

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique
Université Hassiba Benbouali de Chlef
Faculté de Génie Civil et d'Architecture
Département de Génie civil



Mémoire de Master

Filière : Génie civil

Spécialité : Génie Parasismique

Thème

Simulation d'accélérogrammes pour l'étude des réponses sismiques des sols et des structures

Présenté par :

DAMOU Houaria

Dirigé par :

Prof. HARICHANE Zamila

Mr. REBOUH Redouane

Année universitaire : 2015 - 2016

DEDICACES

A ma très chère mère HOURIA

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

A la mémoire de :

Mon Père Abdallah ; avec lequel je n'aurais le plaisir de partager cet évènement, mais qui est et qui demeurera dans mon cœur à jamais. Ce modeste travail est le fruit de tes efforts et tes sacrifices consentis pour mon éducation et ma formation. J'espère je serai à la hauteur des valeurs que tu as semé en nous.

Celle que je pleure et que je pleurerai à tout jamais, tu me manques et la vie sans toi est fade. Difficile de prononcer ton prénom, SALIMA, la blessure est toujours béante.

Afin d'être reconnaissante

Envers ceux qui m'ont appuyée et encouragée à effectuer ce travail de recherche. Pour tous vos sentiments d'affection et d'amour, pour votre soutien moral, pour tous vos efforts, je vous dédie ce modeste travail :

Mes sœurs Fatma Zohra et Faïza

Tata Yamna

Cher aimable Abderrazek

A tous ceux que ma réussite leur tient à cœur.

Remerciements

ALLAH ; MERCI pour tous vos dons ; foi, santé et courage....

Mes Chers Professeurs : Mme HARICHANE ET Mr GHRISSI

Je tiens à vous remercier d'avoir cru en mes capacités, pour le temps et la patience que vous m'avez accordés, pour votre gentillesse et vos précieux conseils, pour votre encouragement tout au long de ces années et pour la confiance que vous m'avez témoignée.

Je vous adresse mes remerciements les plus sincères pour votre disponibilité, pour tout ce que vous m'avez donné et pour tous vos efforts pour bien assurer la direction et l'encadrement de mes travaux de mémoire. J'ai beaucoup apprécié travailler à vos côtés tant sur le plan scientifique que sur le plan humain.

Votre sérieux, vos compétences et votre sens du devoir m'ont énormément marqués. Veuillez trouver ici l'expression de ma respectueuse considération. Ce travail est pour moi l'occasion de vous témoigner ma profonde gratitude.

*Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de ce mémoire, particulièrement,
Dr BOUKHATEME, Mr REBOUH et Prof KARRAY ...*

Mes sincères et profonds remerciements vont aussi aux membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont faite en acceptant de juger ce modeste travail.

Pour vos qualités humaines, vos encouragements illimités, pour votre aide et votre soutien Un très grand MERCI à vous, Mes chères amies, pour nos innombrables moments avec mes meilleurs souhaits de réussite dans la vie professionnelle et personnelle.

Résumé

Les accélérogrammes jouent un rôle important dans l'analyse dynamique non linéaire des structures isolées. Vu leur indisponibilité par manque des enregistrements à proximité des projets ou l'incompatibilité des signaux sismiques existant, Le recours à la génération des accélérogrammes est primordiale.

Plusieurs méthodes ont été développées à ce jour ; telle que la méthode de représentation spectrale qui est un processus stochastique stationnaire à moyenne nulle, unidimensionnel avec une fonction de densité spectrale qui peut être simulée 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).

Cette approche est utilisée pour réaliser un programme sous MATLAB pour la génération des accélérogrammes en surface de site.

Les résultats obtenus par ce programme pour la réponse des sols sont validés par le logiciel FLAC.

Une étude de la réponse sismique d'une structure a été réalisée en vue de l'exploitation des résultats.

Mots clés : accélérogramme ; simulé ; PSD ; FLAC ; fonction d'amplification ; réponse sismique ; signaux sismique

Abstract

Time history has an important role in the nonlinear dynamic analysis of the isolated structures. given their unavailability due to the recordings lack near projects area or the incompatibility of the existing seismic signals, Using the generation of accelerograms is primordial.

Several methods have been developed, until today, such that the spectral representation method which is a one-dimensional stationary stochastic process with zero mean and a spectral density function which can be simulated as the sum of a large number of orthogonal trigonometric functions. This procedure can be implemented very efficiently using the fast Fourier transform (FFT).

This approach is used to create a program under MATLAB for seismic ground motion generation.

The obtained results by this program for soil response are validated by the FLAC software.

A structure seismic response study was carried out for results exploitation.

Keywords: time history; simulated; PSD; FLAC; amplification funtion ; seismic response; ground motion.

ملخص

الاثارة الزلزالية تلعب دورا هاما في التحليل الديناميكي غير الخطي للهياكل المعزولة. ونظرا لعدم توفر هذه التسجيلات بالقرب من أماكن المشاريع أو عدم توافقها مع الإشارات الزلزالية الموجودة، فإن محاكاة الاثارة الزلزالية هو الهدف الأسمى.

عدة طرق قد وضعت حتى الآن؛ ومن بينها طريقة تمثيل الأطياف وهي عملية ستوكاستيكية ثابتة ذات وسط منعدم وبعد واحد، ووظيفة الكثافة الطيفية التي يمكن محاكاتها كمجموع المرجحة لعدد كبير من الدوال المثلية المتعامدة. ويمكن تنفيذ هذا الإجراء بكفاءة عالية باستخدام تحويل فورييه السريع (FFT).

ويستخدم هذا الأسلوب لإنشاء برنامج تحت MATLAB لتوليد حركة الأرض الزلزالية.

يتم التحقق من صحة النتائج المحصل عليها بواسطة هذا البرنامج في دراسة استجابة التربة بواسطة برنامج FLAC.

وللاستغلال النتائج السابقة يتم ادراجها في الدراسة استجابة الهياكل ضد الحركة الزلزالية.

كلمات المفتاحية: الاثارة الزلزالية، مقلد، الإشارات الزلزالية، وظيفة التضخيم؛ الإشارات الزلزالية، استجابة الزلزالية

Table des Matières

| | |
|--------------------|------|
| Dédicaces | i |
| Remerciements | ii |
| Résumés | iii |
| Table des Matières | vi |
| Liste des Figures | x |
| Liste des Tableaux | xiii |

Introduction Générale

| | |
|-------------------------------|---|
| 1. Introduction | 2 |
| 2. Problématique et objectifs | 3 |
| 3. Organisation du manuscrit | 4 |

Chapitre 1 : Recherche Bibliographique

| | |
|--|----|
| 1.1. Introduction | 5 |
| 1.2. Action sismique | 5 |
| 1.3. Analyse des structures sous l'action sismique | 6 |
| 1.3.1. Méthode statique | 7 |
| 1.3.2. Méthodes dynamiques | 7 |
| 1.3.2.1. Méthode d'analyse par spectre de réponse | 8 |
| 1.3.2.2. La méthode d'Analyse par Accélérogrammes | 8 |
| 1.4. La nécessité d'accélérogrammes | 9 |
| 1.5. Source des accélérogrammes | 10 |
| 1.5.1. Les accélérogrammes réels | 10 |
| 1.5.2. Les accélérogrammes artificiels | 12 |

| | |
|--|----|
| 1.5.3. Les accélérogrammes synthétiques | 13 |
| 1.6. Les modèles de simulation des mouvements sismiques | 13 |
| 1.6.1. Simulation d'un processus aléatoire de base | 14 |
| 1.6.2. Simulation d'un processus homogène multidimensionnel | 15 |
| 1.6.3. Simulation des processus homogènes multidimensionnels multivariés | 15 |
| 1.6.4. Simulation des procédés non homogènes multidimensionnels | 16 |
| 1.7. Aperçu sur les modèles stochastiques des mouvements sismiques | 17 |
| 1.7.1. Le modèle Boore | 18 |
| 1.7.2. Le modèle de Kanai-Tajimi | 19 |
| 1.7.3. Les modèles PSD évolutionnaires | 20 |
| 1.7.3.1. Quelques éléments théoriques | 21 |
| 1.7.3.2. Le Modèle Kanai-Tajimi évolutionnaire | 20 |
| 1.7.3.3. La variabilité spatiale de mouvement | 21 |
| 1.8. Les logiciels de simulation des mouvements sismiques | 22 |
| 1.8.1. Le logiciel Simqke | 22 |
| 1.8.2. Le logiciel Simqke II | 22 |
| 1.8.3. Le code TARSC THS | 23 |
| 1.8.4. Le logiciel RspMatch | 23 |
| 1.8.5. Le logiciel SMSIM (Stochastic-Method SIMulation) | 23 |
| 1.9. Conclusion | 24 |

Chapitre 2: Modèle de Simulation DES Mouvements

Sismiques

| | |
|---|----|
| 2.1. Introduction | 26 |
| 2.2. Théorie de propagation d'ondes et les effets de site | 26 |
| 2.2.1. Propagation des ondes sismiques dans les Sols | 27 |

| | |
|--|----|
| 2.2.2. Hypothèses sur le mouvement | 27 |
| 2.2.3. Fonctions de transfert | 30 |
| 2.2.4. Effets de site | 30 |
| 2.2.4.1. Types d'effets de site | 30 |
| 2.2.4.2. Prise en compte des effets de site par les règlements | 31 |
| 2.3. Modèles de la densité spectrale de puissance | 32 |
| 2.4. Densité spectrale en surface d'un dépôt de sol | 33 |
| 2.5. Simulation des mouvements sismiques | 33 |
| 2.5.1. Simulation des mouvements sismiques à la base | 34 |
| 2.5.2. Simulation des mouvements sismiques à la surface | 35 |
| 2.6. La Fonction de modulation (enveloppe) | 36 |
| 2.7. Identification des paramètres sismiques | 39 |
| 2.8. Conclusion | 40 |

Chapitre 3: Logiciel et Programme Utilisés

| | |
|---|----|
| 3.1. Introduction | 42 |
| 3.2. Le logiciel FLAC | 42 |
| 3.2.1 Description | 42 |
| 3.2.2 Les Considérations à prendre pour la Modélisation Dynamique | 42 |
| 3.2.3 Le Chargement Dynamique et les Conditions aux Limites | 43 |
| 3.2.4 L'Amortissement Mécanique | 44 |
| 3.2.5 Transmission d'Ondes à travers le Modèle | 46 |
| 3.3. Le Programme Réalisé | 46 |
| 3.4. Conclusion | 48 |

Chapitre 4: Réponses Sismiques des Sites

| | |
|---|----|
| 4.1. Introduction | 50 |
| 4.2. Descriptions des Sites Etudiés | 50 |
| 4.3. Fonctions d'Amplification des Sites Etudiés | 52 |
| 4.4. Fonctions de Densité Spectrale de Puissance en Surface des Sites Etudiés | 57 |
| 4.5. Conclusion | 60 |

Chapitre 5: Amplifications des mouvements sismiques et réponses sismique des structures

| | |
|---|----|
| 5.1. Introduction | 62 |
| 5.2. Réponse Sismique des Sols au moyen du Logiciel FLAC | 62 |
| 5.3. Simulation des Mouvements Sismiques : | 64 |
| 5.3.1. A l'affleurement Rocheux | 64 |
| 5.3.2. En Surfaces de Sols | 64 |
| 5.4. Comparaison des Mouvements Simulés avec des Accélérogramme Réels | 67 |
| 5.5. Réponses Sismiques de Structures aux Mouvements Simulés et Enregistrés | 69 |
| 5.5.1. Identification de la structure | 69 |
| 5.5.2. Réponses Sismiques de Structures aux Mouvements Enregistrés | 71 |
| 5.6. Conclusion | 73 |

Conclusion Générale et Recommandation

| | |
|----------------------------|----|
| 1. Conclusions Générales | 75 |
| 2. Recommandations futures | 75 |

Références bibliographiques

76

Liste des Figures

| N° de la figure | Titre de la figure | Page |
|-----------------|--|------|
| Figure 1.1 | Action du tremblement de terre sur une structure de bâtiment | 5 |
| Figure 1.2 | Enregistrement du mouvement du sol | 6 |
| Figure 1.3 | Accélération spectrale à la première période naturelle de Structure | 7 |
| Figure 1.4 | Accélération spectrale à toutes les périodes naturelles efficaces de Structure | 8 |
| Figure 1.5 | Dynamique linéaire | 9 |
| Figure 1.6 | Dynamique non linéaire | 9 |
| Figure 1.7 | Accélérations en champs libre du séisme de Boumerdès 2003 au niveau du sol du site de Keddara (Station 1). | 11 |
| Figure 1.8 | <i>Signaux sismiques simulés par la méthode Gasparini & Vanmarcke (1976) Signaux obtenus par le logiciel SeismoArtif (Cacciola et al 2012)</i> | 12 |
| Figure 1.9 | Simulations d'accélération du sol pour la zone des sols mous à Mexico (Barranco-Cecilia, 2000). | 13 |
| Figure 1.10 | Spectre de Fourier du tremblement de terre El Centro | 17 |
| Figure 1.11 | Densité Spectrale de Puissance du tremblement de terre El Centro | 17 |
| Figure 1.12 | Observation de la variabilité spatiale des signaux sismiques (<i>Kaiming, 2012</i>) | 22 |
| Figure 2.1 | Profil de sol soumis à la propagation d'une onde de cisaillement à propagation verticale | 28 |
| Figure 2.2 | Déplacement associé aux ondes S (SV, SH) (Wolf, 1985) | 29 |
| Figure 2.3 | Amplification géométrique du sol (<i>Harichane, 2013</i>) | 30 |
| Figure 2.4 | Schématisation des effets de sites. | 31 |
| Figure 2.5 | Fonction de modulation donnée par Jennings et al (1968) | 37 |
| Figure 2.6 | Effet de la fonction de modulation sur un processus stationnaire | 38 |
| Figure 2.7 | La fonction de la densité spectrale de puissance (<i>Somerville et al. 1997</i>) | 40 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figure 3.1 | Les différentes étapes d'un calcul dynamique avec le logiciel FLAC ^{2D} (Bourdeau, 2005) | 43 |
| Figure 3.2 | Domaine des fréquences prédominantes pour un signal dynamique (D'après Itasca Optional Features, 2005). | 45 |
| Figure 3.3 | Organigramme du programme numérique réalisé. | 47 |
| Figure 4.1 | Fonction d'amplification du site de l'Hussein Dey | 53 |
| Figure 4.2 | Fonction d'amplification du site de Kouba | 54 |
| Figure 4.3 | Fonction d'amplification du site de Dar el Beida | 55 |
| Figure 4.4 | Fonction d'amplification du site de Boumerdès | 56 |
| Figure 4.5 | La DSP Simulée en surface pour le site de l'Hussein Dey | 58 |
| Figure 4.6 | La DSP Simulée en surface pour le site de Kouba | 58 |
| Figure 4.7 | La DSP Simulée en surface pour le site de Dar el Beida | 59 |
| Figure 4.8 | La DSP Simulée en surface pour le site de Boumerdès | 59 |
| Figure 5.1 | <i>Modélisation du dépôt de sol en FLAC</i> | 62 |
| Figure 5.2 | <i>Excitation à la base du dépôt (FLAC)</i> | 62 |
| Figure 5.3 | <i>Réponse dynamique du dépôt (FLAC)</i> | 62 |
| Figure 5.4 | <i>Accélérogramme simulé à l'affleurement rocheux de Keddara</i> | 64 |
| Figure 5.5 | <i>Accélérogramme simulé en surface du site de l'Hussein Dey</i> | 65 |
| Figure 5.6 | <i>Accélérogramme simulé en surface du site de Kouba</i> | 65 |
| Figure 5.7 | <i>Accélérogramme simulé en surface du site de Dar el Beida</i> | 66 |
| Figure 5.8 | <i>Accélérogramme simulé en surface du site de Boumerdès</i> | 66 |
| Figure 5.9 | <i>Accélérogrammes simulé et réel du site rocheux de Keddara</i> | 67 |
| Figure 5.10 | <i>Accélérogrammes simulé et réel en surface du site de l'Hussein Dey</i> | 67 |
| Figure 5.11 | <i>Accélérogrammes simulé et réel en surface du site de Kouba</i> | 68 |
| Figure 5.12 | <i>Accélérogrammes simulé et réel en surface du site de Dar el Beida</i> | 68 |
| Figure 5.13 | <i>Accélérogrammes simulé et réel en surface du site de Boumerdès</i> | 69 |
| Figure 5.14 | <i>Vue en 3-D du bâtiment considéré.</i> | 70 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figure 5.15 | <i>Vue en plan du bâtiment considéré.</i> | 70 |
| Figure 5.16 | <i>déplacement latéraux du bâtiment dans les deux cas d'excitations Simulées et réelles.</i> | 71 |
| Figure 5.17 | <i>déplacement du bâtiment du à l'excitation simulée.</i> | 72 |
| Figure 5.18 | <i>déplacement du bâtiment du à l'excitation réelle</i> | 72 |

Liste des Tableaux

| N° du tableau | Titre du tableau | Page |
|----------------------|--|-------------|
| Tableau 2.1 | Classification des sites selon le RPA99/version 2003.d | 32 |
| Tableau 4.1 | Propriétés de sol du site de l'Hussein Dey | 50 |
| Tableau 4.2 | Propriétés de sol du site de Kouba | 51 |
| Tableau 4.3 | Propriétés de sol du site de Dar el Beida | 51 |
| Tableau 4.4 | Propriétés de sol du site de Boumerdès | 51 |
| Tableau 4.5 | Amplitudes et fréquences des fonctions d'amplification des sites étudiés pour un coefficient d'amortissement de 7% | 57 |
| Tableau 4.6 | Amplitudes et fréquences des densités spectrales de puissance des sites étudiés pour un coefficient d'amortissement de 7% dans le cas d'un affleurement rocheux. | 60 |

Introduction Générale

1. Introduction

Dans un monde en pleine croissance démographique et développement industriel et d'urbanisation, le risque d'avoir des dégâts et dommages importants à la suite de survenance des séismes s'accroît tant sur le plan humain et matériel. Donc, la démarche de prévention de tels risques repose sur la connaissance de deux facteurs. La probabilité d'occurrence des tremblements de terre dans un endroit donné, qui est le travail du sismologue. L'autre facteur est lié à l'aspect technique de la construction des structures qui repose sur la connaissance du comportement des structures sous l'effet des sollicitations sismiques.

Deux méthodes sont possibles pour l'analyse dynamique des structures : la méthode statique et la méthode dynamique, cette dernière est utilisée pour le calcul non linéaire des structures isolées ; elle nécessite des programmes numériques ainsi que des accélérogrammes.

Les méthodes et les logiciels sont disponibles, y compris : SAP 2000, ETAPS ... Par contre, les accélérogrammes ne sont pas toujours disponibles ou ne répondent pas aux exigences souhaitées. Donc, la simulation des accélérogrammes synthétiques et artificiels est la solution pour remédier à ce problème. Bien que nous trouvions plusieurs chercheurs se sont intéressés à ce sujet.

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).

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.

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).

Dans ce travail, on utilise la notion de cette fonction de densité spectrale de puissance pour la génération des accélérogrammes en surface des sols qui peuvent être utilisés pour l'étude des réponses sismiques des sols et des structures.

2. Problématique et Objectifs

La majorité des codes parasismiques dans le monde permettent d'effectuer le calcul dynamique pour l'analyse sismique des structures avec l'utilisation d'accélérogrammes comme excitations.

