulés et l'accélération de référence (KOBE)

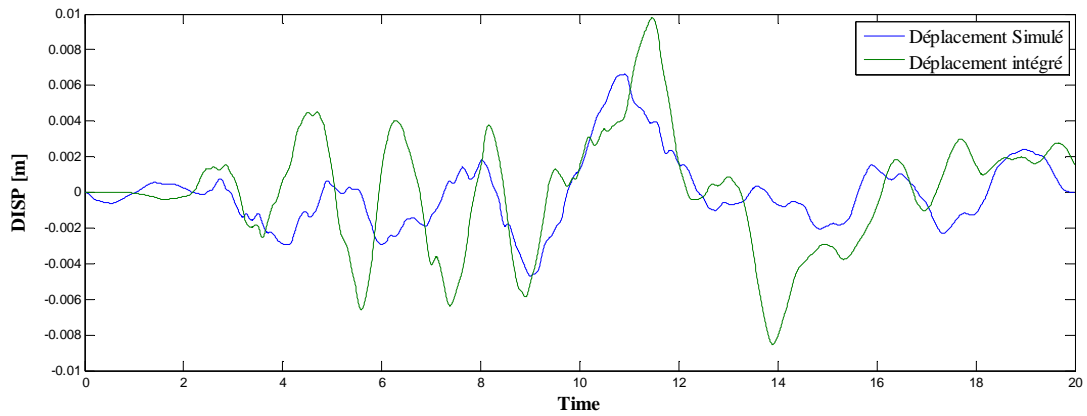


Figure 4-6 Déplacement Simulé et Déplacement Intégré

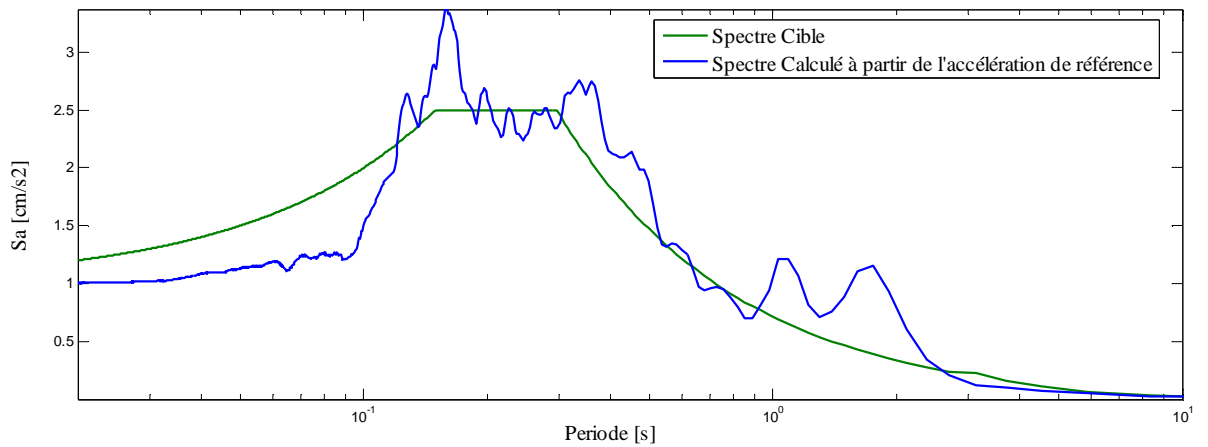


Figure 4-7 Spectre de réponse de l'accélération de référence comparé à celui de RPOA site 1

On a également calculé le spectre de réponse enveloppe de dix signaux d'accélération simulés et après on l'a comparé à celui du RPOA comme le montre la figure 4-8.

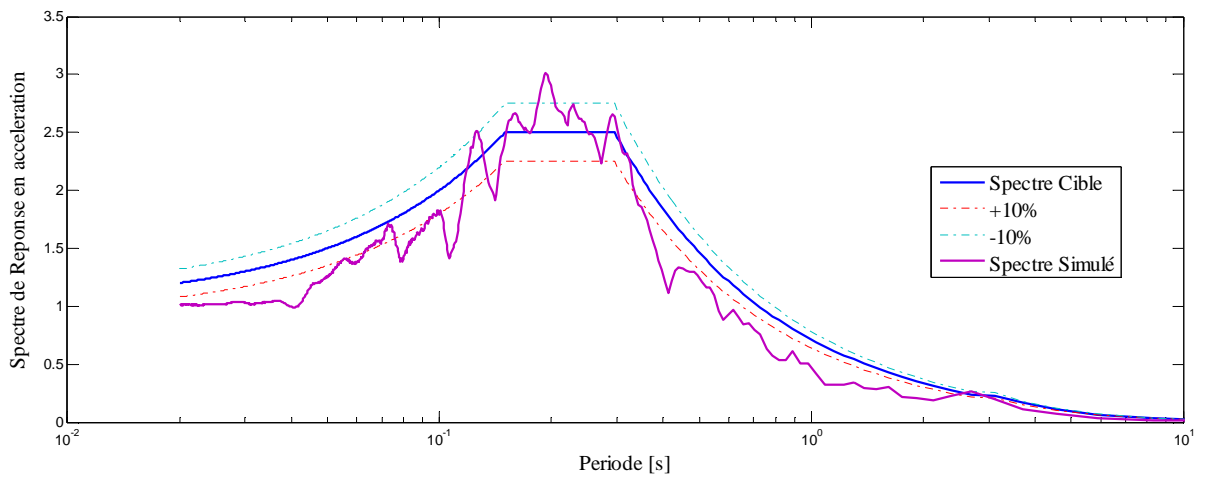


Figure 4-8 Spectre de réponse moyenne calculé à partir de 10 signaux simulés

On a répété la même procédure pour un autre signal d'accélération. Cette fois on utilise l'accélération du tremblement de terre de SAKARIA mais cette fois ci le signal de référence n'est pas traité et on peut voir sur la Figure 4-10 que le signal est sujet au problème d'intégrabilité qu'on rencontre souvent avec les signaux sismiques.

Le but de cette application est de générer un signal d'accélération, à partir de cetenregistrement non traité, toute en resolvant le problème d'intégrabilité et en même temps assurer la compatibilité au spectre cible du RPOA.