Ces accélérogrammes, qui sont des accélérations des particules de sol en fonction du temps, sont généralement enregistrés lors de secousses sismiques. Cependant, en cas d'indisponibilité de ces données, on fait recours aux accélérogrammes synthétiques (appelés aussi artificiels, générés ou simulés).

Ainsi, l'objectif principal de ce thème de recherche est de générer des mouvements de sol (accélérogrammes) synthétiques. Une étude comparative entre les réponses d'une structure excitée par un accélérogramme naturel et par un autre artificiel sera réalisée afin d'étudier les différences qui peuvent être induites.

Ce thème de recherche va être réalisé en suivant les étapes décrites dans le plan de travail ci-dessous.

3. Organisation du manuscrit

Ce manuscrit est constitué de cinq chapitres qui sont organisés de la manière suivante, après une introduction générale :

Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique sur les méthodes d'évaluation de la réponse sismique d'une structure, les modèles de simulation des mouvements sismiques et enfin, un aperçu sur les logiciels de simulation existants.

Le deuxième chapitre porte sur la formalisation des méthodes nécessaires pour la génération des accélérogrammes tels que : la propagation d'onde, la fonction de transfert et la densité spectrale de puissance.

Dans le troisième chapitre, nous présentons le logiciel FLAC utilisé pour la convolution des signaux sismiques ainsi que notre programme numérique élaboré.

Le quatrième chapitre porte sur les calculs de la fonction d'amplification, de la densité spectrale de puissance à la base et en surface des quatre profils de sol choisis en Algérie.

Le cinquième chapitre est consacré à la validation et l'exploitation du programme réalisé en chapitre 3 comme il porte sur la réponse sismique des sols et des structures.

A la fin du mémoire, des conclusions générales et des recommandations futures sont données.

Chapitre 1

Recherche Bibliographique

1.1. Introduction

La majorité des codes parasismiques dans le monde permettent d'effectuer le calcul dynamique pour l'analyse sismique des structures avec l'utilisation d'accélérogrammes comme excitations.

Ces accélérogrammes, qui sont des accélérations des particules de sol en fonction du temps, sont généralement enregistrés lors de secousses sismiques. Cependant, en cas d'indisponibilité de ces données, on fait recours aux accélérogrammes synthétiques (artificiels, générés ou simulés).

Cette étude bibliographique portera sur:

- les méthodes d'évaluation de la réponse sismique d'une structure en domaine temporel;
- les modèles de simulation des mouvements sismiques ;
- les logiciels de simulation des mouvements sismiques.

1.2. Action sismique

L'action d'un séisme sur une structure de bâtiment (Figure 1.1) se traduit par un déplacement du sol, variable dans le temps $d_g(t)$, qui implique des composantes de translation $U(t)$ et de rotation $\theta(t)$ alternées (Figure 1.1). L'action sismique peut être aussi déterminée à l'aide de l'accélération du sol (ou accélérogrammes) $a_g(t)$ en translation et en rotation. Les composantes de rotation ont généralement des effets négligeables. La composante de translation verticale est plus faible que les composantes horizontales. Le principal effet du séisme est donc un mouvement horizontal du sol.

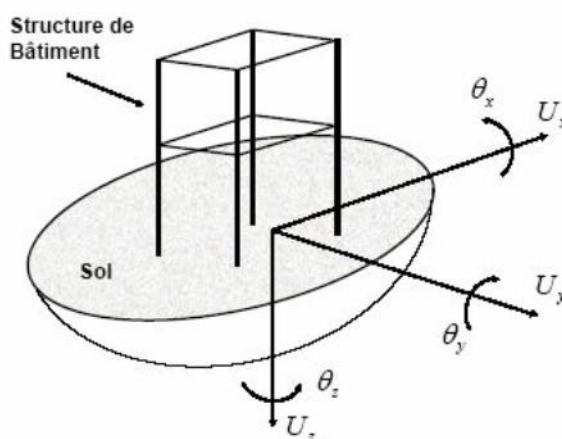


Figure 1.1- Action du tremblement de terre sur une structure de bâtiment.

En sismologie, la caractérisation des tremblements de terre s'effectue de diverses manières. La Magnitude (échelle de Richter) représente l'énergie libérée au foyer; l'Intensité permet de caractériser les dégâts observés suivant une échelle qualitative (Mercalli).

Pour les ingénieurs, les paramètres les plus utiles sont soit les lois de déplacements du sol $d_g(t)$ et des accélérogrammes $a_g(t)$ (Figure 2.2), soit des données plus globales, appelées spectres de réponse, établies à partir de ces accélérogrammes.

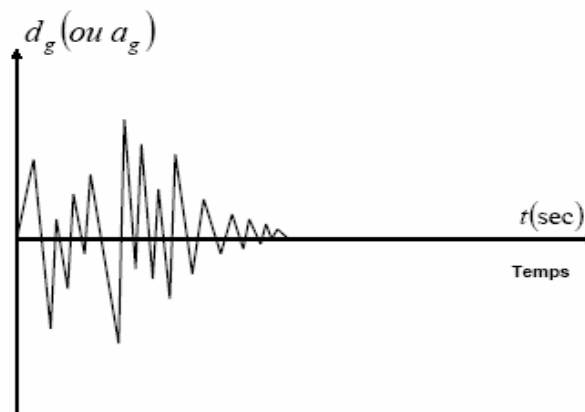


Figure 1.2- Enregistrement du mouvement du sol

1.3. Analyse des structures sous l'action sismique

L'analyse des structures de bâtiments sous l'action des séismes consiste à déterminer les forces maximales et surtout les déformations maximales qu'elles peuvent subir. Ces informations permettent de les dimensionner afin de résister aux séismes.

Pour évaluer de façon réaliste le comportement d'une structure soumise à un séisme, on emploie des techniques d'analyse dynamique des structures. Dans le cas d'une analyse statique des structures, le chargement statique appliqué permet d'obtenir une solution unique constante dans le temps. Une charge statique est une charge dont l'amplitude, la direction et le point d'application ne varient pas avec le temps, aussi on ne tient pas compte des effets d'inertie.

L'analyse dynamique, contrairement à l'analyse statique, génère une séquence de solutions variables dans le temps. Une charge dynamique est une charge dont l'amplitude, la direction et le point d'application varient avec le temps et peuvent donc engendrer des effets d'inertie ; aussi le premier but de la dynamique des structures consiste à déterminer les variations dans le temps des contraintes et déformations engendrées par un chargement dynamique quelconque.

1.3.1. Méthode statique

La méthode statique équivalente, définit en général le mouvement sismique par un simple jeu de coefficients sismiques où les forces réelles dynamiques qui se développent dans la structure sont remplacées par un système de forces statiques fictives. Du fait que les critères de cette méthode sont restrictifs, elle ne peut être appliquée que dans la phase préliminaire de conception pour l'établissement d'un niveau minimum de déplacements de conception.

La structure doit satisfaire en général les critères suivants :

- ✓ La structure est située à plus de 10 km d'une faille active.
- ✓ La structure est située sur un site avec $SI \leq 0.6g$ (SI est l'accélération spectrale de 5% d'amortissement au niveau MCE).
- ✓ La structure est située sur un site de classe A (roche dure), B (roche), C (Sol très dense et roche meuble) ou D (sol ferme).
- ✓ La structure au-dessus du plan d'isolation n'excède pas quatre étages ou 20m de hauteur.
- ✓ La période maximale du système d'isolation (TM) ne dépasse pas les 3.0 secondes.
- ✓ La période de conception de la structure isolée (TD) est trois fois plus grande que la période de la structure à base fixe.
- ✓ La structure au-dessus du plan d'isolation est régulière en plan et en élévation.

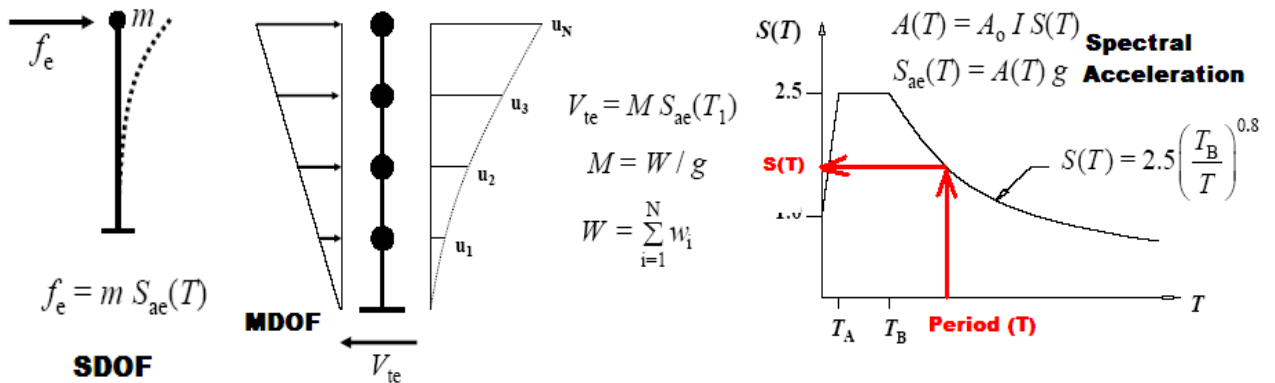


Figure 1.3- Accélération spectrale à la première période naturelle de Structure (Curtis, 2001).

1.3.2. Méthodes dynamiques

L'analyse dynamique est exigée dans beaucoup de cas, en particulier dans les cas où les exigences mentionnées pour l'analyse statique ne sont pas satisfaites. Cette analyse peut être effectuée sous forme d'une analyse modale spectrale ou d'une analyse de réponses temporelles (analyse par accélérogrammes).

1.3.2.1. Méthode d'analyse par spectre de réponse

La méthode d'analyse modale spectrale consiste en la recherche de la réponse maximale sur chacun des modes propres, dont on déduit la valeur maximale probable des efforts. Elle nécessite la connaissance du spectre de réponse de la secousse sismique. En effet, à l'opposé de la méthode statique équivalente, cette méthode permet d'analyser de nombreuses structures isolées.

L'application de la méthode dynamique modale spectrale est exigée en général dans les cas suivants :

- ✓ La structure au-dessus du plan d'isolation est irrégulière.
- ✓ La structure au-dessus du plan d'isolation est de plus de quatre étages ou 20m de hauteur.
- ✓ La période effective de la structure isolée (T_D) est trois fois plus grande que la période fondamentale de la structure à base fixe ($T_D > 3 T_F$).

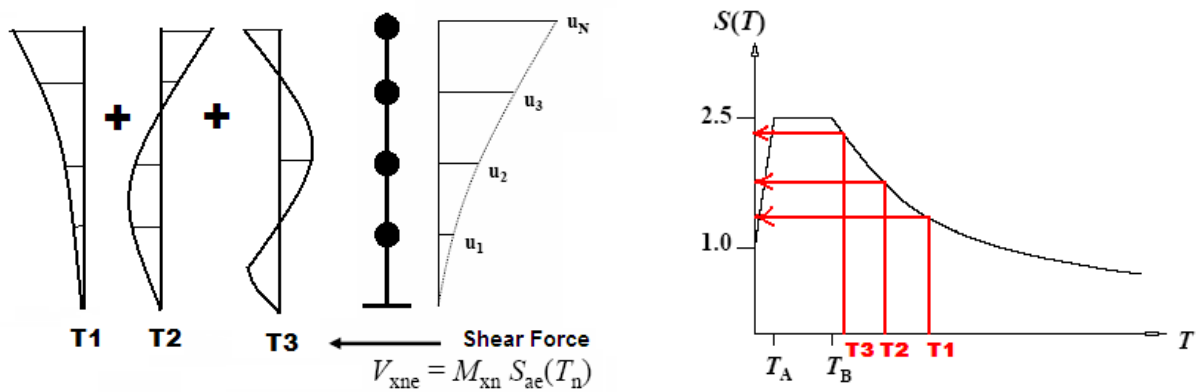


Figure 1.4- Accélération spectrale à toutes les périodes naturelles efficaces de Structure (Curtis, 2001).

1.3.2.2. La méthode d'analyse par accélérogrammes

La méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes consiste en l'étude des efforts dans la structure en fonction du temps, elle peut être utilisée dans tous les cas, en particulier, pour les structures isolées qui ne répondent pas aux critères de l'analyse statique ou l'analyse modale spectrale. Cette méthode est plus précise pour la représentation de l'action sismique ainsi que pour le calcul non linéaire des structures isolées; elle nécessite un ou plusieurs accélérogrammes ainsi que la disponibilité d'un programme numérique pour l'analyse de la structure.

Les codes exigent l'application de la méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes dans certains cas tels que:

- ✓ La structure est située sur un sol très meuble ou sols sujets aux problèmes de liquéfaction.
- ✓ Au moins trois paires des composantes horizontales du mouvement du sol enregistrées devraient être choisies et employées.
- ✓ Les réponses temporelles développées pour les sites situés à moins de 15 kilomètres des failles actives majeures devraient incorporer les phénomènes de failles proches.
- ✓ Si les enregistrements appropriés ne sont pas disponibles, des enregistrements simulés appropriés peuvent être employés pour composer tout le nombre des enregistrements requis.

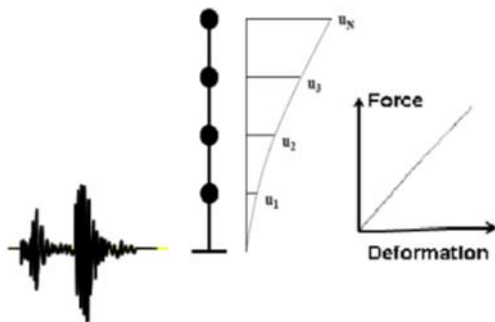


Figure 1.5- Dynamique linéaire

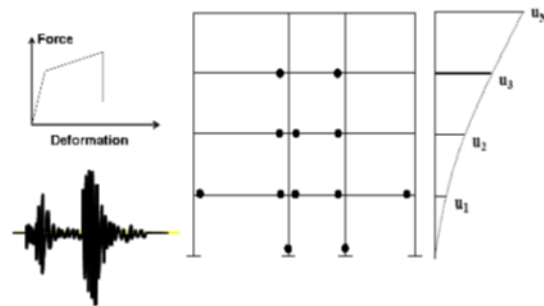


Figure 1.6- Dynamique non linéaire

1.4. La nécessité d'accélérogrammes

Dans la plupart des codes et pour la majorité des structures, leurs réponses sont étudiées 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 de 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 (Fahjan,2008).

Les représentations temporelles de l'accélération sismique sont parfois nécessaires pour évaluer la réponse des structures en terre en termes de stabilité, de déformation, du 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 réglementaire entre autres). La détermination du spectre de réponse, à partir d'un accélérogramme, est une procédure très bien maîtrisée. Alors que la génération d'accélérogrammes à partir de la connaissance d'un spectre de réponse cible est un problème inverse dont la solution n'est pas unique (Fahjan,2008).

1.5. Source des accélérogrammes

Les accélérogrammes sont la représentation la plus détaillée des séismes 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 (Fahjan,2008).

1.5.1. Les accélérogrammes réels

Les accélérogrammes réel sont de véritables enregistrements des secousses produites par les séismes, ils portent toutes les caractéristiques d'un séisme (amplitude, fréquence, le contenu énergétique, la durée et les caractéristiques de la phase), et tiennent en compte tous les facteurs qui les influencent (caractéristiques de la source, de la trajectoire et du site).

En raison de la disponibilité des enregistrements des accélérogrammes réels des mouvements de sol, l'utilisation et la mise à l'échelle devient l'un des plus référencés issues de la recherche contemporaine dans ce domaine.

Malgré la croissance continue des données sismiques, il existe de nombreuses combinaisons de paramètres du séisme tels que la grandeur, le mécanisme de rupture, la distance de la source et la classification de sites qui ne sont pas bien représentés, ce qui peut rendre l'obtention d'enregistrements appropriés difficile dans certaines circonstances (Bommer, 2003).

Les accélérogrammes naturels peuvent être choisis notamment dans les bases de données suivantes ainsi que d'autres:

- Base de données NGA du Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), accessible à l'adresse suivante http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database
- Base de données du Centre Sismologique Euro-Méditerranéen (CSEM), accessible à l'adresse suivante : <http://www.emsc-csem.org>.

Pour les études mettant en jeu des comportements non linéaires prononcés, il est préférable d'avoir recours de préférence à des accélérogrammes enregistrés lors de séismes réels, car ils ont un contenu plus réaliste en basses fréquences que les accélérogrammes artificiels et un phasage approprié entre les composantes horizontales et verticales du mouvement.

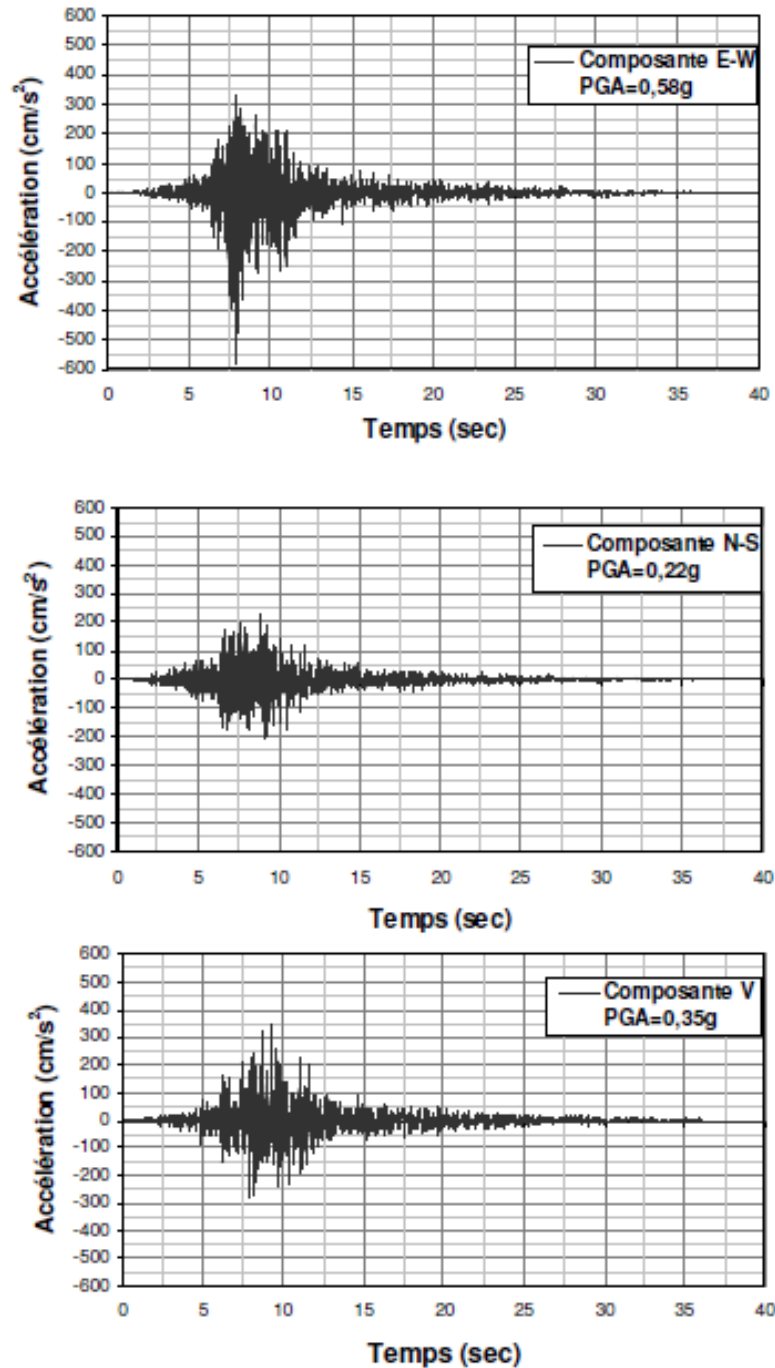
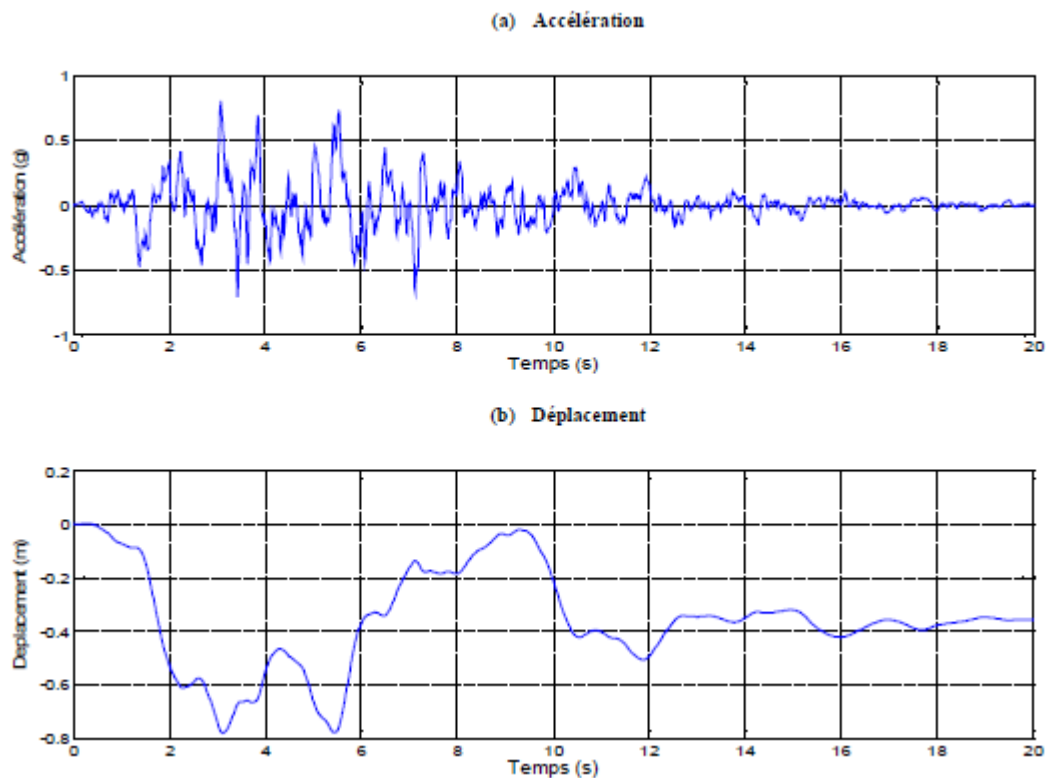


Figure 1.7- Accélérations en champ libre du séisme de Boumerdès 2003 au niveau du sol du site de Keddara (Station 1).

1.5.2. Les accélérogrammes artificiels

Les accélérogrammes artificiels sont généralement générés pour correspondre à un spectre de réponse cible en obtenant une fonction de densité spectrale d'un spectre de réponse lissé, et ensuite tirer des signaux sinusoïdaux ayant des angles de phases aléatoire et des amplitudes. Les mouvements sinusoïdaux sont alors additionnés et une procédure itérative peut être invoquée afin d'améliorer la correspondance avec le spectre de réponse cible, en calculant le rapport entre la cible et les coordonnées de réponse réelle à fréquences sélectionnées (Naeim,1999).

Pour obtenir d'autres caractéristiques telles que la durée, il est nécessaire d'obtenir d'autres informations supplémentaires sur le mouvement du séisme prévu en dehors du spectre de réponse.



*Figure 1.8- Signaux sismiques simulés par la méthode Gasparini & Vanmarcke (1976)
Signaux obtenus par le logiciel SeismoArtif (Cacciola et al 2012)*

1.5.3. Les Accélérogrammes synthétiques

Les Accélérogrammes synthétiques peuvent être générés des modèles de source sismologique et représentant des effets de site et d'emplacement. En général, il y a des difficultés réelles dans la définition des paramètres d'entrée appropriés comme la source, le trajet de parcours et les caractéristiques du site. Pour générer les accélérogrammes synthétiques il est nécessaire de définir un scénario de tremblement de terre spécifique en termes de magnitude, de mécanisme de rupture en plus des conditions géologiques et de site. Généralement, la plupart de ces paramètres ne sont pas souvent disponibles, en particulier lors de l'utilisation de codes de conception sismique (Bommer, 2003).

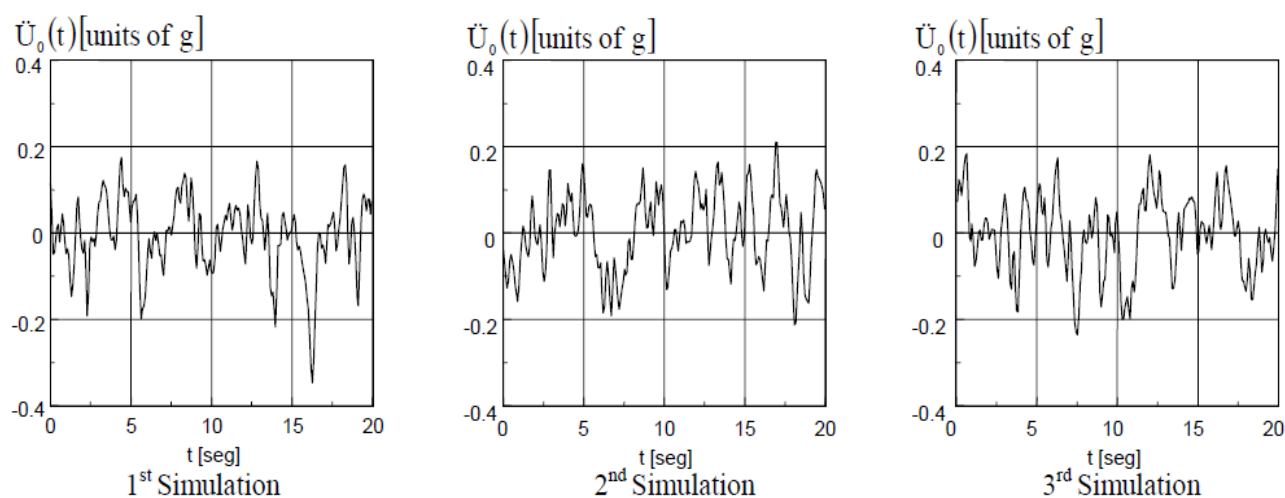


Figure 1.9- Simulations d'accélération du sol pour la zone des sols mous à Mexico
(Barranco-Cecilia, 2000).

1.6. Les modèles de simulation des mouvements sismiques

Les limitations et le manque des accélérogrammes enregistrés ainsi que l'utilisation répandue de l'analyse dynamique temporelle dans l'évaluation de la réponse sismique des structures, ont motivé le développement de la simulation des mouvements sismiques. Les accélérogrammes réels sont limités dans le sens qu'ils sont conditionnels à un seul séisme d'où des paramètres aléatoires uniques (la magnitude, la profondeur, les caractéristiques d'atténuation, la teneur en fréquence, la durée, etc.), un séisme qui ne se reproduira, probablement jamais, et qui ne peut pas être satisfaisant pour la conception (Shinozuka 1972).

Dans les années 70, les modèles de simulation des mouvements sismiques étaient de la forme (Rice, 1954):

$$x(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin\left(W_i t + \phi_i\right) \quad (1.1)$$

A_i : est l'amplitude

ϕ_i : est l'angle de phase d'une contribution sinusoïdale

Si A_i et ϕ_i sont des paramètres déterministes, alors le modèle de simulation est déterministe. Hors, comme le séisme a un caractère aléatoire comme l'a montré Housner en 1962, donc les modèles de simulation les plus utilisés sont les modèles stochastiques (Shinozuka 1972).

En effet, Shinozuka en 1972, a présenté les méthodes multivariées et/ou multidimensionnelles (homogènes ou non homogènes) pour la simulation des processus aléatoires.

1.6.1. Simulation d'un processus aléatoire de base

La représentation de base d'un processus homogène gaussien (unidimensionnel et à une variable) $f_0(x)$ avec une densité spectrale $S_0(\omega)$ sous la forme de la somme des fonctions de cosinus, a existé pendant un certain temps :

$$f(x) = \sqrt{2 \sum_{k=1}^N A_k} \cos(\omega_k x - \phi_k) \quad (1.2)$$

Où ϕ_k est l'angle de phase aléatoire uniformément distribué entre 0 et 2π et

$$A_k = [S_1^0(\omega_k) \Delta \omega]^{1/2}, \omega_k = (k-1/2) \Delta \omega, S_1^0(\omega) = 2S_0(\omega) \quad (1.3)$$

Où $S(\omega)$ est la fonction de densité spectrale.

Pour la simulation numérique d'une simple fonction $f'(x)$ de $f(x)$ et donc de $f_0(x)$, l'équation (1.2) est utilisée et remplacée par ses valeurs donc :

$$f'(x) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N A_k \cos(\omega_k x - \phi_k) \quad (1.4)$$

Afin d'améliorer d'une façon significative, l'efficacité de la simulation, Yang (1972) a donné

$$f'(x) = \sqrt{\Delta \omega} \operatorname{Re} F(x) \quad (1.5)$$

Où $\text{Re } F(x)$ est la partie réelle de $F(x)$ et

$$F(x) = \sum_{k=1}^N \left\{ \left[2S_1^0(\omega_k) \right]^{1/2} e^{i\varphi_k} \right\} e^{i\omega t} \quad (1.6)$$

Et la transformée de Fourier complexe

$$\left[S_1^0(\omega_k) \right]^{1/2} e^{i\varphi_k} \quad (1.7)$$

1.6.2. Simulation d'un processus homogène multidimensionnel

La simulation d'un processus homogène multidimensionnel proposée par Shinozuka (1972) est sous la forme :

$$f(x) = \sqrt{2} \sum_{k_1=1}^{N_1} \sum_{k_2=1}^{N_2} \dots \sum_{k_n=1}^{N_n} \left[S_0(\omega_{1k_1}, \omega_{2k_2}, \dots, \omega_{nk_n}) \Delta\omega_1 \Delta\omega_2 \dots \Delta\omega_n \right]^{1/2} \cos(\omega_{1k_1} x_1 + \omega_{2k_2} x_2 + \dots + \omega_{nk_n} x_n - \varphi_{k_1 k_2 \dots k_n}) \quad (1.8)$$

Qu'il a simplifié à la forme suivante :

$$f'(x) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N A(\omega_k) \cos(\omega_k x - \varphi_k) \quad (1.9)$$

Quand $N = N_1 N_2 \dots N_n$

$$A(\omega_k) = \left[S_0(\omega_k) \Delta\omega_1 \Delta\omega_2 \dots \Delta\omega_n \right]^{1/2} = \left[S_0(\omega_k) \Delta\omega \right]^{1/2} \quad (1.10)$$

1.6.3. Simulation des processus homogènes multidimensionnels multivariés

Dans le cas d'un processus multidimensionnel homogène $f_i(x)$ ($j = 1, 2, \dots, m$), la densité spectrale est une matrice croisée définie par :

$$\begin{bmatrix} S_{11}^0(\omega) & S_{12}^0(\omega) & \dots & S_{1m}^0(\omega) \\ S_{21}^0(\omega) & S_{22}^0(\omega) & \dots & S_{2m}^0(\omega) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{m1}^0(\omega) & S_{m2}^0(\omega) & \dots & S_{mm}^0(\omega) \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

$S_{jk}^0(\omega)$ est donc hermitienne et non négative. Afin de la simplifier on suppose une matrice $H(\omega)$ qui possède n dimensions de Fourier et satisfait l'équation :

$$S_0(\omega) = H(\omega) \overline{H}(\omega)^T \quad (1.12)$$

Où $H(\omega)$ est une matrice triangulaire inférieure et le processus $f_j(x)$ peut être simulé par l'équation :

$$f_j(x) = \sum_{k=1}^m \int_{-\infty}^x h_{jk}(x-\xi) \eta_k(\xi) d\xi \quad (1.13)$$

Noter que ce processus peut s'appliquer à n'importe quel événement (vent, séisme, ...)

1.6.4. Simulation Des Procédés Non Homogènes Multidimensionnels

La simulation des processus non stationnaires, a été étudiée en traitant principalement les mouvements sismiques. La caractéristique commune de ces études est qu'un processus non stationnaire est simulé en multipliant par une fonction d'enveloppe le processus stationnaire généré soit par filtrage (Shinozuka et al, 1967 ; Amin et al, 1968) ou par une série d'oscillations avec fréquences aléatoires et phase aléatoire [Goldber et al, 1964 ; Shinozuka et al, 1967).

La méthode efficace de simulation qui a été proposée pour les processus homogènes multidimensionnels peut être généralisée directement à un processus non homogène, caractérisé par un spectre de puissance évolutive tel qu'introduit Priestley (1965).

La généralisation directe de ce qui précède au processus multidimensionnel est évidente. Ainsi, si un processus réel non homogène possède une fonction de densité spectrale de puissance évolutive, le processus $f_e^0(x)$ peut être simulé par :

$$f_e(x) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N \left[B^2(x, \omega_k) S(\omega_k) \Delta\omega \right]^{1/2} \cos\left(\omega_k x + \Phi_k \right) \quad (1.14)$$

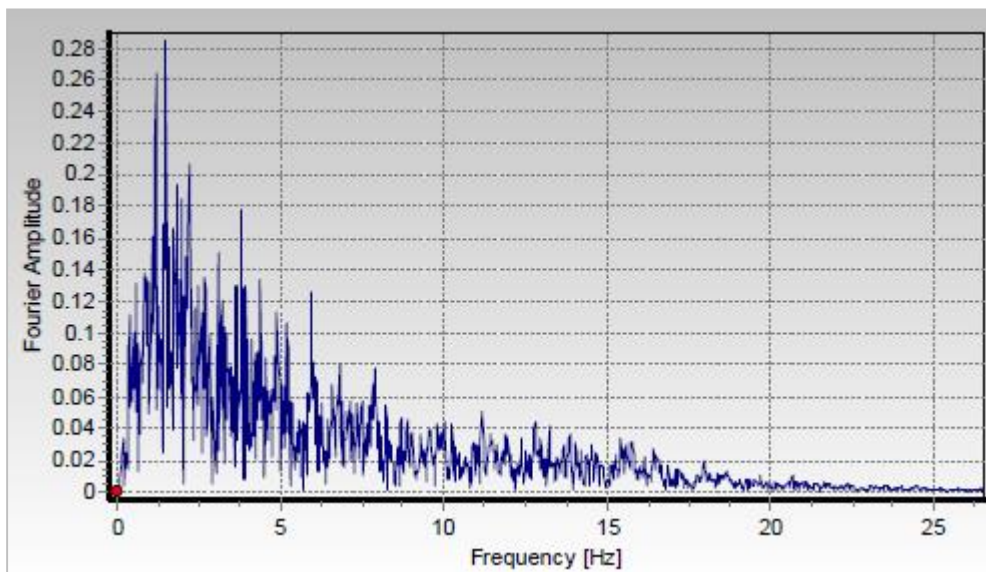


Figure 1.10- Spectre de Fourier du tremblement de terre El Centro.

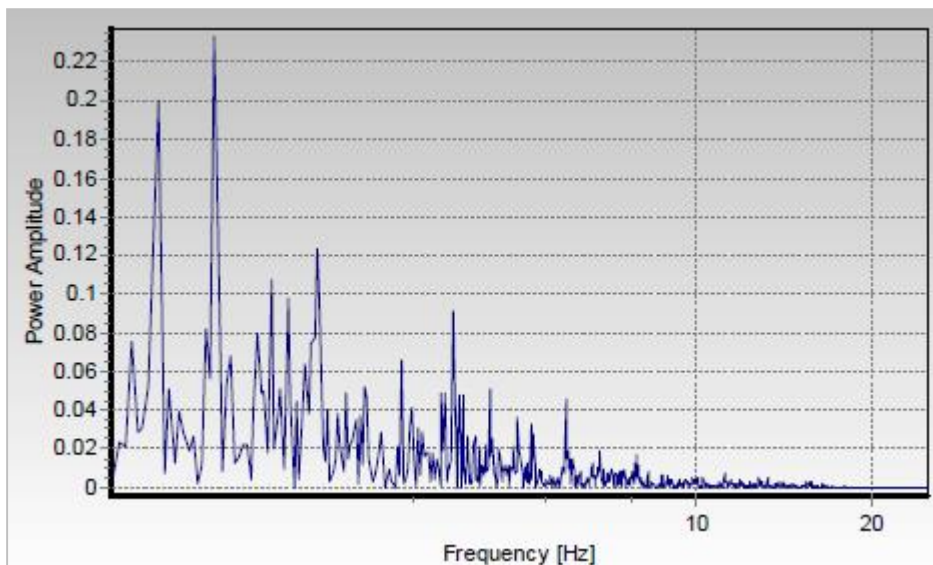


Figure 1.11- Densité Spectrale de Puissance du tremblement de terre El Centro.

1.7. Aperçu sur les modèles stochastiques des mouvements sismiques

Dans la communauté des ingénieurs, le premier modèle stochastique utilisé pour la simulation des mouvements sismiques est le modèle Kanai - Tajimi, dans les années 60. (Kanai, 1957 ; Rezaeian, 2012). Et il est encore utilisé à nos jours. Plusieurs améliorations ont été proposées dans la littérature depuis, ce qui permet d'introduire des fonctionnalités non stationnaires du mouvement du sol naturel.

Dans la communauté sismologique, le modèle Boore, mis au point dans les années 80 (Boore, 1983) est encore le plus largement appliqué, jusqu'aujourd'hui.

Dans ce qui suit, une courte introduction aux modèles stochastiques est proposée. Il n'est pas le but de donner un examen complet de tous les modèles disponibles dans la littérature, mais plutôt à introduire des idées générales et des concepts mathématiques.

1.7.1. Le modèle Boore

Le modèle Boore est exprimé en terme de spectre de transformée de Fourier (FAS), obtenue comme la transformée de Fourier des accélérations $a_g(t)$

$$F(\omega) = \int_0^{T_0} a_g(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1.15)$$

Comme $FAS(\omega) = |F(\omega)|$, où T_0 est la durée de la série temporelle. La notion du FAS est généralement utilisée par les sismologues pour définir le modèle stochastique du mouvement sismique (et pas la densité spectrale DSP), tel que le modèle développé par Boore.

L'expression générale contient des termes liés aux propriétés de la source (E), du chemin (P) et du site (G) (Boore, 1983 ; Boore, 2003)

$$Y(M_0, R, f) = \left(2\pi f \sqrt{-1}\right)^2 CM_0 S(M_0, f) P(R, f) G(f) \quad (1.16)$$

Où l'effet de la source a été donné sous la forme

$$E(M_0, f) = CM_0 S(M_0, f) \quad (1.17)$$

Avec C une constante et M_0 , le moment sismique (Aki).

Ce dernier peut être exprimé en terme de magnitude comme

$$M = 2/3 \log (M_0) - 10.7 \quad (1.18)$$

Ce dernier est préféré par l'auteur (Boore 2003)

Le facteur $\left(2\pi f \sqrt{-1}\right)^2$ est dû au fait que nous considérons l'accélération lors du déplacement du sol.