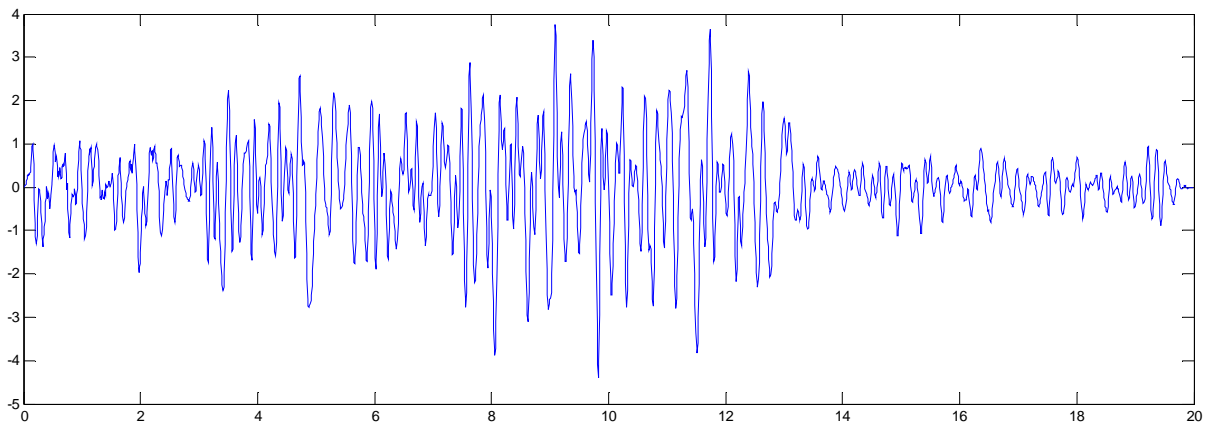


Figure 4-9 Accélération Simulée à partir de l'accélération du seisme SAKARIA

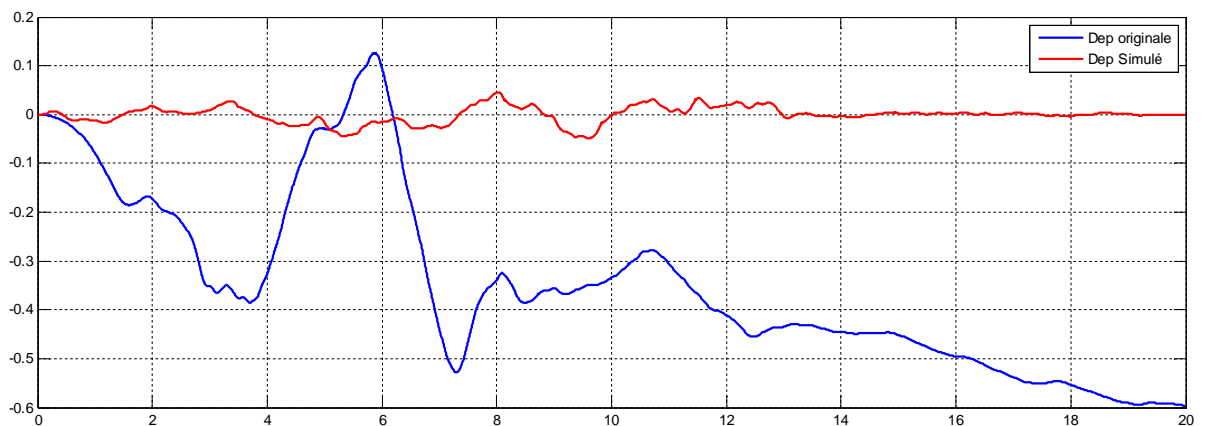


Figure 4-10 Comparaison entre le déplacement simulé au déplacement intégré à partir de l'accélération de référence

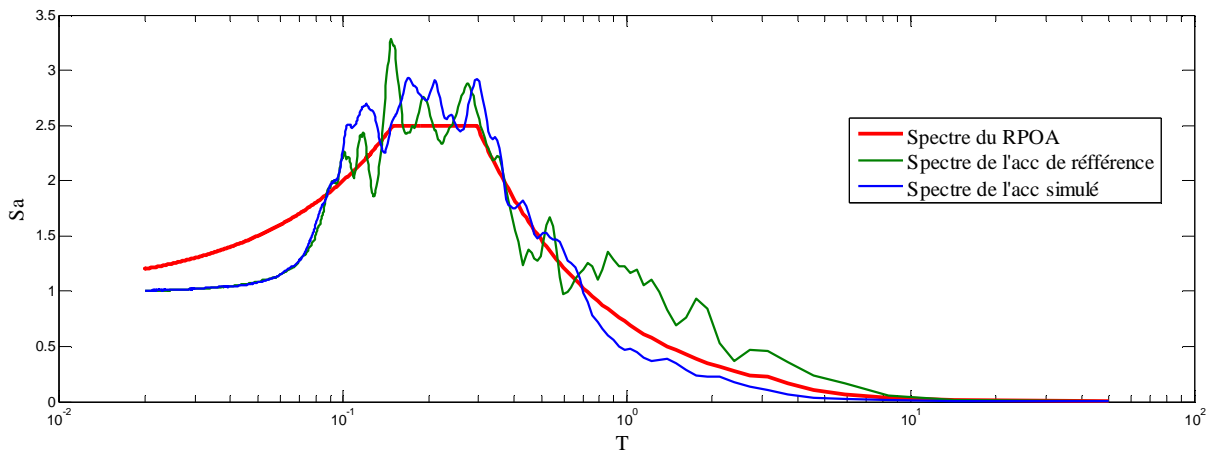


Figure 4-11 Comparaison des spectres de Réponse simulé, calculé à partir de l'accélération de référence et le spectre Règlementaire RPOA

L'avantage de la génération par segmentation est qu'on peut appliquer le schéma itératif que sur certaine partie du signal, (i.e. modifier la densité spectrale de puissance que de certains segments), ceux qui provoquent la réponse maximale. Généralement c'est la phase des ondes S qui engendrent les réponses maximales. La figure 4-12 montre une comparaison entre deux spectres de réponse calculés à partir de dix signaux simulés. Les deux procédures sont identiques sans que pour la première, le schéma itératif est appliqué sur toutes les DSP des segments. Dans la deuxième procedure, on ne modifie que la DSP des ondes S.

Le fait de corrigé que la partie des ondes S d'un signal donne une meilleur compatibilité du spectre de réponse avec le spectre réglementaire qu'un signal qui a subi une correction complete

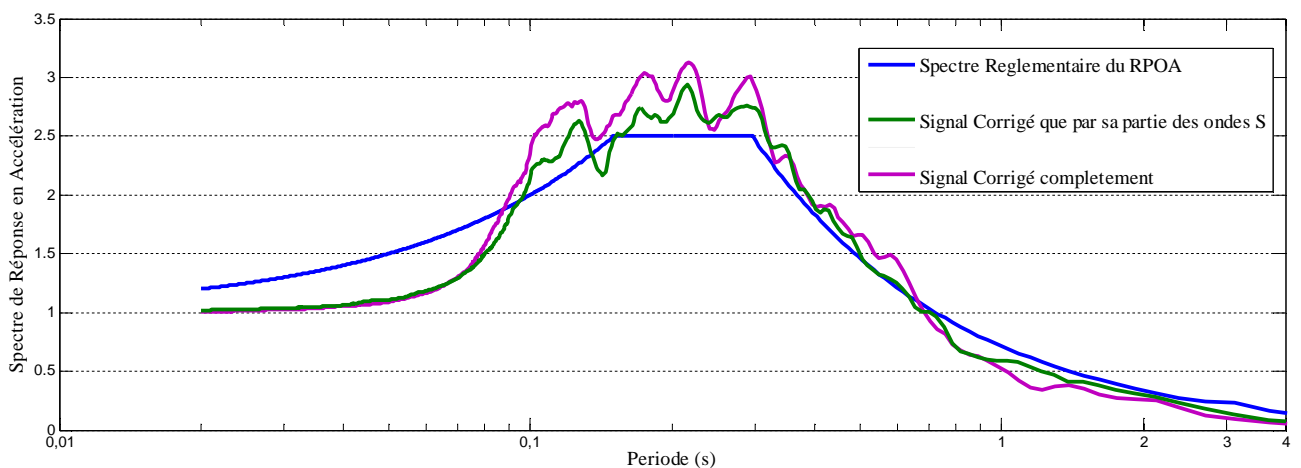


Figure 4-12 Spectres de réponse moyen de 10 signaux simulés corrigés complètement ou corrigé que la phase des ondes S.

4.6.2 GENERATION DES MOUVEMENTS SISMIQUES VARIABLES DANS L'ESPACE COMPATIBLES AUX SPECTRES DE REPONSE

Dans cette partie on essayera de générer des signaux sismiques en prenant en compte l'effet de la variabilité spatiale.