- ✓ **Source E:** la forme et l'amplitude de source dépendent essentiellement de l'amplitude et de la fréquence (par exemple : ω est le modèle carré de Brune) ;
- ✓ **Trajectoire P:** la diffusion géométrique, l'atténuation inélastique; dépend de la qualité du facteur Q (atténuation inélastique) et la distance R ; On observe une augmentation de la durée avec la distance, cela est dû à la propagation des ondes et de la diffusion ;
- ✓ **Site G:** l'amplification (source associée) et l'atténuation (le chemin indépendant de la perte d'énergie, chute de haute fréquence).

1.7.2. Le modèle de Kanai-Tajimi

Le modèle classique PSD de Kanai-Tajimi classique est connu sous le type :

$$S_{KT}(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega^2 \omega_g^2} S_0 \quad (1.19)$$

Où S_0 est l'intensité du bruit blanc. Le Kanai-Tajimi PSD exprime la réponse totale de l'accélération d'un oscillateur qui est exprimée par la FRF

$$H_{KT}(\omega) = \frac{\omega_g^2 + 2\xi_g \omega_g \omega}{(\omega_g^2 - \omega^2) + 2\xi_g \omega \omega_g} \quad (1.20)$$

Soumis à une accélération de base bruit.

Les paramètres du modèle, qui ont été déterminés, sont les suivants :

- ✓ **Fréquence propre ω_g :** elle est liée à la fréquence centrale et indique où la plupart de l'énergie du processus est concentrée,
- ✓ **Rapport d'amortissement critique ξ_g :** Il définit la largeur du processus,
- ✓ **L'intensité du bruit blanc S_0 :** Il permet de régler la variance du processus stationnaire

Les paramètres du modèle peuvent être identifiés pour un scénario observé à partir des accélérogrammes. Ceci s'appelle généralement à l'approche de la théorie des vibrations aléatoires, surtout si le lien aux spectres de réponse établit les maximums facteurs ainsi que le pic. Cela est bien expliqué dans le document de Code Aster (Zentner, 2014).

1.7.3. Les modèles PSD évolutionnaires

1.7.3.1. Quelques éléments théoriques

La densité spectrale est définie comme étant la transformée de Fourier de la fonction de corrélation

$$R_X(T) = \int_{\Omega} e^{i\omega t} S_X(\omega) d\omega \quad (1.21)$$

Où la fonction de corrélation est $R_X(\tau) = E[(X(t)X(t+\tau))]$, et E est l'opérateur mathématique.

Selon les travaux de Priestley (Priestley, 1965 ; Priestley, 1981) un PSD évolutif peut être écrite comme :

$$S_Y(\omega, t) = |A(\omega, t)|^2 S_X(\omega) \quad (1.22)$$

Où $S_X(\omega)$ définit la partie stationnaire séparable et $|A(\omega, t)|^2$ la partie non stationnaire, non séparable de l'évolutionnaire PSD $S_Y(\omega, t)$. La réalisation d'un processus stochastique non stationnaire, ainsi que sa fonction de corrélation peuvent être obtenues grâce au théorème de représentation spectrale. Il est dit qu'il existe un processus d'incrément orthogonal $Z(\omega)$ telle que, pour t fixe (Priestley, 1965) :

$$Y(t) = \int_{\Omega} e^{i\omega t} A(\omega, t) dZ(\omega) \quad (1.23)$$

1.7.3.2. Le modèle Kanai-Tajimi évolutionnaire

La fonction de fréquence évolutionnaire associée au modèle de Kanai-Tajimi est sous la forme

$$H_{KT}(\omega, t) = \frac{\omega_g(t)^2 + 2i\xi_g \omega_g(t)\omega}{\omega_g(t)^2 - \omega^2 + 2i\xi_g \omega_g(t)\omega} \quad (1.24)$$

Où $\omega_g(t)$ est la fréquence centrale au domaine temporel. Rezaeian et al. , l'ont adopté comme un modèle linéaire tandis que Preumont propose une expression exponentielle. Dans les applications, une partie du modèle linéaire est adopté, ce qui permet au compte que la fréquence centrale évolue du mouvement fort est :

$$\tilde{\omega}_g(t) = \begin{cases} \omega_g & t < t_1 \\ \omega_g - \omega' T_{SM} & t > t_1 + T_{SM} \\ \omega_g - \omega' (t - t_1) & \text{autre} \end{cases} \quad (1.25)$$

Ainsi, le modèle PSD de Kanai-Tajimi évolutif est défini comme

$$S_{KT}(\omega, t) = |H_{KT}(\omega, t)|^2 S_0 \quad (1.26)$$

1.7.3.3. La variabilité spatiale de mouvement

L'introduction de la variabilité spatiale dans les modèles stochastiques de mouvement de sol est simple. En effet, la variabilité spatiale des mouvements est généralement décrite par une fonction de cohérence (Clough et Penzien, 1992). Cela permet de construire une matrice PSD définissant les mouvements du sol à des endroits différents :

$$S_Y(\omega, t) = \Gamma(\omega) S_{KT}(\omega, t) \quad (1.27)$$

Où Γ est la matrice de cohérence dont les éléments sont définis au moyen d'une fonction de cohérence et dépendent de la distance horizontale d_{ij} entre deux endroits :

$$\Gamma_{ij}(\omega) = \gamma(\omega, d_{ij}) \quad (1.28)$$

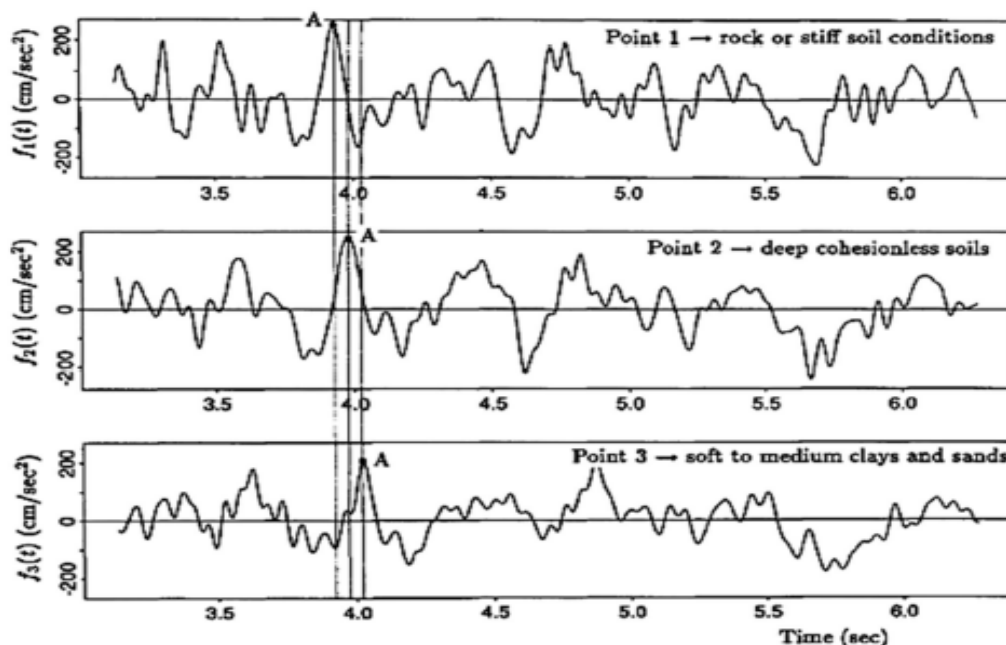


Figure 1.12- Observation de la variabilité spatiale des signaux sismiques (Kaiming, 2012)

1.8. Les logiciels de simulation des mouvements sismiques

1.8.1. Le logiciel Simqke

SIMQKE (Gasparini et Vanmarcke, 1976) calcule une fonction de densité spectrale d'un spectre de réponse lisse spécifié et utilise cette fonction pour calculer l'amplitude des signaux sinusoïdaux qui présentent des angles de phase aléatoire uniformément distribués entre 0 et 2π . Les mouvements sinusoïdaux sont additionnés pour générer un enregistrement temporel.

Afin d'obtenir d'autres caractéristiques du compte-rendu compatibles au spectre artificiel, telles que la durée, il est nécessaire d'obtenir des informations supplémentaires sur le mouvement de tremblement de terre attendu en dehors du spectre de réponse.

1.8.2. Le logiciel Simqke II

Le Simqke II est un logiciel très performant qui a été développé (Vanmarcke et al., 1991), à partir d'un langage Fortran, ce code de calcul permet d'effectuer des simulation numériques de mouvements sismiques à partir d'un seul évènement et d'un seul modèle de cohérence. Il emploie les techniques de FFT qui rendent les calculs fortement efficaces. Il est conçu pour travailler sous l'environnement MS-DOS par le biais d'un fichier de données, qui contient le nom de la fonction de cohérence liée à la fréquence et à la distance, le nombre et les coordonnées spatiales des points

où la simulation est menée. Par ailleurs, s'il s'agit d'une simulation conditionnelle le nom de fichier qui contient les données d'accélération en fonction du temps d'un événement enregistré doit être spécifié et la même chose pour le nom de fichier qui contient la fonction de densité spectrale de puissance.

1.8.3. Le code TARSCTHS

(Papageorgiou et coll., 2002) utilise des processus stochastiques non stationnaires pour générer des accélérogrammes artificiels d'un spectre de réponse élastique prédéfini. Le schéma itératif est appliqué dans le domaine fréquentiel où la phase des angles de la requête souhaitée est aléatoirement générée par les mouvements sismiques dans le domaine temporel.

1.8.4. Le logiciel RspMatch

le programme RspMatch (Abrahamson, 1992) et ses versions de mise à jour (Hancock et al., 2006; Al Atik et Abrahamson 2010) sont devenus populaires auprès des praticiens.

Une nouvelle version du logiciel, RspMatchBi (Grant 2011, 2010), considère deux composants de mouvement simultanément comme données d'entrée. Le programme fait des ajustements des deux composants, effectivement il modifie les orbites bidirectionnelles telles que les axes majeur et mineur du spectre correspondent à deux spectres de cible distinctes. Les ajustements sont effectués de telle sorte que l'orientation des axes majeurs et mineurs pour chaque période (et la valeur de l'amortissement) sont préservés de l'enregistrement original, à la différence des cas la version du composant unique de RspMatch est appliquée aux deux composantes séparément (Grant 2011). RspMatchBi a été utilisé pour générer des accélérogrammes pour des études numériques.

1.8.5. Le Logiciel SMSIM (Stochastic-Method SIMulation)

SMSIM est un ensemble de programmes permettant de simuler les mouvements du sol basé sur la méthode stochastique. Une description de la méthode est donnée en Boore (1983), Boore Joyner (1984), Boore (1986), Joyner et Boore (1988). Une des caractéristiques essentielles de la méthode est qu'il distille ce qui est connu sur les différents facteurs affectant les mouvements de sol (source, chemin et l'emplacement) dans des formes fonctionnelles simples qui peuvent servir à prédire les mouvements du sol. Les Programmes sont inclus pour le domaine temporel ainsi que pour les simulations de vibration aléatoire. En outre, les programmes sont inclus pour produire des spectres d'amplitude de Fourier pour les modèles utilisés dans les simulations et de convertir la vitesse de cisaillement vs profondeur en amplification dépendant de la fréquence.

Une révision (Boore, 1996) était nécessaire car les fichiers d'entrée et de sortie ont considérablement évolué et un certain nombre de nouveaux programmes ont été inclus dans le jeu.

1.9. Conclusion

L'excitation sismique est un chargement important à prendre en considération pour la conception et le dimensionnement des constructions importantes. Dans ce cas, on a recours aux bases 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 générer artificiellement les évolutions temporelles.

Les accélérogrammes simulés facilitent beaucoup le travail des ingénieurs et ils sont devenus un moyen important dans l'évaluation de la réponse sismique.

Chapitre 2

Modèles de Simulation des Mouvements Sismiques

2.1. Introduction

Dans ce chapitre on expose la méthode de simulation des mouvements sismiques adoptée. Comme nous voulions que le modèle soit aussi performant que possible, plusieurs paramètres doivent être inclus tels que les conditions du sol, les paramètres liés à la sismicité de la région, la magnitude, la source du séisme, ...

En premier lieu, on tient compte des conditions de sol à travers une fonction appelée fonction de transfert. Celle-ci appelée également fonction d'amplification permettra l'étude de l'amplification des mouvements sismiques en surface de sol, ou amplification par effet de site. La fonction de transfert est obtenue dans le cadre de la propagation des ondes sismiques à travers des dépôts de sol multicouches.

En suite afin de simuler des mouvements sismiques à la base (rocher), on a besoin d'utiliser un modèle de la densité spectrale de puissance. Cette densité spectrale de puissance est convolutive en surface du sol dans le cadre de la théorie des vibrations par l'aide de la fonction de transfert.

Une fois la fonction de densité spectrale, qu'elle soit au rocher ou en surface du sol, est obtenue il est possible de simuler des mouvements sismiques au rocher ou en surface, respectivement, en domaine temporel ou plus efficacement en domaine fréquentiel.

Toutes ces étapes sont données dans ce qui suivra.

2.2. Théorie de propagation d'ondes et les effets de site

La théorie de propagation des ondes unidimensionnelle proposée par Wolf (1985) est adoptée pour considérer l'influence de l'effet de site dans notre étude. Les ondes sismiques sont assumées se propager dans le sol à partir du rocher (la base) avec un angle d'incident et se propagent dans les couches de sol vers la surface.

Grace à sa simplicité, cette théorie est largement utilisée dans la pratique de l'ingénierie pour modéliser d'une manière satisfaisante l'amplification, l'effet de site et le filtrage des ondes sismiques.

2.2.1. Propagation des ondes sismiques dans les sols

L'essentiel des effets des séismes provient des vibrations associées aux ondes émises par ce séisme. Ces vibrations peuvent être caractérisées par leurs fréquences et leurs amplitudes; les ondes qui les génèrent sont caractérisées par leur type et leur vitesse de propagation. Cette dernière, relativement stable en profondeur dans la croûte terrestre, devient très variable à proximité immédiate de la surface. Elle varie fortement avec la nature et la compacité des sols et des roches (Pecker et Afra, 1995).

Depuis l'association des ondes aux tremblements de terre par John Michel(1760), les scientifiques ne cessent de s'intéresser aux problèmes de propagation d'ondes. Avec le développement des mathématiques et l'apparition de l'outil informatique, les méthodes de résolution sont diversifiées et améliorées. Cependant le problème reste toujours délicat. En tenant compte de l'hétérogénéité du sol, de son comportement, de sa discontinuité et d'autres facteurs, le problème devient d'une grande complexité sinon impossible à résoudre.

En vue de simplifier la résolution mathématique du problème, les mathématiciens et les physiciens ont introduit plusieurs hypothèses simplificatrices. Ainsi, le milieu étudié est supposé continu, homogène, isotrope, élastique, ...

2.2.2. Hypothèses sur le mouvement

Les codes parasismiques dans le monde sont basés sur une hypothèse fondamentale qui stipule que le mouvement sismique est principalement dû à une onde SH à propagation verticale à travers un milieu de sol composé de couches stratifiées horizontalement (Figure 2.1). À cet effet, nous ne considérons ici que cas. Dans ce dernier, l'équation de propagation prend la forme :

$$\frac{\partial^2 u_j(z_j, t)}{\partial t^2} = V_{sj}^2 \frac{\partial^2 u_j(z_j, t)}{\partial z^2} \quad (2.1)$$

Le déplacement dû à cette onde, selon la direction horizontal hors plan (Figure 2.2), défini par l'équation (Wolf, 1985):

$$u_2 = A_{SH} f_s$$

se compose d'une partie incidente et une partie réfléchie comme suit (Harichane, 2013):

$$u_2^{inc} = A_{SH} \cdot \exp \left[\frac{i \cdot \omega}{v_s} (v_s \cdot t - x_1 \cdot \sin \alpha + x_3 \cdot \cos \varepsilon) \right] \quad (2.2-a)$$

$$u_2^{rf} = A'_{SH} \cdot \exp \left[\frac{i \cdot \omega}{v_s} (v_s \cdot t - x_1 \cdot \sin \alpha - x_3 \cdot \cos \varepsilon) \right] \quad (2.2-b)$$

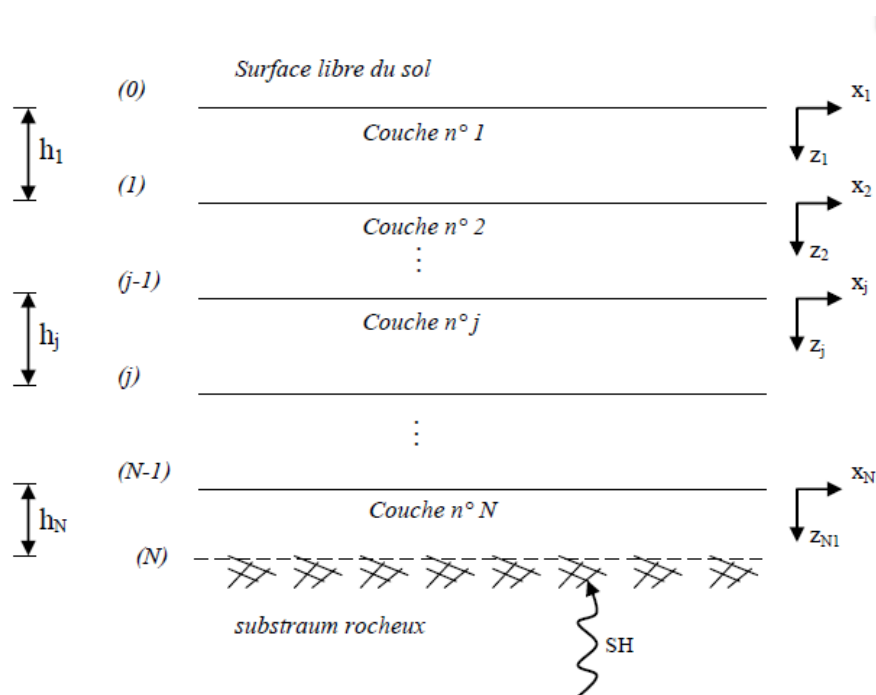


Figure 2.1- Profil de sol soumis à la propagation d'une onde de cisaillement à propagation verticale.

D'où le déplacement total s'écrit :

$$u_j = [A_j \cdot e^{(i \cdot p_j \cdot z_j)} + A'_j \cdot e^{(-i \cdot p_j \cdot z_j)}] \cdot f_j(x, t) \quad (2.3)$$

Avec $p_j = \frac{\omega \cdot \cos \alpha_j}{v_{sj}}$ et $f_j(x, t) = \exp \left[\frac{i \cdot \omega}{v_{sj}} (v_{sj} \cdot t - x \cdot \sin \alpha_j) \right]$ (2.4)

Désignons par A_j et A'_j ($j=1,2$) les amplitudes des ondes incidente et réfléchie, respectivement. Le déplacement horizontal dans chaque couche s'écrit donc (Figure 2.1):

La condition de nullité des contraintes à la surface libre ($\sigma_{yz}(z = 0)$) donne $A_1 = A'_1$. Les conditions de compatibilité à l'interface des deux milieux pour tout x et t ($u_1(h) = u_2(0)$) et ($\sigma_{yz}^{(1)}(h) = \sigma_{yz}^{(2)}(0)$) permet d'écrire, d'une part la loi de Snell ($\sin \alpha_1/v_{s1} = \sin \alpha_2/v_{s2}$) et d'autre part l'expression des amplitudes des ondes incidente et réfléchie de la couche j , A_j (respectivement A'_j) en fonction de la celles de la surface. d'où:

$$A_{j+1} = \frac{I}{2} A_j (1 + q_j) e^{i.p_j.h_j} + \frac{I}{2} A'_j (1 - q_j) e^{-i.p_j.h_j} \quad (2.5-a)$$

$$A'_{j+1} = \frac{I}{2} A_j (1 - q_j) e^{i.p_j.h_j} + \frac{I}{2} A'_j (1 + q_j) e^{-i.p_j.h_j} \quad (2.5-b)$$

Avec $q_j = \sqrt{(\rho_j \cdot G_j / \rho_{j+1} \cdot G_{j+1})} \cdot (\cos \alpha_j / \cos \alpha_{j+1})$.