Trois signaux sismiques sont générés à 3 stations différentes. L'accélérogramme pris comme référence est celui de l'enregistrement du séisme KOBE 1995 (figure 4-5). Les trois stations sont distantes entre elles de 100 m. Les profils de sol sous chaque point sont respectivement rocheux, ferme et meuble (voir la figure 4-13). Les caractéristiques des spectres de réponse du RPOA sont données dans le tableau 4-1. Une comparaison entre les spectres cible et ceux calculés à partir de l'accélération de référence est reportée sur la figure 4-14. On peut voir que le spectre de réponse obtenu à partir de l'accélération de référence montre une légère compatibilité avec le spectre du RPOA S2 mais comparait au deux autres spectre réglementaires, il n'exprime aucune concordance avec eux.

Support n°	Distance (m)	Catégorie du Site	T1	T2	S	Description du Site
1	0	S1	0,15	0,30	1,0	Sol Rocheux
2	100	S2	0,15	0,40	1,1	Sol Ferme
3	200	S3	0,20	0,50	1,2	Sol Meuble

Tableau 4-1 Coefficients liés aux profils du sol pour le calcul des spectres réglementaires du RPOA correspondant à chaque support

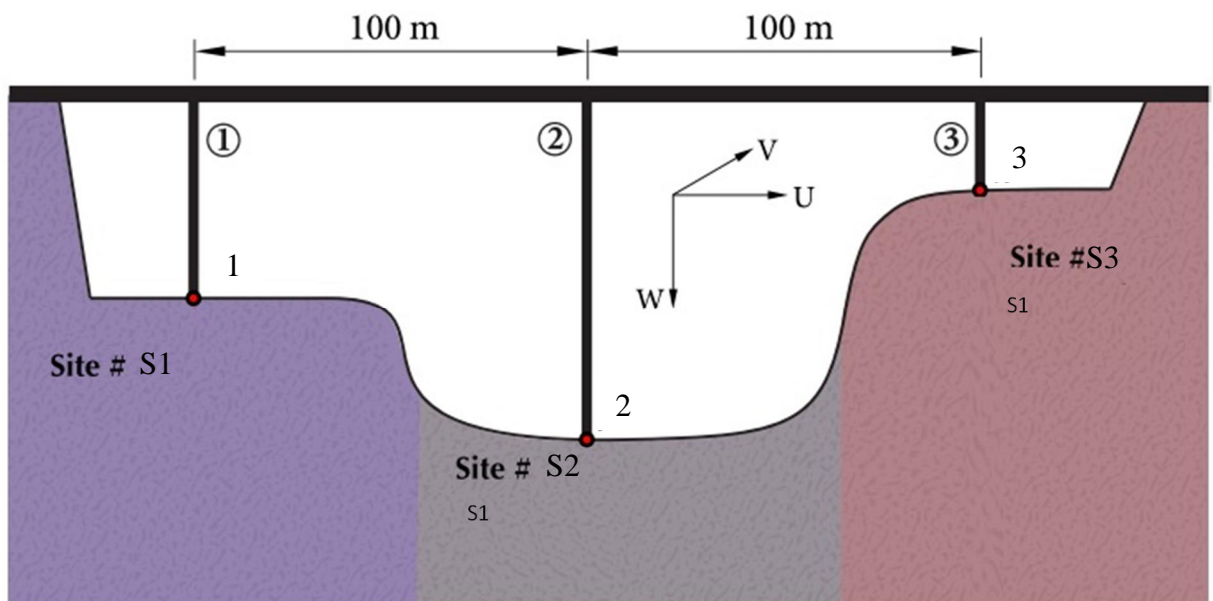


Figure 4-13 Vue Schématique sur les profils du sol

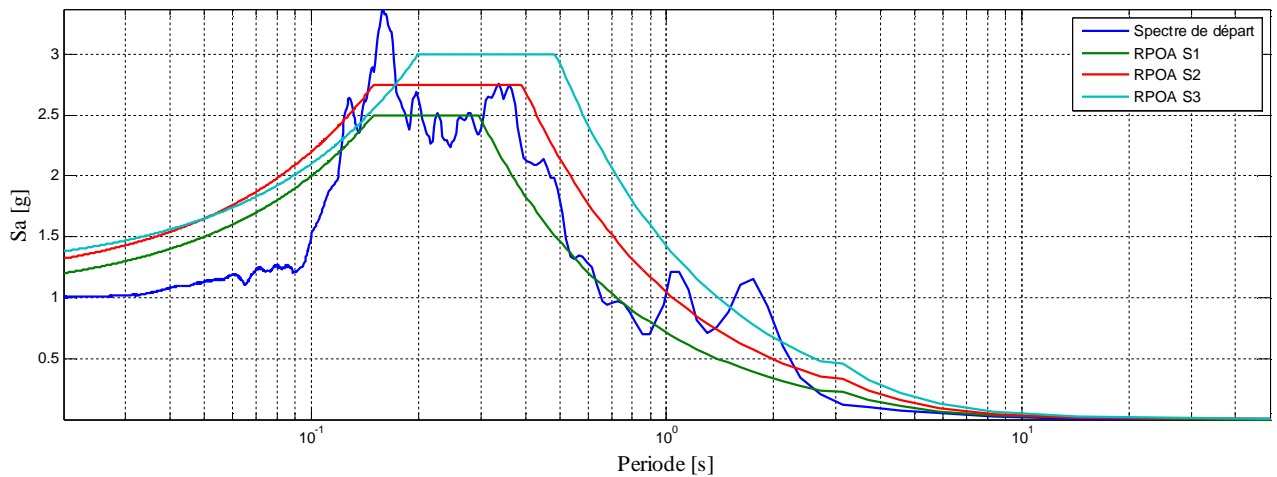


Figure 4-14 Spectre réponse de l'accélération de KOBE comparé aux spectres cible

Dans ce cas de calcul, le modèle de Harichandran et Vanmarcke est choisi pour décrire l'effet de cohérence. Les paramètres du modèle sont obtenus à partir de Harichandran et al. Ces valeurs sont :

$$A = 0.636; \alpha = 0.0186; \kappa = 31200; \omega_0 = 9.49 \text{ rad/s}; b = 2.95$$

Selon l'organigramme décrit dans la Fig. 4-3 un ensemble de trois évolutions temporelles d'accélération corrélées spatialement variables compatibles aux spectres cible correspondants au support sont générées comme montré en détail en ce qui suit.

Les évolutions temporelles des déplacements générés à différents supports sont également calculées par double intégration de des évolutions temporelles de l'accélération correspondantes.