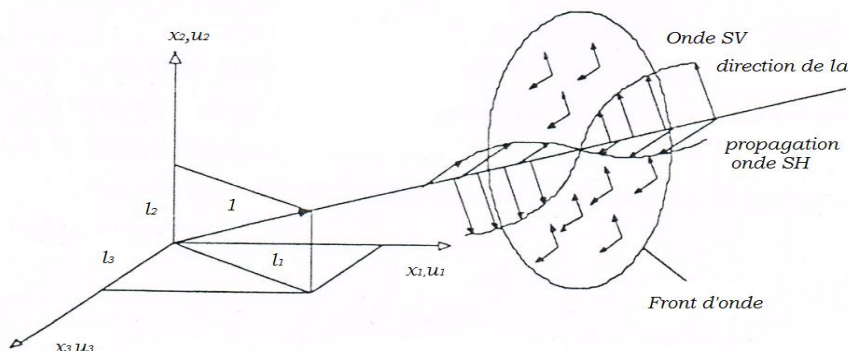


Figure 2.2- Déplacement associé aux ondes S (SV, SH) (Wolf, 1985).

Ainsi, les déplacements, déformations et contraintes, peuvent être déterminés en tout point du milieu et sont fonction de la pulsation ω .

2.2.3. Fonctions de transfert

De la figure (2.3), on peut définir deux fonctions d'amplification (ou de transfert) H et H^* . La fonction d'amplification du sol $H(\omega)$ pour un site, est le rapport de l'amplitude du déplacement au point A (surface libre du sol) à l'amplitude du déplacement au point B (interface entre le sol et le rocher). Elle est de la forme suivante :

$$H(\omega) = \frac{2A_1(\omega)}{A_{N+1}(\omega) + A'_{N+1}(\omega)} \quad (2.6)$$

La fonction d'amplification H^* est le rapport des amplitudes des déplacements aux points A et B s'il n'y a pas de sol dessus (ou point C). Elle est généralement nommée amplification du rocher élastique :

$$H^*(\omega) = \frac{A_1}{A_{N+1}} \quad (2.7)$$

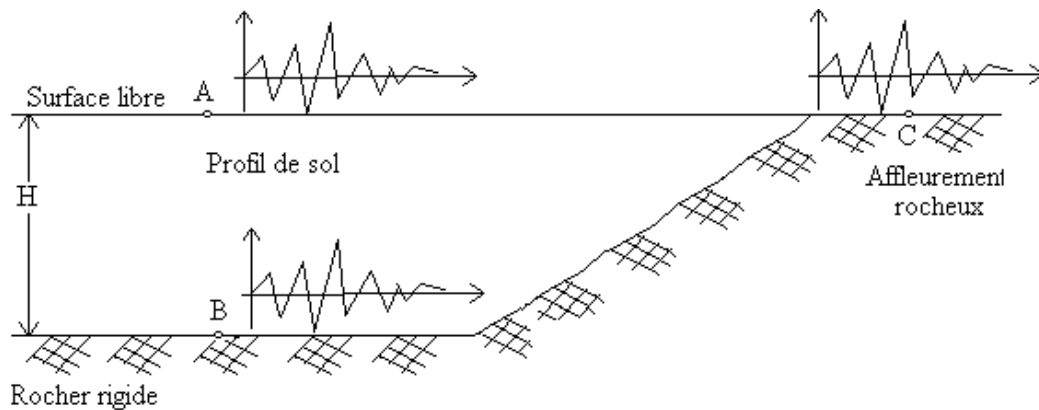


Figure 2.3- Amplification géométrique du sol (Harichane, 2013).

2.2.4. Effets de site

2.2.4.1. Types d'effets de site

L'intensité avec laquelle un séisme est ressenti en un lieu donné, dépend dans une large mesure de la nature des sols traversés par l'onde sismique (Le mouvement du sol est généralement maximal à l'aplomb de la faille et décroît avec la distance (Figure 2.4)). Cependant, Le

mouvement induit par la propagation des ondes sismiques lors d'un tremblement de terre à la surface du sol peut être amplifié par la structure géologique et la topographie en surface. On parle respectivement d'effets de site topographiques et lithologiques (Harichane et Afra, 2011).

Les conditions locales du sol sont très importantes en effet si la fréquence du sol est proche de celle de la structure, on est en présence d'une amplification dynamique du sol.

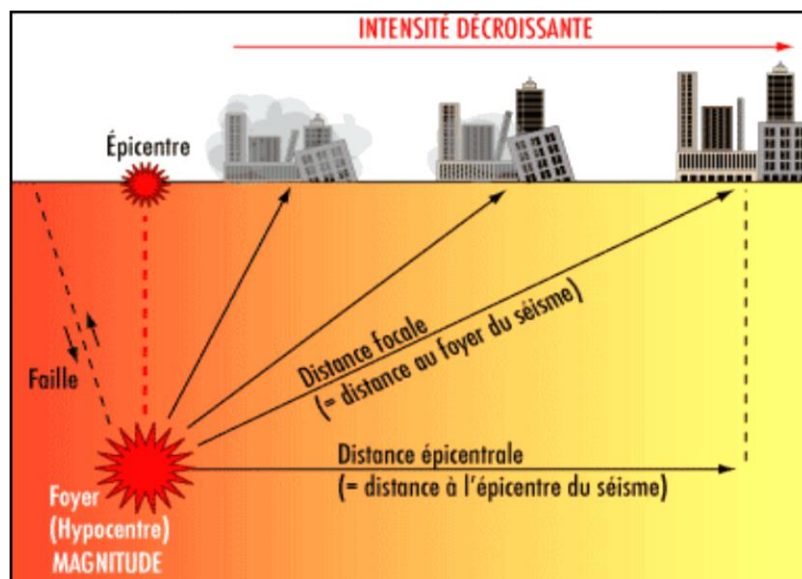


Figure 2.4- Schématisation des effets de sites (<http://clercsvt.jimdo.com/college/quatrieme/1-seismes/>).

2.2.4.2. Prise en compte des effets de site par les règlements

Les effets de sites sont pris en charge dans les règlements parasismiques par l'introduction des catégories définissant des types de sol. De manière générale, les sites sont classés en fonction des propriétés mécaniques des sols qui les constituent.

Dans les Règles Parasismiques Algériennes (RPA99/version 2003), les classes sont définies en fonction de la vitesse moyenne des ondes de cisaillement sur une profondeur de 30 mètres du sol ($V_{s,30}$) (Tableau 2.1).

Tableau. 2.1- Classification des sites selon le RPA99/version 2003.d

| Type de site | Description | Vitesse des ondes de cisaillement (m/s ²) |
|-------------------|--|---|
| (S ₁) | Site rocheux | $V_s \geq 800$ |
| (S ₂) | Site ferme | $400 \leq V_s < 800$ |
| (S ₃) | Site meuble | $200 \leq V_s < 400$ |
| (S ₄) | Site très meuble ou présence de 3 m au moins | $100 \leq V_s < 200$ |

2.3. Modèles de la densité spectrale de puissance

Les formes paramétriques les plus couramment utilisées de la densité spectrale de puissance sont, le spectre de Kanai-Tajimi (Kanai, 1957 et Tajimi, 1960), ou de son extension développée par Clough & Penzien (Clough and Penzien, 2003). Les bases physiques du spectre de Kanai-Tajimi font qu'il passe par un processus blanc à travers un filtre du sol, l'expression de la densité spectrale de puissance des accélérations du sol est donnée par :

$$S_a(\omega) = S_0 \frac{1 + 4\xi_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2\right]^2 + 4\xi_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2} \quad (2.8)$$

Où S_0 est l'amplitude de l'excitation du processus blanc au substratum rocheux. ω_g , ξ_g sont la fréquence et le coefficient d'amortissement du sol, respectivement. L'inconvénient de l'équation (2.8) est que le spectre produit des variances infinies pour la vitesse et le déplacement du sol. Pour tout processus stationnaire, la densité spectrale de puissance de la vitesse $S_v(\omega)$ et du déplacement $S_d(\omega)$ sont liées à celle de l'accélération par:

$$S_v(\omega) = \frac{1}{\omega^2} S_a(\omega); \quad S_d(\omega) = \frac{1}{\omega^4} S_a(\omega) \quad (2.9)$$

Il apparaît des équations (2.8) et (2.9) que les spectres de vitesse et de déplacement de Kanai-Tajimi ne sont pas définis quand $\omega \rightarrow 0$. Clough et Penzien (2003) ont adopté le spectre de Kanai-Tajimi (2.9) par un filtre supplémentaire du sol avec les paramètres ω_f et ξ_f et ont décrit le spectre de puissance des accélérations du sol comme:

$$S_a(\omega) = S_0 \frac{1 + 4\xi_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2\right]^2 + 4\xi_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2} \times \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_f}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_f}\right)^2\right]^2 + 4\xi_f^2 \left(\frac{\omega}{\omega_f}\right)^2} \quad (2.10)$$

Ce qui donne des variances finies pour les vitesses et les déplacements

2.4. Densité spectrale en surface d'un dépôt de sol

En considérant la réponse élastique linéaire, la fonction de la densité spectrale de puissance des mouvements sismiques entre un point à la base du rocher et un autre sur la surface du sol peut être présentée sous la forme suivante :

$$S_{jj}(\omega) = |H_j(\omega)|^2 S_a(\omega) \quad j=1,2,\dots, n \quad (2.11)$$

Où $H_j(\omega)$ est la fonction de transfert définie précédemment et $S_a(\omega)$ est la densité spectrale de puissance de mouvement à la base rocheuse. Cette équation (2.11) servira d'une part à la convolution du mouvement (excitation) au rocher en surface et à la simulation des mouvements sismiques en surface du sol.

2.5. Simulation des mouvements sismiques

Les vibrations du sol peuvent être assimilées à un processus aléatoire gaussien de moyenne nulle. Les sismologues et les praticiens du génie parasismique reconnaissent le caractère aléatoire des hautes fréquences des signaux sismiques (fréquences supérieures à 1 Hz), lié aux petites hétérogénéités au niveau de la surface de rupture et lors de la propagation des ondes dans les milieux.

Deux approches stochastiques différentes permettent d'estimer le mouvement sismique. Ces deux méthodes se distinguent principalement dans la manière de définir le contenu fréquentiel. Dans la première approche, la forme spectrale (spectre de Fourier) est définie comme une fonction de la taille du séisme (e.g. Brune, 1970, 1971; Hanks et McGuire, 1981; Boore, 1983, 2003). Dans la seconde approche, les traces temporelles sont déduites de la théorie des vibrations

aléatoires, et le contenu fréquentiel est compatible au pseudo-spectre de réponse en accélération d'un oscillateur linéaire à un degré de liberté (e.g. Gasparini et Vanmarcke, 1976; Yeh et Wen, 1990; Papadimitriou, 1991; Rezaeian et Der Kiureghian, 2008).

Dans notre cas, on a opté d'utiliser la deuxième méthode pour la simulation des signaux sismiques.

2.5.1. Simulation des mouvements sismiques à la base

On considère un processus aléatoire gaussien de moyenne zéro avec la densité spectrale de puissance (DSP) $S(\omega)$, où ω indique le pas de la fréquence (en rad/s.). Selon (Shinozuka, 1972) les simulations d'accélérogramme peuvent être générées :

- En domaine temporel au moyen d'une série trigonométrique avec phases et d'amplitudes aléatoires, l'expression est donnée par :

$$f(t) = \sqrt{2} \sum_{k=k_0}^K [2S(\omega_k)\Delta\omega]^{1/2} \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (2.12)$$

Dans lequel $k_0 = 1$, les fréquences discrètes sont décrites par une règle neutre, c'est-à-dire $\omega_k = (k - 1/2)\Delta\omega$, avec $\Delta\omega$ indique le pas de la fréquence et ϕ_k , $k = k_0, \dots, K$ sont les distributions du déphase uniformément distribués entre $[0, 2\pi]$. L'équation (2.12) est valide s'il existe un ω_u fréquence de coupure supérieure, au-dessus de laquelle la contribution de la densité spectrale de puissance pour les simulations est négligeable pour des raisons pratiques. Les simulations ont les caractéristiques intrinsèques suivantes:

- (i) Ils sont asymptotiquement gaussiens comme $K \longrightarrow \infty$ due au théorème central limite ;
 - (ii) Ils sont périodiques avec période $T_0 = 4\pi / \Delta\omega$;
 - (iii) Ils sont ergodique, au moins jusqu'au second moment, sur un domaine d'un temps infini ou au cours de leur période.
- Ou en domaine fréquentiel par l'utilisation de la transformée de Fourier rapide (FFT) afin de réduire le temps de calculs considérables nécessaire dans les grosses sommes des fonctions trigonométriques. Sous la forme suivante :

$$f_r = \sqrt{2} \Re \left[e^{i\pi r / M} \left\{ \sum_{k=0}^{M-1} ([2S(\omega_k) \Delta\omega]^{1/2} e^{i\phi_k}) e^{i2\pi k / M} \right\} \right] \quad (2.13)$$

On utilise une règle neutre et discrétisée pour les fréquences comme $\omega_k = (1/2)\Delta\omega + k\Delta\omega$, avec $k=0, \dots, (K-1)$, i.e., les fréquences discrètes sont décalées de $(1/2)\Delta\omega$ pour tenir compte le fait que la FFT commence à $k = 0$.

D'où $f_r = f(r\Delta t)$, $r = 0, \dots, M-1$, $\Delta t = 2\pi / (M\Delta\omega)$ et $\Re[\dots]$ indique la partie réelle. M est une puissance de 2 ($M = 2m$, $m = \text{entier}$) et $M \geq 2K$ de sorte que les effets de repliement peuvent être évités, c'est-à-dire, la PSD est zéro au-delà de la fréquence de coupure, ω_c , avec K autres fréquences discrètes supplémentaires. La FFT est ensuite appliquée à l'expression entre parenthèses. Équation (2.13) fournit des simulations sur une longueur de temps est égale à la moitié de la période de l'approche originale $T_0' = T_0 / 2 = 2\pi / \Delta\omega$.

2.5.2. Simulation des mouvements sismiques à la surface

La génération des mouvements sismiques à la base (rocher) sont assumés en tant qu'un processus aléatoire stationnaire avec une moyenne de zéro et ayant une fonction de densité de puissance (eq.2.10), c'est une hypothèse raisonnable puisque la distance de la source au site est habituellement beaucoup plus grande que la dimension de la structure.

La simulation des mouvements sismiques à la surface du sol peut être générée en domaine fréquentiel ainsi qu'en domaine temporel

- En domaine temporel, utilisant l'équation suivante :

$$u_j(t) = \sum_{n=1}^N A_m(\omega_n) \cos[\omega_n t + \varphi_m(\omega_n)] \quad (2.14)$$

Où $A_m(\omega) = \sqrt{4\Delta\omega S(\omega)}$, $0 \leq \omega \leq \omega_n$

$S(\omega)$ est la densité spectrale de puissance à la surface du sol (eq.2.11).

$\varphi_m(\omega_n)$ est l'angle de phase aléatoire uniformément répartie sur $[0, 2\pi]$

ω_n représente une fréquence de coupure supérieure au-delà dont les éléments de la densité spectrale de puissance est égal à zéro

$\Delta\omega$ est la résolution de fréquence, et $\omega_n = n\Delta\omega$ est la nième fréquence discrète.

- La génération en domaine temporel est tout à fait longue, donc la simulation des mouvements sismiques en domaine fréquentiel peut être produite plus efficacement basée sur la technique de la transformée de Fourier rapide (FFT). La génération est sous la forme suivante :

$$u(\omega_n) = B_m(\omega_n) [\cos \alpha_m(\omega_n) + i \sin \alpha_m(\omega_n)] \quad (2.15)$$

Ou bien sous la forme :

$$u(\omega_n) = B_m(\omega_n) e^{i\alpha_m(\omega_n)} \quad (2.16)$$

Avec
$$B_m(\omega_n) = \frac{A_m(\omega_n)}{2} = \sqrt{\Delta\omega S(\omega)}$$

Et
$$\alpha_m(\omega_n) = \varphi_m(\omega_n)$$

Où $B_m(\omega_n)$ est l'amplitude de la fréquence ω_n , $\alpha_m(\omega_n)$ est l'angle de phase correspondante et

$S(\omega)$ est la densité spectrale de puissance à la surface du sol (eq.2.11).

La correspondante temporelle $u_j(t)$ peut être obtenue par la transformation de Fourier inverse de $u(\omega_n)$.