Station n°1 : Site Rocheux

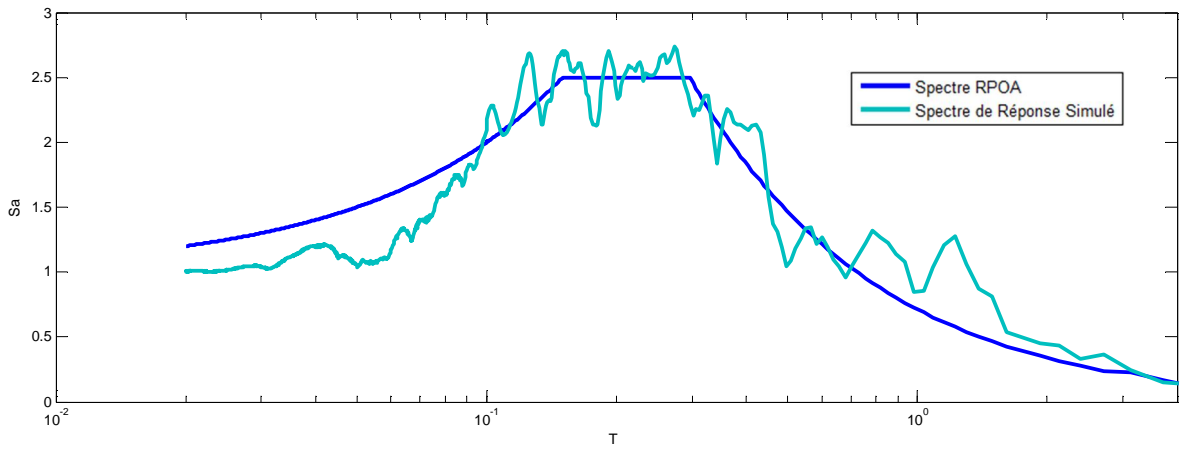


Figure 4-15 Spectre de réponse Simulé et celui du RPOA S1

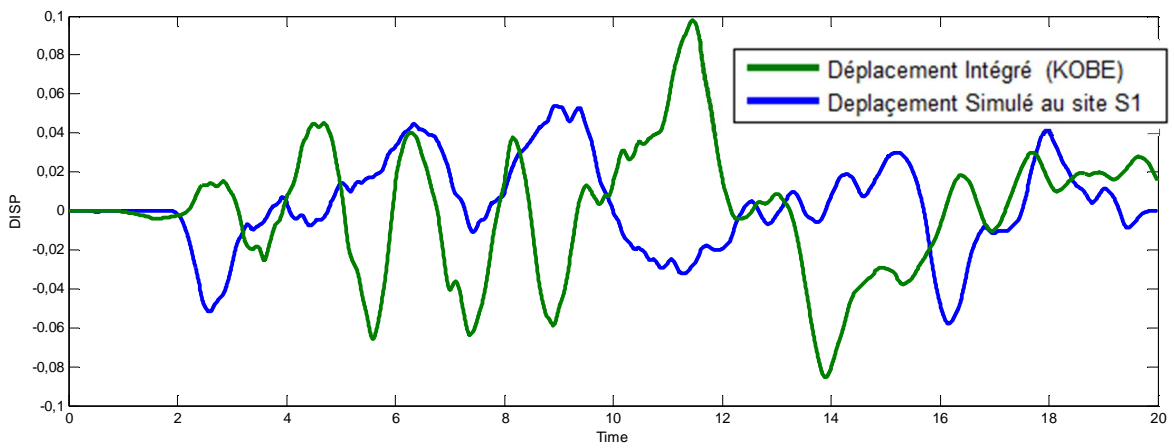


Figure 4-16 Déplacement simulé et le déplacement intégré du séisme de KOBE

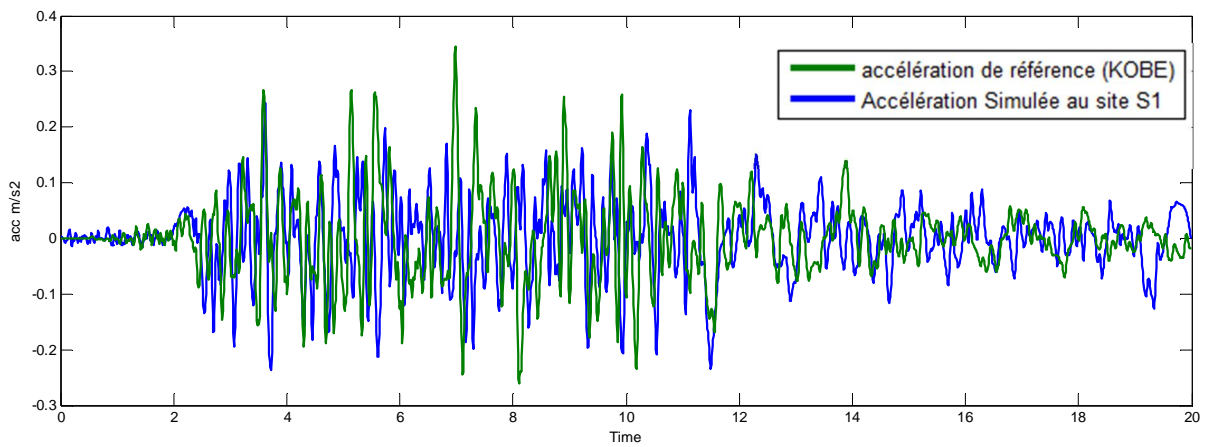


Figure 4-17 Accélération simulé et Accélération du séisme de KOBE

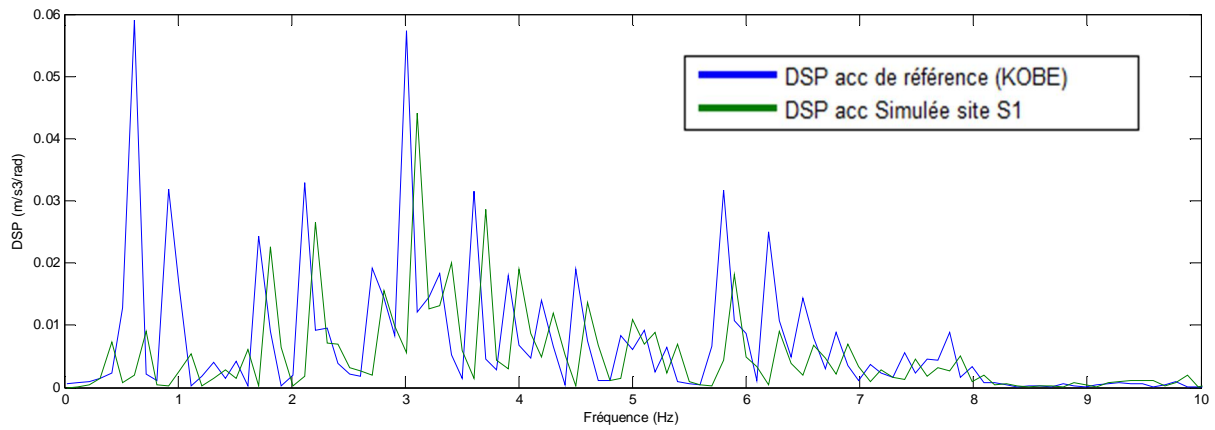


Figure 4-18 Les densités spectrale de puissance des évolutions temporelles des accélérations simulée et de référence pour un site Rocheux