2.6. La fonction de modulation (enveloppe)

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 (fonction enveloppe). 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

$$f_j(t) = \zeta(t)u_j(t) \quad j = 1, \dots, n \quad (2.17)$$

Avec $\zeta(t)$ est la fonction de modulation qui peut prendre plusieurs formes, l'une des représentations possibles est présentée par la formule (eq.2.18) et montrée dans la figure (2.5).

$$\zeta(t) = \begin{cases} (t/t_0)^2 & 0 \leq t \leq t_0 \\ 1 & t_0 < t \leq t_n \\ \exp[-0.155(t-t_n)] & t_n < t \leq T \end{cases} \quad (2.18)$$

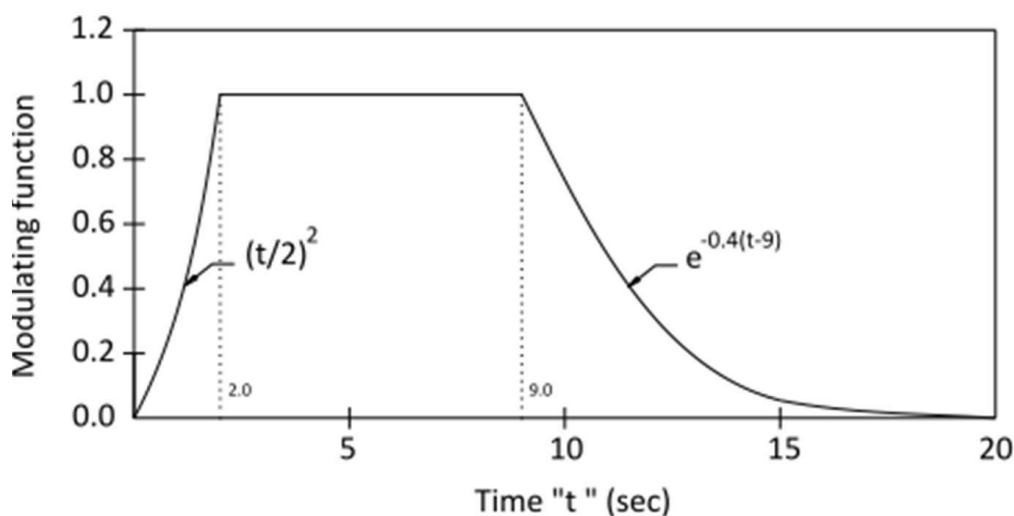
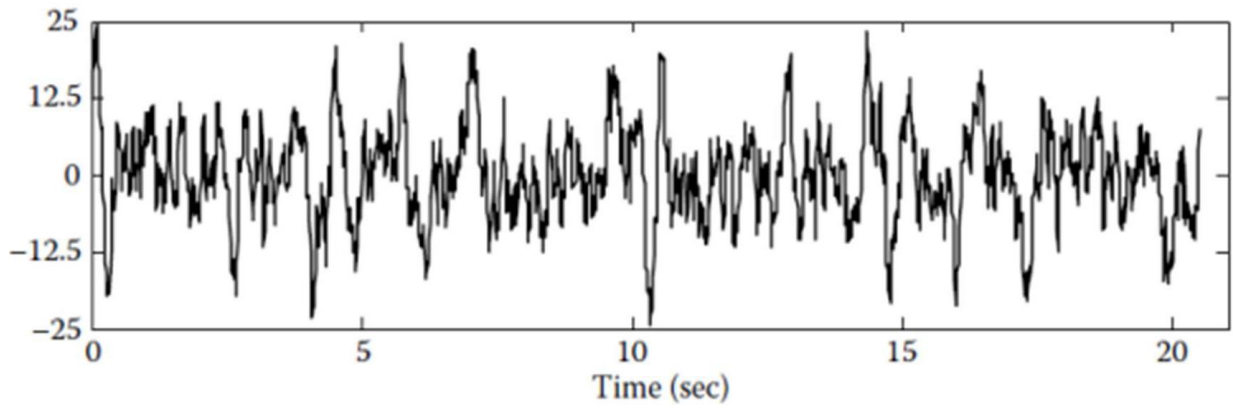
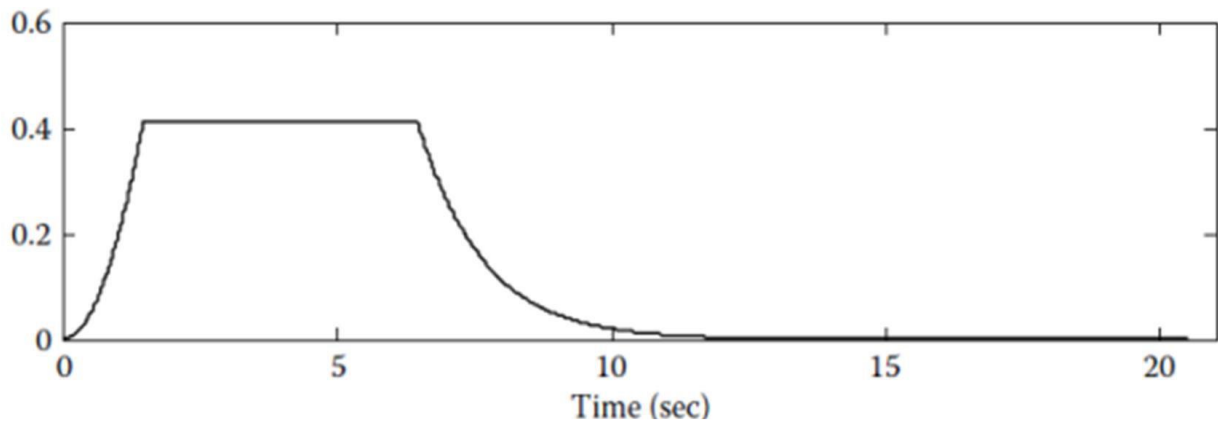


Figure 2.5- Fonction de modulation donnée par Jennings et al (1968)

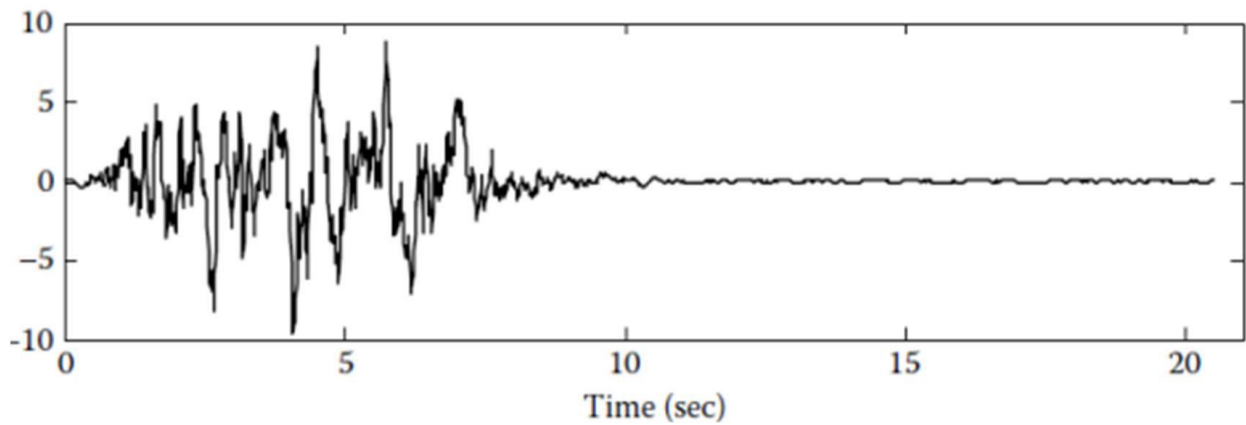
La figure (2.6) montre très bien l'effet de la fonction de modulation sur un accélérogramme stationnaire.



(a) Signal d'accélération stationnaire



(b) Fonction de modulation



(c) Signal d'accélération modulé

Figure 2.6- Effet de la fonction de modulation sur un processus stationnaire (Zerva, 2009).

Pour utiliser cette fonction, il faut assumer que les accélérogrammes générés sont stationnaires et leurs DSP sont indépendantes du temps.

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

2.7. Identification des paramètres sismiques

Afin de déterminer les constantes $S_0, \xi_g, \xi_f, \omega_g$ et ω_f (Figure 2.7) du modèle de la densité spectrale de puissance pour pouvoir générer les accélérogrammes, plusieurs méthodes sont utilisées dans la littérature. On peut les calculer par :

- La densité spectrale de puissance d'un processus aléatoire qui peut être calculé à partir de la transformée de Fourier sous la forme :

$$S(\omega) = \frac{|F(\omega)|^2}{\pi T_D} \quad (2.19)$$

Où $F(\omega)$ est la transformée de Fourier finie du séisme de base (réel), et T_D est la durée du tremblement de terre de base. Puis les constantes peuvent être déterminées en se basant sur l'ajustement de la densité spectrale de puissance de l'équation (2.20), et est montrée dans la figure 2.8

$$S(\omega) = S_0 |H_g(\omega)|^2 |H_h(\omega)|^2 \quad (2.20)$$

$$\text{D'où} \quad |H_g(\omega)|^2 = \frac{\omega_g^4 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_g^j \omega_g \omega)^2} \quad (2.21-a)$$

$$\text{Et} \quad |H_h(\omega)|^2 = \frac{\omega^4}{(\omega_h^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_h^j \omega_h \omega)^2} \quad (2.21-b)$$

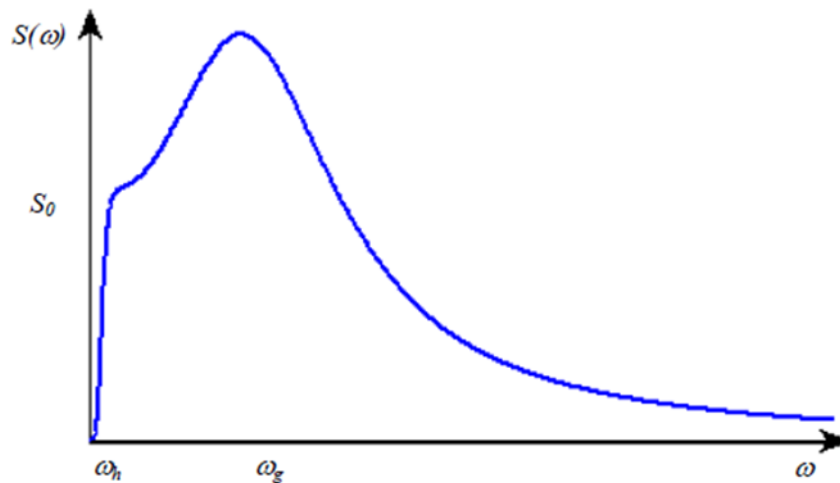


Figure 2.7- La fonction de la densité spectrale de puissance (Somerville et al. 1997).

- Ou si $a(t)$ est un processus stationnaire, la fonction de la densité spectrale de puissance a la même forme que l'amplitude de Spectre de Fourier par l'équation suivante :

$$S(\omega) = \frac{FS^2(\omega)}{\pi T_F} \quad (2.22)$$

Si $a(t)$ n'est pas stationnaire par approximation, les paramètres du modèle de Clough-Penzien peuvent être identifiés en suivant la méthode de Newton-Raphson.

2.8. Conclusion

Le présent chapitre nous a permis de faire la présentation de modèle de simulation des mouvements sismiques ainsi que l'ensemble des paramètres nécessaire pour la formulation du programme à utiliser pour la génération des accélérogrammes.

Chapitre 3

*Logiciel et Programme
Utilisés*

3.1. Introduction

Pour une meilleure exploitation des formules de génération des signaux sismiques recueillies dans le précédent chapitre, nous allons les structurer dans un programme numérique sous l'environnement MATLAB.

Nous présentons aussi dans ce chapitre le logiciel FLAC qui servira pour la validation des résultats obtenus.

3.2. Le logiciel FLAC

3.2.1 Description

FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) (Itasca, 1986) est un logiciel bidimensionnel, basé sur la méthode des différences finies explicites, qui permet de résoudre les problèmes de la géotechnique.

Le code FLAC emploie la méthode de différence finie et satisfait l'équilibre dynamique suivant un procédé explicite pas à pas dans le domaine temporel.

La formulation constitutive à chaque pas est une petite déformation, mais elle est équivalente à une formulation de grande déformation. Le domaine géométrique (modèle de continuum) est discrétisé par l'utilisateur dans une maille de différence finie (grille) composée d'éléments quadrilatéraux (zones). Un élément devrait être assez petit pour être représentant de matériel avec les mêmes propriétés et assez grand de sorte que le fluide et le système de médias poreux puissent être considérés comme milieu poreux homogène statistique. Intérieurement, FLAC subdivise chaque élément deux en jeux recouverts des éléments triangulaires de déformation constant (quatre sous-éléments triangulaires), et des calculs sont effectués pour que ces sous-éléments assurent des résultats numériques plus fiables.

3.2.2 Les Considérations à prendre pour la Modélisation Dynamique

Il y a trois aspects doivent être considérés en préparant un modèle pour une analyse dynamique avec FLAC^{2D} :

1. Le chargement dynamique et les conditions aux limites ;
2. L'amortissement mécanique ; et
3. La transmission d'ondes à travers le modèle.

La figure (3.1) décrit les différentes étapes d'un calcul dynamique par FLAC:

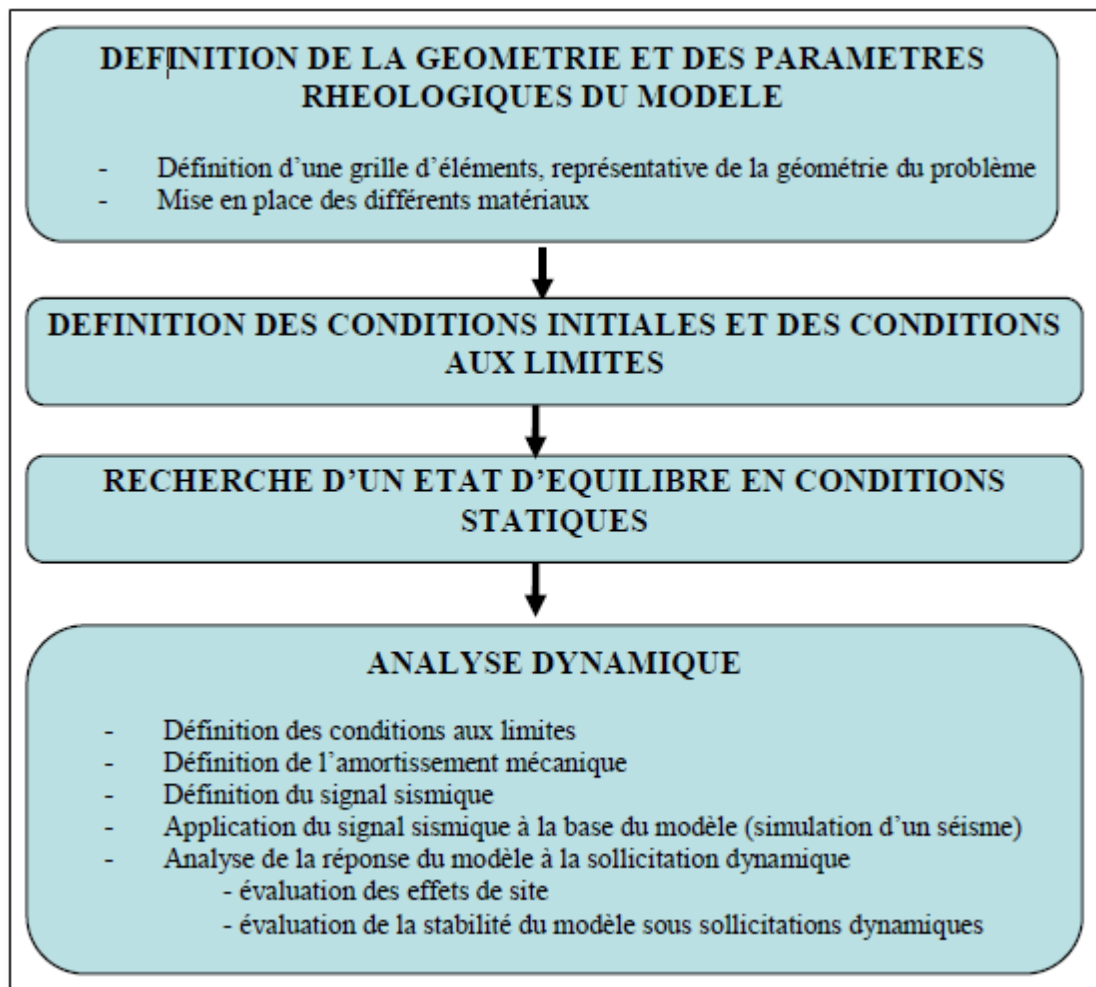


Figure 3.1- Les différentes étapes d'un calcul dynamique avec le logiciel *FLAC^{2D}* (Bourdeau, 2005)

3.2.3 Le Chargement Dynamique et les Conditions aux Limites

FLAC modélise les zones du matériau soumises à un chargement dynamique externe et/ou interne en appliquant à la frontière du modèle ou aux nœuds internes des conditions aux limites. Pour minimiser les réflexions d'ondes à l'intérieur du modèle, FLAC propose des conditions aux limites absorbantes qui atténuent les ondes aux frontières: *Quiet boundaries* (visqueuses), *Free field* (de champ libre), *Three-dimensional radiation-damping*

Dans le code FLAC, le signal dynamique reproduisant les sollicitations dynamiques peut être appliqué :

- Sous forme d'un signal en accélération (appliqué pour les modèles à base rigide);
- Sous forme d'un signal en vitesse (appliqué pour les modèles à base rigide);
- Sous forme d'un signal en contrainte (ou en pression) ou bien (appliqué pour les modèles à base flexible);
- Sous forme d'un signal exprimé en termes de force nodale (appliqué pour les modèles à base flexible).

Le chargement dynamique est habituellement appliqué aux frontières du modèle avec la commande *APPLY*. Les accélérations, les vitesses et les forces peuvent être également appliquées aux nœuds intérieurs du maillage en utilisant la commande *INTERIOR*. Noter que la frontière de champ libre (free field) n'est pas exigée si la seule source dynamique est à l'intérieur du modèle.

La fonction d'histoire pour l'entrée est traitée comme un multiplicateur sur la valeur spécifique avec la commande *APPLY* ou *INTERIOR*. Le multiplicateur d'histoire est assigné avec le mot-clé de **hist** et peut être un des trois formes suivantes :

1. Une table définie par la commande de *TABLE* ;
2. Une histoire définie par la commande *HISTORY* ; ou
3. Une fonction *FISH*.

3.2.4 L'Amortissement Mécanique

Trois types d'amortissement sont inclus dans FLAC^{2D}, notamment : l'amortissement de Rayleigh, l'amortissement local et la viscosité artificielle.

Dans notre travail, nous avons opté pour l'amortissement de Rayleigh, couramment utilisé pour procurer un amortissement approximativement indépendant de la fréquence dans un intervalle restreint de fréquences, comme cela est le cas dans les sols et les roches. L'amortissement de Rayleigh repose sur les deux paramètres suivants: la masse proportionnelle et la rigidité proportionnelle.

FLAC^{2D} permet aux utilisateurs de définir l'un ou l'autre de ces derniers ou l'ensemble des deux. En basses fréquences le premier paramètre est plus dominant, par contre, en hautes fréquences le second est plus dominant.

L'amortissement de Rayleigh dépend de la fréquence mais dispose d'un palier qui s'étend autour du tiers central du domaine des fréquences comme le montre la figure 3.2. Pour tout problème particulier, une analyse spectrale d'un enregistrement typique de la vitesse pourrait produire une réponse telle que celle montrée à la figure 3.2.

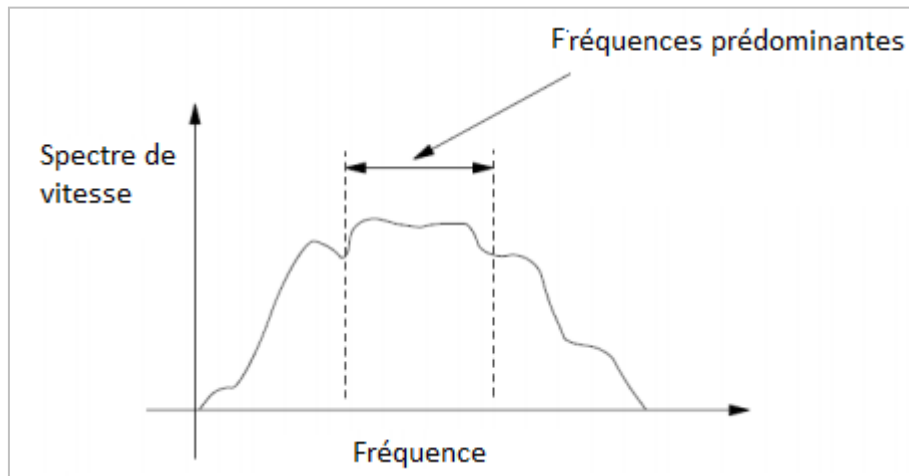


Figure 3.2- *Domaine des fréquences prédominantes pour un signal dynamique (D'après Itasca Optional Features, 2005).*

Pour la simulation de matériaux géologiques, le facteur d'amortissement doit varier de 2 à 5% de l'amortissement critique, c'est-à-dire la valeur d'amortissement pour laquelle le système « hésite » entre un comportement oscillatoire ou apériodique.

En revanche, pour des systèmes comprenant des structures, une valeur comprise entre 2 et 10% est plus représentative (Biggs, 1964, cité par Itasca Optional Features, 2005). Toutefois, dans les configurations qui utilisent un comportement élastoplastique (par exemple Mohr Coulomb), une quantité considérable d'énergie peut être dissipée durant l'écoulement plastique. Donc, pour des analyses dynamiques qui impliquent de grandes déformations, un facteur d'amortissement plus faible (c'est-à-dire 0.5%) peut parfois être suffisant (Dan Touitou, 2002, Chebout .S, 2006 et Itasca Optional Features, 2005).