Station n°2 : Site Ferme

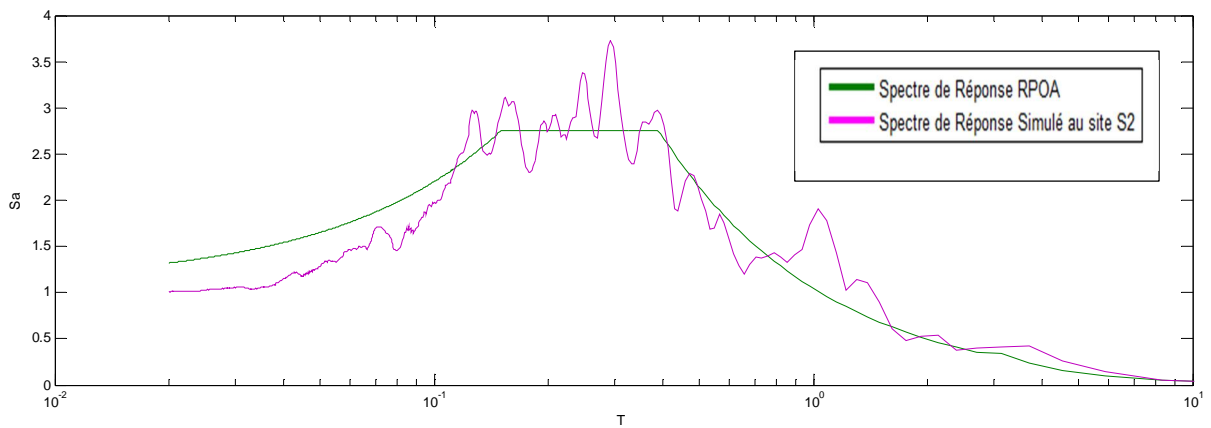


Figure 4-19 Spectre de réponse Simulé et celui du RPOA S2

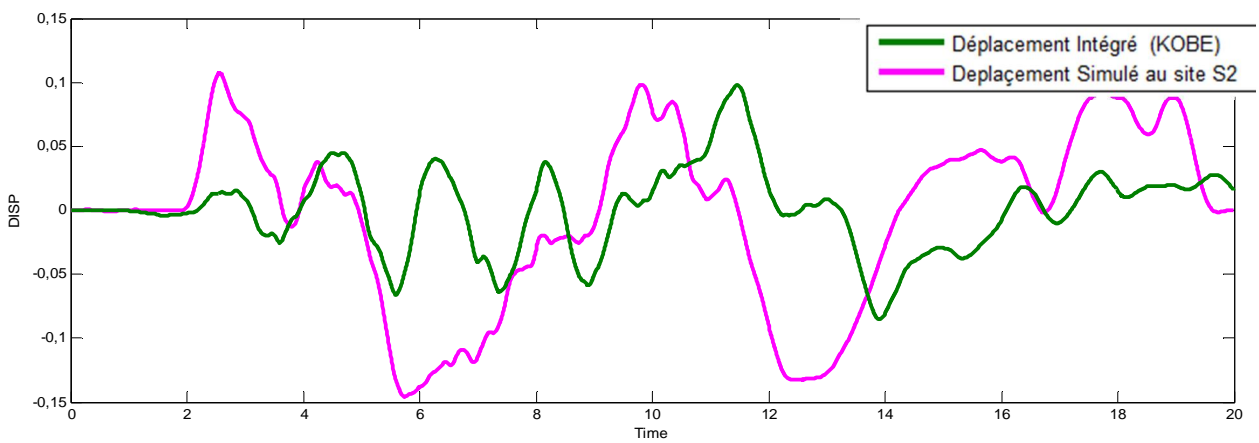


Figure 4-20 Déplacement simulé à la station 2 et le déplacement intégré du séisme de KOBE

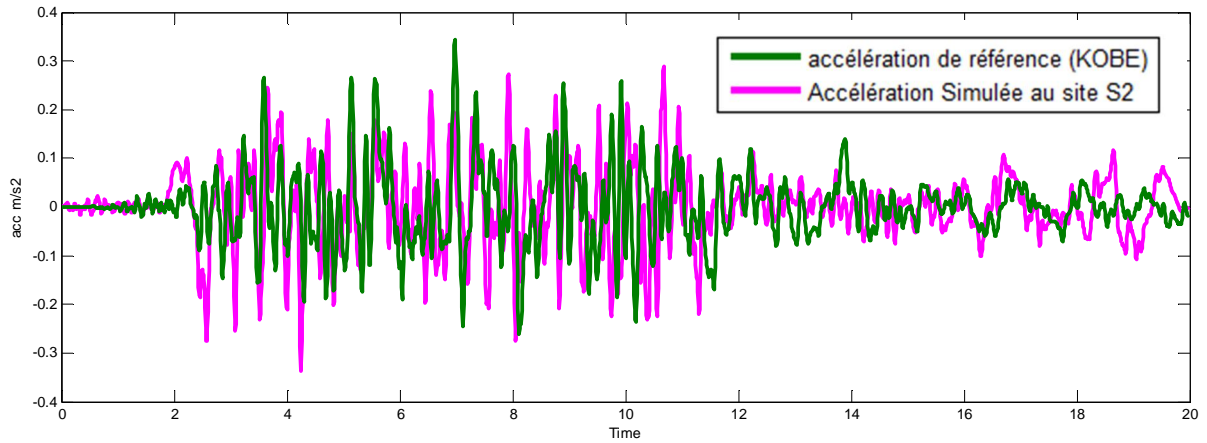


Figure 4-21 Accélération simulé et Accélération du seisme de KOBE

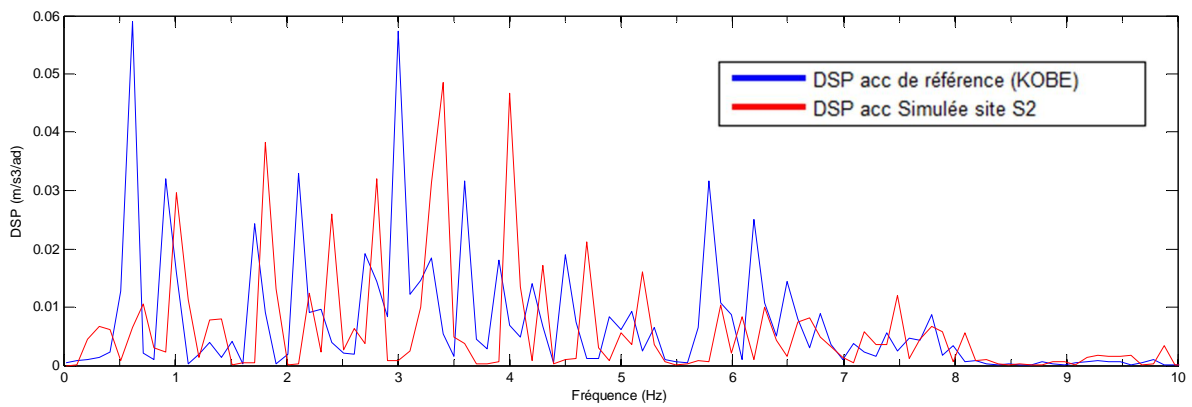


Figure 4-22 Les densités spectrale de puissance des évolutions temporelles des accélérations simulée et de référence pour un site Ferme

Station n°3 : Site Meuble

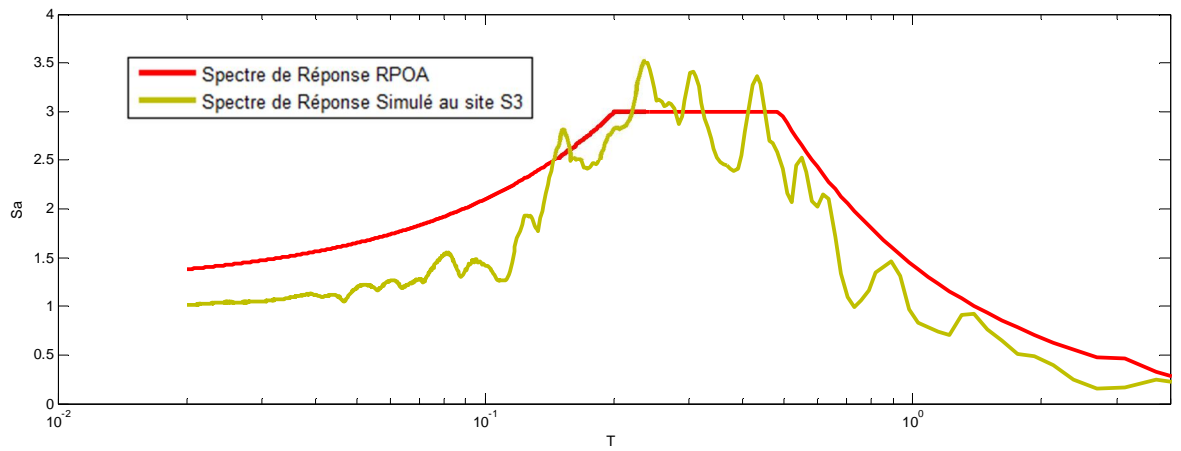


Figure 4-23 Spectre de réponse Simulé et celui du RPOA S3

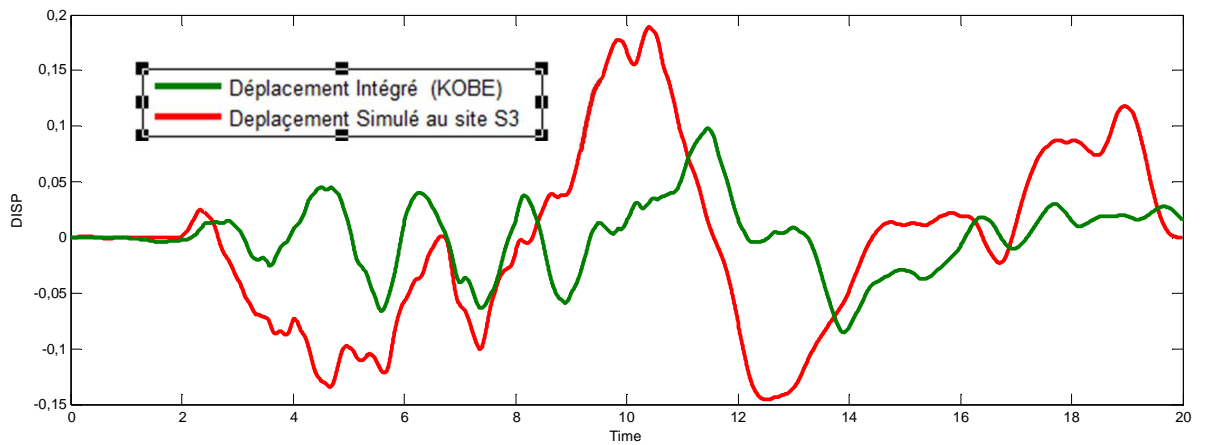


Figure 4-24 Déplacement simulé à la station 3 et le déplacement intégré du séisme de KOBE

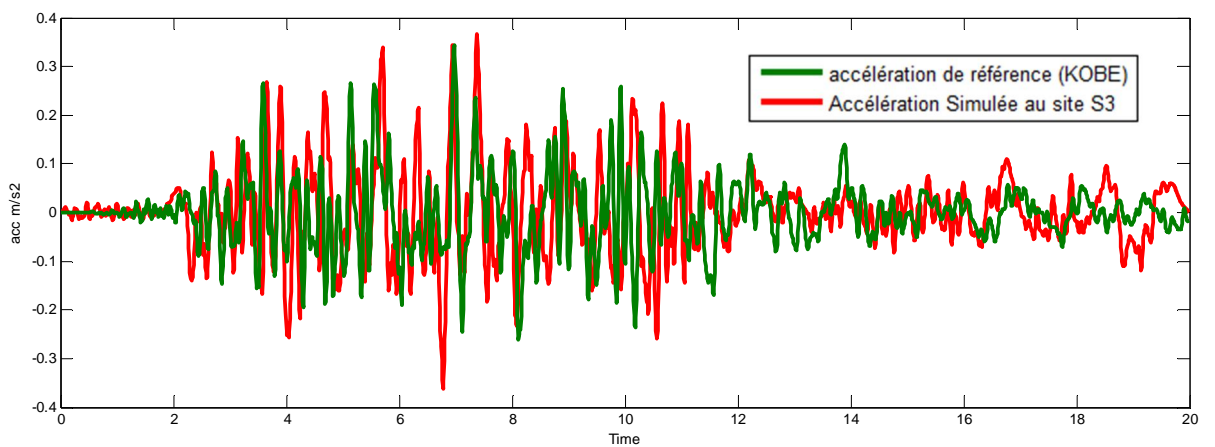


Figure 4-25 Accélération simulé et Accélération du séisme de KOBE

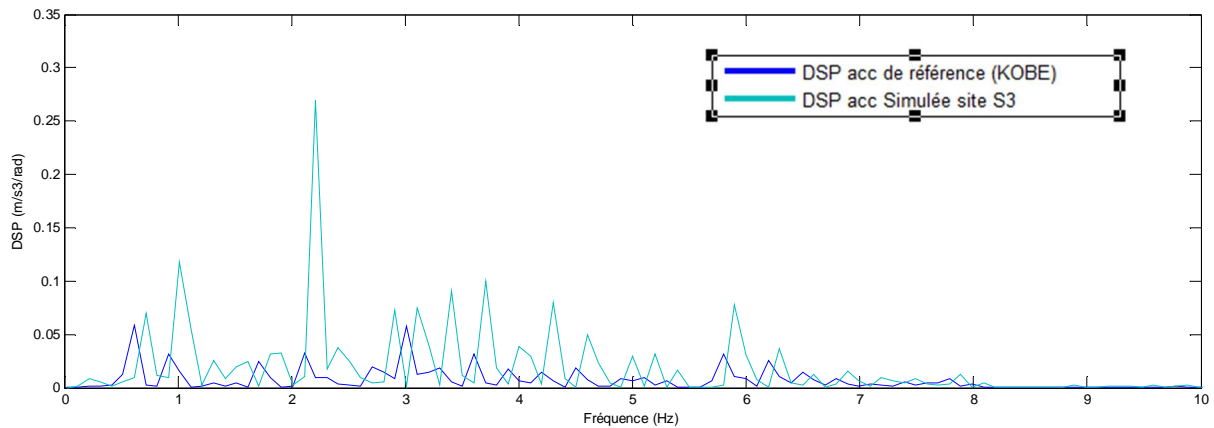


Figure 4-26 Les densités spectrales de puissance des évolutions temporelles des accélérations simulée et de référence pour un site Meuble

Les densités spectrales de puissance représentées dans les figures 4-18, 4-22 et 4-26, démontrent que la procédure de génération ne modifie pas le contenu fréquentiel du signal de référence.

Les figures 4-15, 4-19 et 4-23 représentent une comparaison entre les spectres de réponses calculés à partir des accélérations simulées avec les spectres réglementaires du RPOA respectivement pour les sites Rocheux, Ferme et Meuble. Ces Figures montrent une bonne compatibilité des spectres de réponses obtenus par la simulation avec les spectres du RPOA pour chaque profil de sol. Malgré ça, la compatibilité ne se vérifie pas pour toutes les périodes, et surtout pour les faibles périodes où le schéma itératif est défaillant en raison d'absence de fréquences au-delà de 10 Hz. Autrement dit, on peut voir des représentations de la DSP que le contenu fréquentiel des signaux d'accélération est compris entre 0.1 et 10 Hz, donc le schéma itératif ne peut pas corriger la gamme des hautes fréquences ou des faibles périodes.

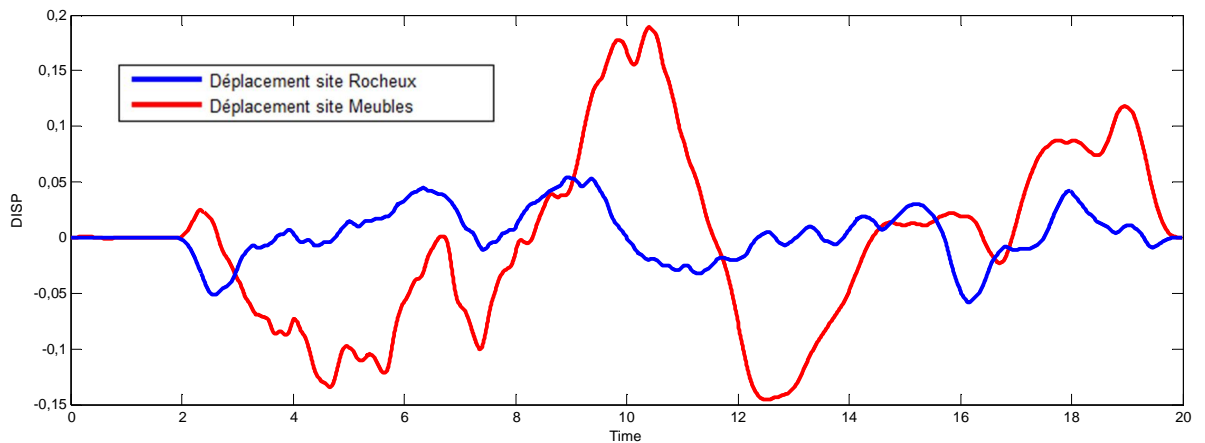


Figure 4-27 Comparaison entre le déplacement obtenu sur un site rocheux à celui d'un site meuble

La figure 4-27 montre une Comparaison entre les évolutions temporelles du support 1 et 3. On peut voir clairement l'effet de site s'illustré ici.