L'amortissement de Rayleigh est spécifié dans FLAC avec les paramètres f_{min} en Hertz (cycles par seconde) et le ξ_{min} , tous les deux spécifiques avec la commande : **SET dy-damp rayleigh**.

3.2.5 Transmission d'Ondes à travers le Modèle

FLAC^{2D} suggère que le signal sismique d'entrée doit être filtré avant d'être appliqué à la base du modèle. L'entrée des données d'un signal peut avoir des pics maximaux dans un court temps (le temps dans lequel le pic de la vitesse se produit).

Pour répondre à l'exigence suggérée par Kuhlemeyer et Lysmer, 1973, FLAC^{2D} aura besoin d'une génération très fine de la grille, donc plus de temps de calcul. Ce problème peut être surmonté en filtrant le signal et en retirant les composantes à hautes fréquences. Ceci permettra une génération de grille plus adéquate sans affecter les résultats de manière significative (par exemple "FILTER.FIS"), Le procédé de filtrage peut être accompli en utilisant une série de Fourier (Fast Fourier Transforme FFT).

3.3. Le Programme Réalisé

L'objectif principal de notre travail est de simuler des mouvements sismiques à la surface d'un dépôt de sol qui sera par la suite appliqué à la base d'une structure pour étudier et analyser son comportement, notamment que le logiciel Flac ne permet pas une simulation mais plutôt de transférer le mouvement appliqué à une base rocheuse en surface du sol.

Trois objectifs principaux sont ciblés :

- 1) Simuler des mouvements sismiques en tout point d'un dépôt de sol et éventuellement sa base et en surface, au moyen de la fonction de transfert.
- 2) Tenir compte autant que possible des conditions de sol ou des effets de sites dans les mouvements simulés.
- 3) Tenir compte de la sismicité de la région, la magnitude du séisme, la distance épacentrale, la source, le trajet,

A cet effet, un programme numérique de simulation tenant des objectifs cités ci-dessus est réalisé sous l'environnement MATLAB dont l'ossature est présentée sur l'organigramme ci-dessous (Figure 3.3).

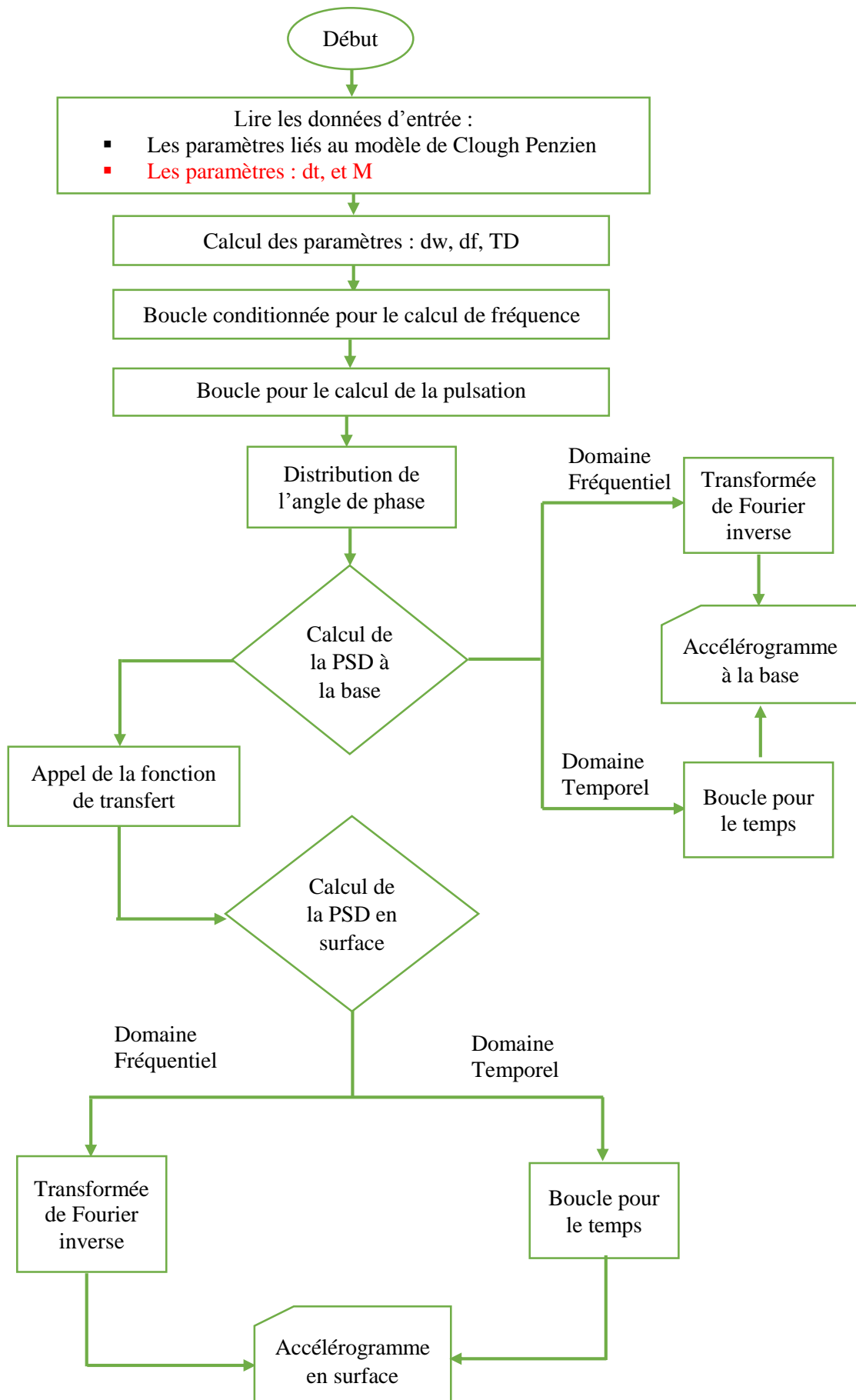


Figure 3.3- Organigramme du programme numérique réalisé.

Les étapes clés dans cet organigramme sont :

- 1) L'évaluation de la fonction de transfert du site étudié
- 2) Calcul de la densité spectral de puissance (DSP) à la surface du sol du site étudié
- 3) Et enfin les simulations des mouvements sismiques.

Notons que ce programme qui permet de simuler des mouvements sismiques à la base comme à la surface de dépôts de sol, permet également de faire la convolution d'un mouvement (accélérogramme) connu à la base d'un dépôt de sol, tout comme réaliser par Flac.

3.4. Conclusion

Le programme réalisé va être utilisé dans le chapitre suivant pour étudier l'amplification des mouvements sismiques à la surface de sites choisis dans la capitale Alger en raison de la disponibilité des signaux enregistrés lors du séisme de Boumerdès 2003 de magnitude 6.9 sur l'échelle Richter.

Nos résultats seront également confrontés à ceux obtenus par le Logiciel Flac afin de valider notre programme.

Chapitre 4

Réponses Sísmiques des Sites

4.1 Introduction

Avant d'entamer la génération des mouvements sismiques, le calcul de la fonction d'amplification ainsi que la convolution de la densité spectrale de puissance en surface du sol sera réalisé dans ce chapitre. A cet effet, nous avons choisi quatre sites sur lesquels sont implantées des stations sismologiques.

Ces mêmes sites seront investis dans le chapitre 5 pour étudier la réponse sismique de structures reposant dessus.

4.2 Descriptions des Sites Etudiés

Afin de valider les résultats obtenus, notre choix a porté sur quatre sites en Algérie pour lesquels les données nécessaires pour notre étude sont disponibles.

Ces sites sont situés approximativement le long de la trace de la faille Thénia qui a causé le séisme de Boumerdès 2003. Selon le contexte géologique, la zone où ces sites sont situés comprend principalement des formations de néogène et quaternaire qui sont généralement des dépôts doux, constitués de sable, de gravier et du sable argileux et elles s'étendent à 30 m au-dessous de la surface du sol.

Les données relatives aux sites sont présentées dans les tableaux ci-dessous :

Tableau 4.1- Propriétés de sol du site de l'Hussein Dey

| N° couche | Profondeur H (m) | Poids volumique (kg/m ³) | Vitesse des ondes de cisaillement Vs (m/s) | Amortissement estimé (%) |
|-----------|------------------|--------------------------------------|--|--------------------------|
| 1 | 2 | 1700 | 211 | 7% |
| 2 | 5 | 1800 | 315 | 7% |
| 3 | 9 | 2200 | 684 | 7% |
| 4 | 4 | 1800 | 474 | 7% |
| 5 | 12 | 1800 | 684 | 7% |
| 6 | 26 | 1800 | 526 | 7% |
| 7 | 2 | 2000 | 789 | 7% |
| Rock | | 2500 | 1500 | 0% |

Tableau 4.2- Propriétés de sol du site de Kouba

| N° couche | Profondeur H (m) | Poids volumique (kg/m ³) | Vitesse des ondes de cisaillement Vs (m/s) | Amortissement estimé (%) |
|-----------|------------------|--------------------------------------|--|--------------------------|
| 1 | 3 | 1700 | 308 | 7% |
| 2 | 8 | 1900 | 385 | 7% |
| 3 | 30 | 1900 | 462 | 7% |
| 4 | 2 | 1900 | 884 | 7% |
| Rock | | 2500 | 1500 | 0% |

Tableau 4.3- propriétés de sol du site de Dar el Beida

| N° couche | Profondeur H (m) | Poids volumique (kg/m ³) | Vitesse des ondes de cisaillement Vs (m/s) | Amortissement estimé (%) |
|-----------|------------------|--------------------------------------|--|--------------------------|
| 1 | 11 | 1800 | 263 | 7% |
| 2 | 16 | 2100 | 447 | 7% |
| 3 | 33 | 2100 | 789 | 7% |
| Rock | | 2500 | 1500 | 0% |

Tableau 4.4- propriétés de sol du site de Boumerdès

| N° couche | Profondeur H (m) | Poids volumique (kg/m ³) | Vitesse des ondes de cisaillement Vs (m/s) | Amortissement estimé (%) |
|-----------|------------------|--------------------------------------|--|--------------------------|
| 1 | 5 | 2100 | 237 | 7% |
| 2 | 6 | 2100 | 385 | 7% |
| 3 | 16 | 2000 | 632 | 7% |
| Rock | | 2500 | 1500 | 0% |

4.3 Fonctions d'Amplification des Sites Etudiés

La génération des accélérogrammes en surface d'un sol à partir d'une excitation simulée à sa base rocheuse ou à un affleurement rocheux dépend de l'étude de son comportement vis-à-vis cette excitation. Donc la détermination de la fonction d'amplification est indispensable pour l'évaluation de la réponse de ce dernier.

Pour la détermination des réponses des quatre sites choisis, nous avons utilisé la fonction d'amplification préalablement programmée au chapitre 3. Cette fonction est étudiée d'abord à travers l'effet de la variation du coefficient d'amortissement. 0%, 7% et 15% sont les valeurs considérées pour cette étude.

Nous avons tracé la fonction d'amplification pour chacun des sites tenant en compte :

- Cas d'un rocher rigide et
- Cas d'un affleurement rocheux.

Les résultats obtenus sont présentés ci-après :

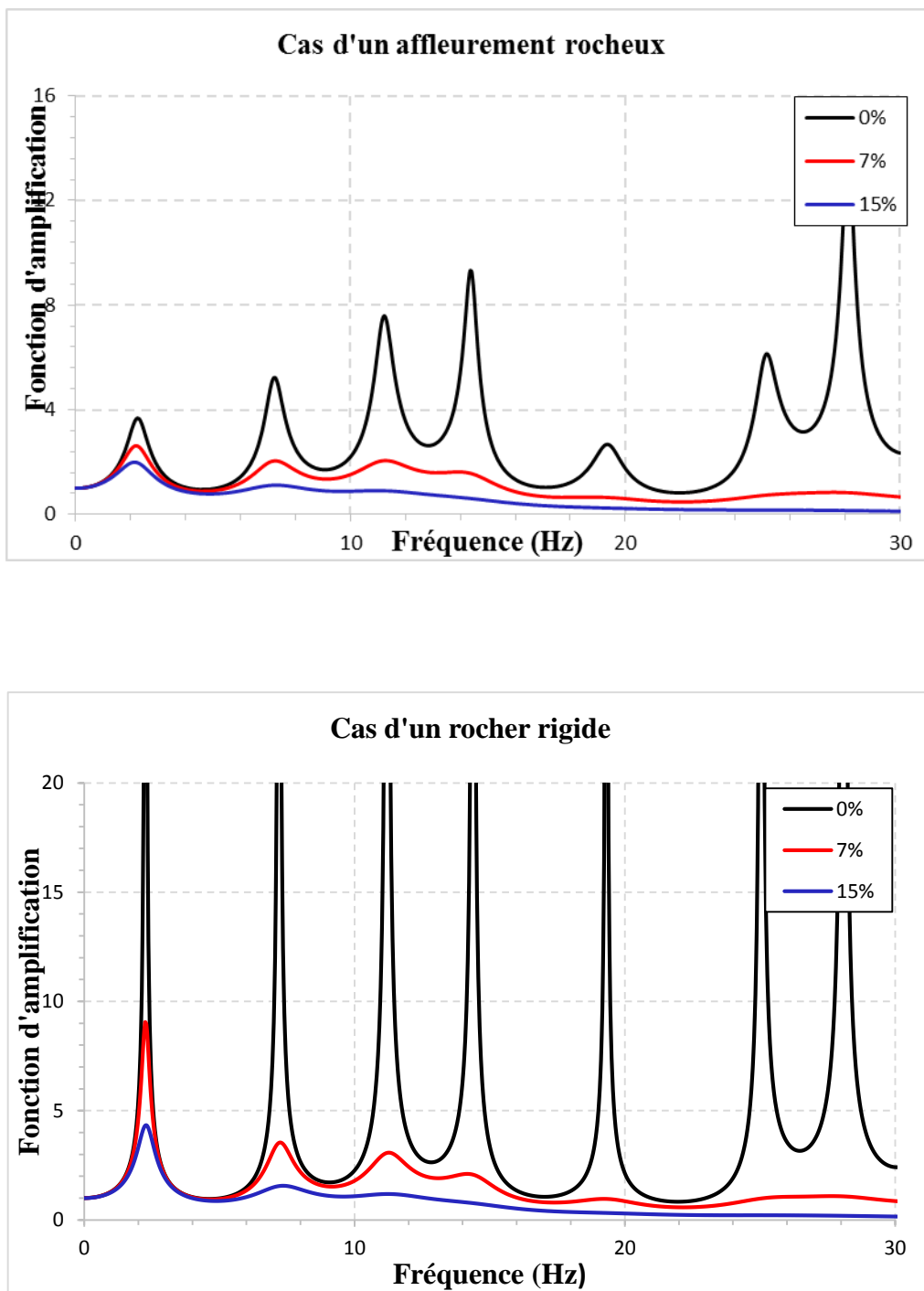


Figure 4.1- Fonction d'amplification du site de l'Hussein Dey

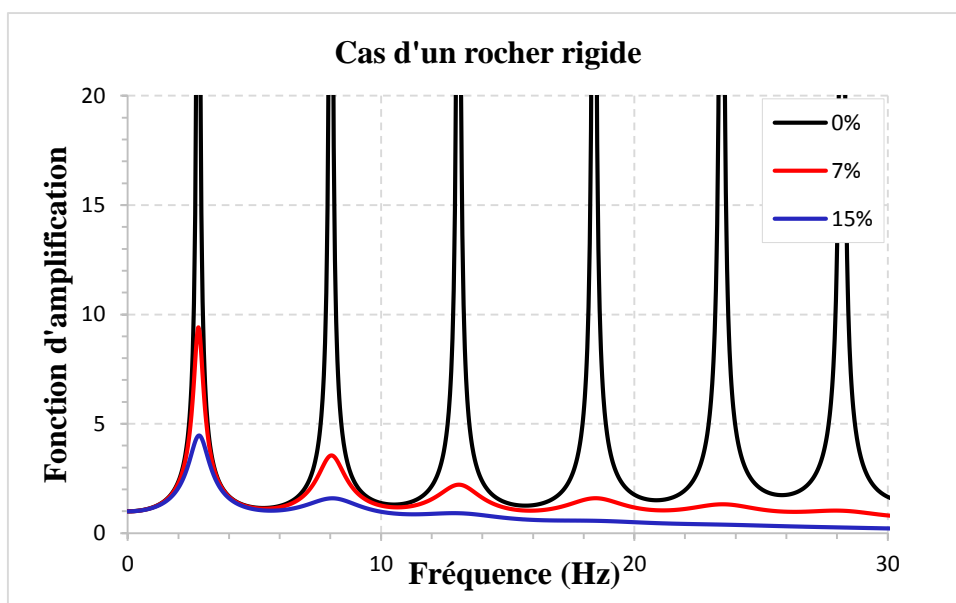
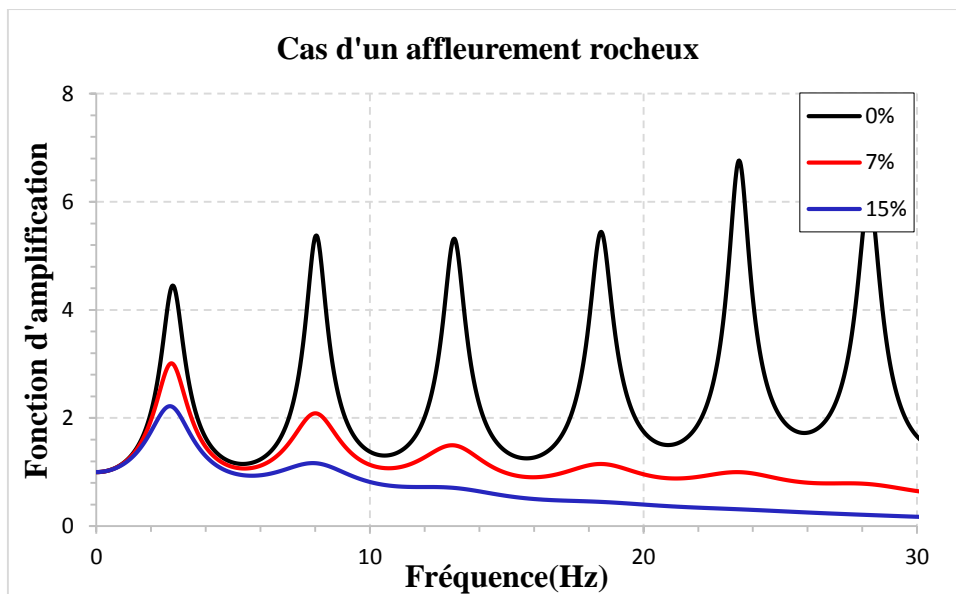