4.7 OBSERVATIONS ET RECOMMANDATIONS

1. Comme le processus de génération est un processus aléatoire il est recommandé de refaire plusieurs fois la simulation pour avoir des résultats concluants.
2. Il ne faut pas beaucoup d'itérations pour atteindre la compatibilité, deux à trois itérations généralement suffisent.

5 CONCLUSION

Divers méthodes sont offerte à l'ingénieur afin d'estimer la réponse dynamique d'une structure sous sollicitation sismique, dont la méthode statique équivalente, analyse spectrale et analyse dynamique temporelle linéaire ou non linéaire. Pour les structures stratégiques comme les ponts, les centrales nucléaires, barrages, etc., une analyse dynamique temporelle non linéaire s'impose. Dans ce cas, on a recours à de base de données d'enregistrement des signaux sismiques, pour choisir une évolution temporelle de l'excitation sismique qui peut représenter au mieux la sismicité de la région et les profils géologiques du site. Mais ces signaux enregistrés ne sont pas toujours disponibles ou appropriés pour le site du projet. Alors on a recours à générés artificiellement les évolutions temporelles.

Les enregistrements de l'accélération des tremblements de terre ont confirmé une certaine variabilité spatiale des ondes sismique. Il devient nécessaire de fournir aux ingénieurs des excitations sismiques appropriés sous forme d'évolutions temporelles afin de prendre en compte la variabilité spatiale. Actuellement, on a à notre disposition plusieurs bases de données des enregistrements des tremblements de terre. En plus du fait que ces enregistrements ne sont pas toujours compatibles aux spectres de réponses des codes parasismiques, généralement ils ne présentent aucune cohérence entre eux. Donc le développement de méthodes de génération artificielle des évolutions temporelles de l'accélération.

L'approche proposée permet de générer des évolutions temporelles non stationnaire variables dans l'espace et compatibles aux spectres de réponses cibles. Dans cette étude, on a atteint quelques objectifs fixés au départ dont par exemple :

1. Générer artificiellement des évolutions temporelles sans les problèmes d'intégrabilités et cela à partir d'enregistrements réels d'accélération non corrigés.
2. Conserver les caractéristiques physiques des enregistrements de référence.
3. Préserver le contenu fréquentielles des enregistrements réels lors de la simulation des signaux variables dans l'espace.
4. Générer, à partir d'un même enregistrement de référence, plusieurs évolutions temporelles compatibles à différent profil de sol (spectres réglementaires)
5. Modéliser la non stationnarité des signaux sismiques sans avoir recours aux fonctions de modulation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abrahamson, N., Scheider J. and Stepp, J., "Empirical Spatial Coherency Functions for Applications to Soil-Structure Interaction Analyses". Earthquake Spectra, v7, 1991, p. 1-27.
- Aki, K., and P. G. Richards (1980). Quantitative Seismology: Theory and Methods, Vol. I, W. H. Freeman and Co., New York, 557 pp.
- Benmansour, N (2013) Effet de la variabilité spatiale du mouvement sismique sur le comportement dynamique des ponts. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie
- Beresnev, I. A., and G. M. Atkinson (1997). Modeling finite fault radiation from the x n spectrum, Bull. Seism. Soc. Am. 87, 67–84.
- Biot.M.A. "A Mechanical Analyzer for Prediction of Earthquake Stresses," Bull. Seism.Soc. Am., Vol. 31, 151-171, 1941.2-2
- Biot.M.A. "Analytical and Experimental Methods in Engineering Seismology," Proc. ASCE68, 49-69, 1942).
- Bolt, B. A., "Duration of Strong Motion," Proc.4th World Conf. Earthquake Eng., 1304-1315,Santiago, Chile, 1969.
- Cacciola.P & Deodatis.G, A method for generating fully non-stationary and spectrum-compatible ground motion vector processes
- Cacciola.P, Deodatis.G, A method for generating fully non-stationary and spectrum-compatible ground motion vector processes.
- Cacciola.P, Zentner.I, Generation of response-spectrum-compatible artificial earthquake accelerograms with random joint time–frequency distributions
- Carlos Enrique Peña Ramos, Three Dimensional Dynamic Response Of Reinforced Concrete Bridges Under Spatially Varying Seismic Ground Motions, Ph.D. Thesis THE UNIVERSITY OF ARIZONA 2011
- Chopra.A.K., Dynamics of Structures, A Primer, Earthquake Engineering Research institute, Berkeley, CA, 1981.
- Clough, R. W. and Penzien, J., Dynamics of Structures, McGraw-Hill, New York, 1993.
- Conte, J. P., Pister, K.S. and Mahin, S.A. (1992). "non-stationary ARMA Modeling of Seismic Motions," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 11, pp. 411-426.

- Cornell, C. (1960) "Stochastic Process Models in Engineering," Technical Report No. 34, Department of Civil Engineering, Stanford University.
- Deodatis, G. (1996). "non-stationary Stochastic Vector Processes: Seismic Ground Motion
- Deodatis, G. and Shinozuka, M. (1988). "Auto-Regressive Model for non-stationary Stochastic Processes," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 114, No. 11, pp. 1995-2012
- Der Kiureghian, A., "Coherence Model for Spatially Varying Ground Motions". *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*", v25, n1, Jan 1996, p. 99-111.
- Elghadamsi, F. E., Mohraz, B., Lee, C. T., and Moayyad, P., "Time Dependent Power Spectral Density of Earthquake Ground Motion," *Int. J. Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 7, No. 1, 15-21, 1988.
- Fenton, G.A. and Vanmarcke E.H. (1990) "Simulation of Random Fields via Local Average Subdivision," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 116, No. 8, pp. 1733-1749.
- Gasparini, D. A., and E. H. Vanmarcke (1979). Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra, *Evaluation of Seismic Safety of Buildings Report No. 2*, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 99 pp.
- Gersch, W. and Yonemoto, J. (1977). "Synthesis of Multi-Variate Random Vibration Systems: A Two-Stage Least Squares ARMA Model Approach," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 52, No. 4, pp. 553-565.
- Harichandran RS, Hawwari A, Sweidan BN. Response of long-span bridges to spatially varying ground motion. *Journal of Structural Engineering (ASCE)* 1996;122:476–84.
- Harichandran, R. and Vanmarcke, E., "Stochastic Variation of Earthquake Ground Motion in Space and Time". *Journal of Engineering Mechanics*, v112, n2, 1986, p. 154-174.
- Hartzell, S. H. (1978). Earthquakes aftershocks as Green's Functions, *Geophys. Res. Lett.* 5, 1–4.
- Hartzell, S. H., M. Guatteri, P. M. Mai, P.-C. Liu, and M. Fisk (2005). Calculation of Broadband Time Histories of Ground Motion, Part II: Kinematic and Dynamic Modeling Using Theoretical Green's Functions and Comparison with the 1994 Northridge Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.* 95, no. 2, 614–645.
- Housner, G. W. and Jennings, P.C. (1990). "P.C. Generation of Artificial Earthquakes," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 90, pp. 113-150.

- Housner, G. W., "An Investigation of the Effects of Earthquakes on Buildings," Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1941.
- International Code Council, Inc., International Building Code". 2009 Edition.
- Irikura, K. (1983). Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, Bull. Disaster Prevention Res. Inst., (Kyoto Univ.), 33, 63–104.
- Kanai, K., "Semi-Empirical Formula for the Seismic Characteristics of the Ground," Bull. Earthquake Research Institute, Vol. 35, University of Tokyo, Tokyo, Japan, 309-325, 1957.
- Karmakar, D., Ray-Chaudhuri, S. & Shinozuka, M. Seismic response evaluation of retrofitted Vincent Thomas bridge under spatially variable ground motions
- Kaul, M. K. (1978). Spectrum-consistent time-history generation, J. Eng. Mech. Division 104, no. ME4, 781–788.
- Komatitsch, D., Q. Liu, J. Tromp, P. Su'ess, C. Stidham, and J. H. Shaw (2004). Simulations of ground motion in the Los Angeles basin based upon the spectral-element method, Bull. Seism. Soc. Am. 94, 187–206.
- Kozin, F. (1988). "Auto-Regressive Moving-Average Models of Earthquake Records," Journal of Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 3, No. 2, pp. 58-63.
- Kristek, J., and P. Moczo (2003). Seismic-wave propagation in viscoelastic media with material discontinuities: a 3D fourth-order staggered-grid finite-difference modeling, Bull. Seism. Soc. Am. 93, 2273–22.
- Laouami, N. and Labbe, P., "Analytical Approach for Evaluation of the Seismic Ground Motion Coherency Function". Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v21, n8, Dec 2001, p. 727-733.
- Liang J, Ray-Chaudhuri S, Shinozuka M. Simulation of nonstationary stochastic processes by spectral representation. Journal of Engineering Mechanics (ASCE) 2007;133(6):616–27.
- Liao, S. Physical. Characterization of Seismic Ground Motion Spatial Variation and Conditional Simulation for Performance-Based Design. Ph.D. Thesis Drexel University 2006
- Lin, Y. K. (1965). "non-stationary Excitation and Response in Linear Systems Treated as Sequence of Random Pulses," Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 38, pp. 453-460.
- McCann, W. M. and Shah, H. C., "Determining Strong-Motion Duration of Earthquakes," Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 69, No. 4, 1253-1265, 1979.

- Mignolet, M.P. and Spanos, P-T.D. (1987a). "Recursive Simulation of Stationary Multi-Variate Random Processes. Part I," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 54, No. 3, pp. 674-680.
- Mignolet, M.P. and Spanos, P-T.D. (1987b). "Recursive Simulation of Stationary MultiVariate Random Processes. Part II," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 54, No. 3, pp. 681-687.
- Moayyad.P & Mohraz, B., "A Study of Power Spectral Density of Earthquake Accelerograms," NSF Report PFR 8004824, Civil and Mechanical Engineering Dept., Southern Methodist University,Dallas, TX, 1982.
- MTP Règles parasismiques applicables au domaine des ouvrages d'art (RPOA). Ministère des Travaux Publics, Alger, 2010.
- Naiem, F., and M. Lew (1995). On the use of design spectrum compatible time histories, *Earthquake Spectra* 11, no. 1, 111–127.
- Nau, R. F., R. M. Oliver, and K. S. Pister (1982). Simulating and analysing artificial nonstationary earthquake ground motions, *Bull. Seism. Soc.Am.* 72, 615–636.
- Page, R. A., Boore, D. M., Joyner, W. B., and Caulter, H. W., "Ground Motion Values for Use in the Seismic Design of the Trans-Alaska Pipeline System," USGS Circular 672, 1972
- Polhemus, N. W. and Cakmak, A. S. (1981). "Simulation of Earthquake Ground Motions using ARMA Models," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 9, pp. 343-354.
- Pousse.G, Bonilla.L.F, Cotton.F, and Margerin.L. Nonstationary Stochastic Simulation of Strong Ground Motion Time Histories Including Natural Variability: Application to the K-Net Japanese Database *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 6, pp. 2103–2117, December 2006
- Rachedi.m Boukli Hacene.i Djafour.m Benmansour.n. Un Logiciel de Traitement de Signal Sismique "RisAM signal" XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.
- Ruiz, P. and Penzien J. (1971). "Stochastic Seismic Response of Structures," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 97, pp. 441-456.
- Saragoni, G. R., and G. C. Hart (1974). Simulation of artificial earthquakes,*Earthquake Eng. Soil Dyn.* 2, 249–267.
- Saxena V, Deodatis G, Shinozuka M, Feng MQ. Development of Fragility Curves for Multi-Span Reinforced Concrete Bridges, *Proceedings of the International Conference on Monte Carlo Simulation*, Principality of Monaco, 2000.

- Schneider, J. F., W. J. Silva, and C. Stark (1993). Ground motion model for the 1989 M 6.9 Loma Prieta earthquake including effect of source, path and site, *Earthquake Spectra* 9, 251–287.
- Shinozuka M., Deodatis G., Simulation of multi-dimensional Gaussian stochastic fields by spectral representation, *Applied Mechanics Review*, ASME, 1996; Vol. 49 (1): 29-53.
- Shinozuka, M. (1973). "Digital Simulation of Random Processes in Engineering Mechanics with the Aid of FFT Technique," *Stochastic Problems in Mechanics*, (Eds. S. T. Ariaratnam and H. H. E. Leipholz), University of Waterloo Press, Waterloo, pp. 277-286.
- Shinozuka, M. (1987). "Stochastic Fields and Their Digital Simulation," *Stochastic Methods in Structural Dynamics*, (Eds. G. I. Schueller and M. Shinozuka), Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, pp. 93-133.
- Shinozuka, M. and Deodatis, G. (1991). "Simulation of Stochastic Processes by Spectral Representation," *Applied Mechanics Reviews*, ASME, Vol. 44, No. 4, pp. 191-204.
- Shinozuka, M. and Jan, C-M. (1972). "Digital Simulation of Random Processes and its Applications," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 25, No. 1, pp. 111-128.
- Shinozuka.M. & Deodatis.G. Stochastic process models for earthquake ground motion. *J. Probabilistic Engng Mech.*, 3 (1988) 114-23.
- Tajimi, H., "A Statistical Method of Determining the Maximum Response of a Building Structure During an Earthquake," *Proc. 2nd World Conf. Earthquake Eng.*, Vol. II, 781-797, Tokyo, Japan, 1960.
- The seismic Design Handbook 2nd ed. 2001, XXVIII, 830 p. ISBN 978-1-4615-1693-4
- Trifunac, M. D. and Brady, A. G., "A Study of the Duration of Strong Earthquake Ground Motion," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 65, 581-626, 1975.
- Vanmarcke, E. H. Representation of earthquake ground motion: scaled accelerograms and equivalent response spectra, *State-of-the-Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States*, Report 14, Miscellaneous Paper S-73-1. U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.
- Yufeng Gao, Yongxin Wu, Dayong Li, Hanlong Liu, Ning Zhang An improved approximation for the spectral representation method in the simulation of spatially varying ground motions
- Zeng, Y., J. G. Anderson, and G. Yu (1994). A composite source model for computing realistic strong ground motions, *Geophys. Res. Lett.* 21, 725–728.

Zerva A, Zervas V., Spatial variation of seismic ground motions: an interview, Applied Mechanics Review, ASME, 2002; Vol. 55 (3): 271-297.

Zerva, A. (2009). Spatial variation of seismic ground motions: modeling and engineering applications, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-8493-99299.