Figure 4.2- Fonction d'amplification du site de Kouba

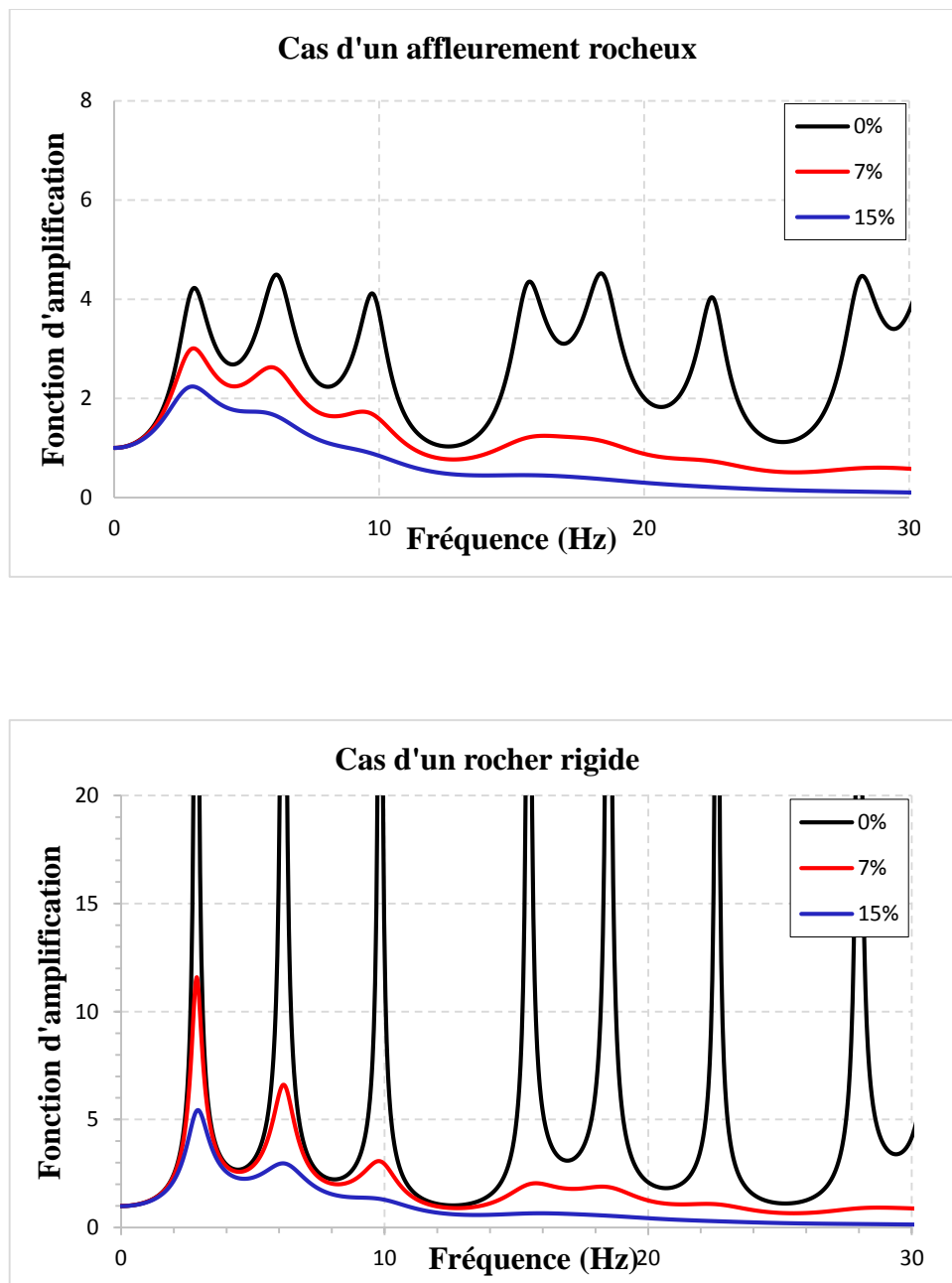


Figure 4.3- Fonction d'amplification du site de Dar el Beida

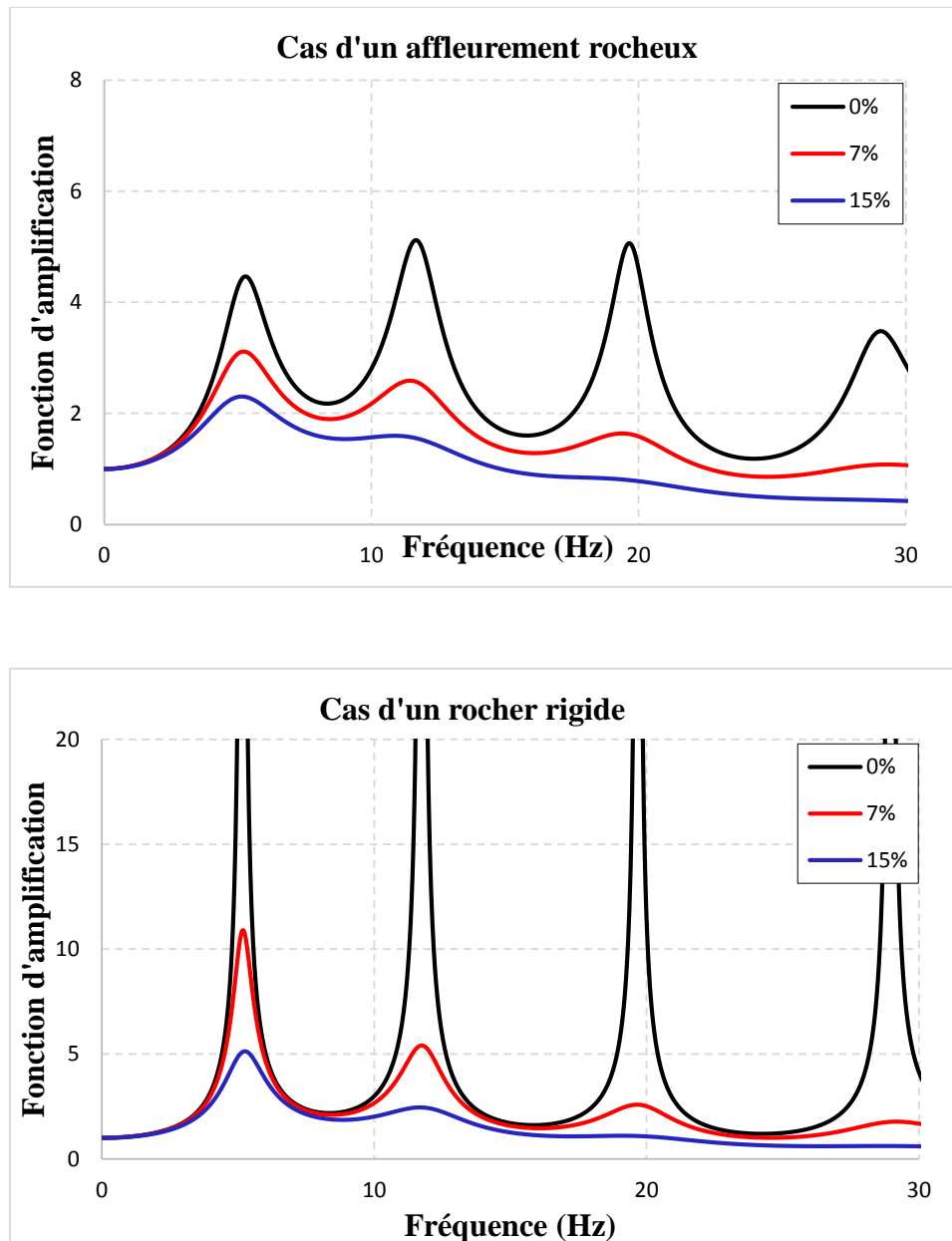


Figure 4.4- Fonction d'amplification du site de Boumerdès

Dans le cas de l'hypothèse d'un sol multicouche reposant sur base rocheuse supposée en affleurement, l'amplitude de la fonction d'amplification diminue au fur et à mesure que l'amortissement augmente. Cependant pour le cas de l'amortissement nul, les amplitudes correspondant aux fréquences propres sont finies à l'inverse du cas du rocher rigide. Ceci est dû à l'amortissement radiatif.

Nous comparons dans le tableau 4.5, les amplitudes maximales des fonctions d'amplification des quatre sites et les fréquences correspondantes.

Tableau 4.5 : Amplitudes et fréquences des fonctions d'amplification des sites étudiés pour un coefficient d'amortissement de 7%

| Site | Affleurement rocheux | | Rocher rigide | |
|--------------|----------------------|----------------|--------------------|----------------|
| | $H_{\max}(\omega)$ | Fréquence (Hz) | $H_{\max}(\omega)$ | Fréquence (Hz) |
| Hussein Dey | 2.625 | 2.19 | 9.052 | 2.246 |
| Kouba | 3.010 | 2.734 | 9.403 | 2.783 |
| Dar el Beida | 3.008 | 2.978 | 11.592 | 2.880 |
| Boumerdès | 3.115 | 5.224 | 10.814 | 5.225 |

A partir des figures (4.1) à (4.4) et du tableau (4.5) on constate que les sites de l'Hussein Dey, Kouba et Dar el Beida ont des fréquences inférieures comparant à la fréquence du site de Boumerdès ce qui signifie que le site de Boumerdès est plus dance que les autres sites. Ceci est clair à partir des valeurs des ondes de cisaillement des différents sites.

4.4. Fonctions de Densité Spectrale de Puissance à la Surface des Sites Etudiés

En se basant sur la formule de Kaiming (2012), qui lie la densité spectrale de puissance en surface (DSP) à la densité spectrale de puissance à la base par le biais de la fonction de transfert, citée précédemment dans le chapitre 2, et en utilisant le programme élaboré pendant ce travail nous avons procédé aux calculs y relatifs pour les quatre sites choisis.

La densité de puissance à la base est calculée à partir de la transformée de Fourier du séisme enregistré à l'affleurement rocheux de Keddara lors du séisme de Boumerdès en 2003, puisque c'est le seul enregistrement enregistré sur rocher durant ce séisme..

Les résultats de la densité spectrale de puissance (DSP) sont présentés dans les figures ci-dessous.

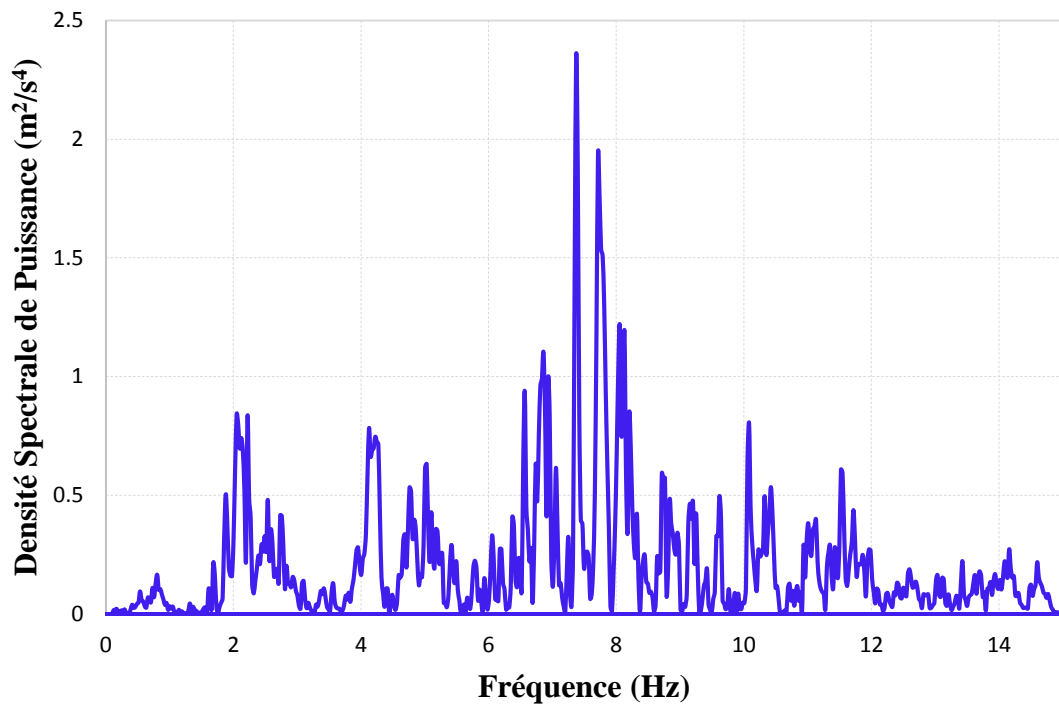


Figure 4.5- La DSP Simulée en surface pour le site de l'Hussein Dey

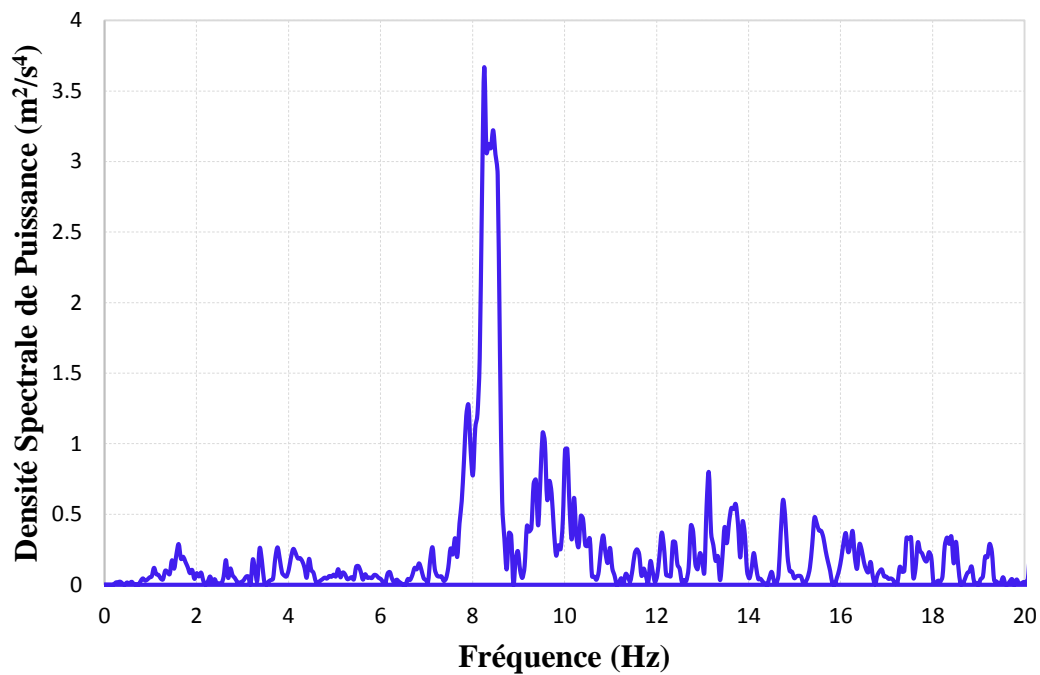


Figure 4.6- La DSP Simulée en surface pour le site de Kouba

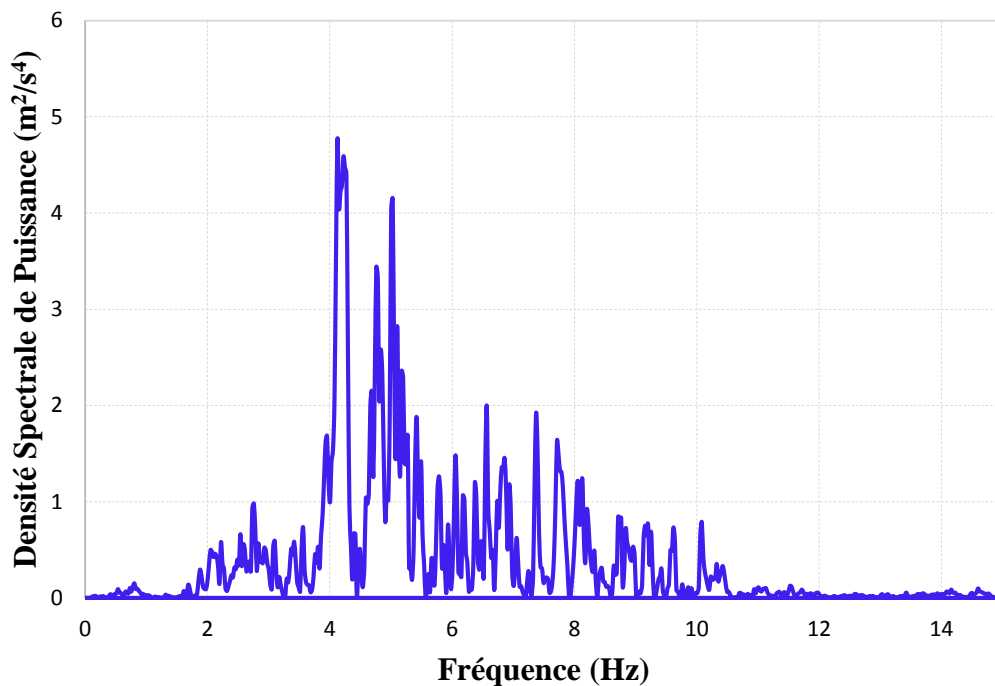


Figure 4.7- La DSP Simulée en surface pour le site de Dar el Beida

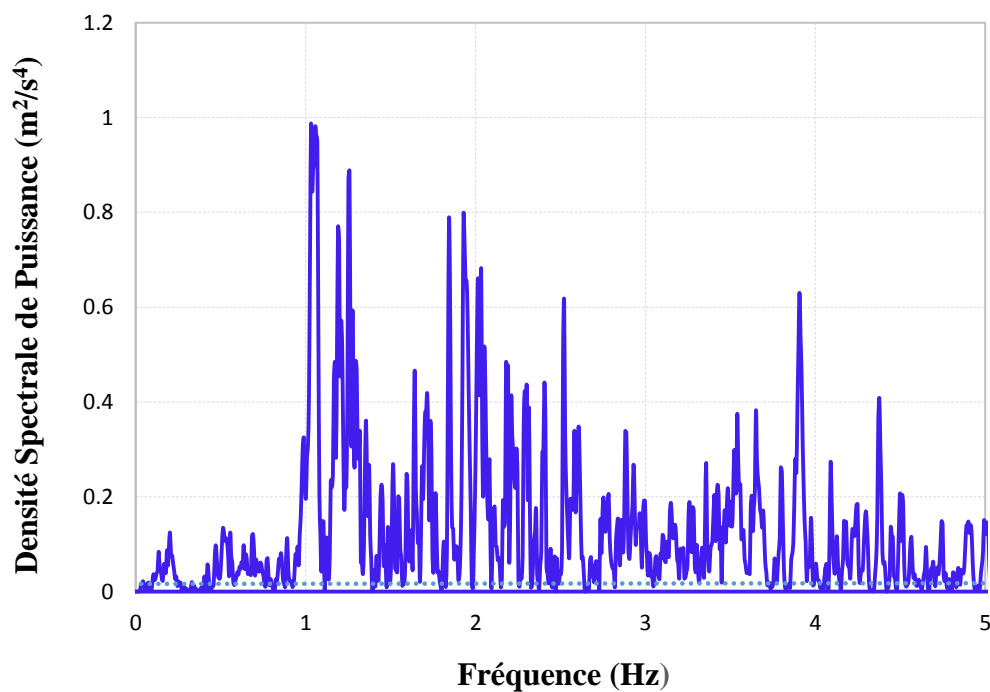


Figure 4.8- La DSP Simulée en surface pour le site de Boumerdès

Les amplitudes maximales de la densité spectrale de puissance calculée à la surface de chacun des quatre sites étudiés et les fréquences correspondantes sont montrées sur le tableau 4.6.

Tableau 4.6 : Amplitudes et fréquences des densités spectrales de puissance des sites étudiés pour un coefficient d'amortissement de 7% dans le cas d'un affleurement rocheux.

| Site | DSP _{max} (ω) | Fréquence (Hz) |
|--------------|---------------------------------|----------------|
| Hussein Dey | 2.350 | 0.567 |
| Kouba | 3.666 | 0.825 |
| Dar el Beida | 4.768 | 0.892 |
| Boumerdès | 0.987 | 1.031 |

Nous constatons des figures 4.5 à 4.8 et du tableau 4.6 que les effets de site ont une influence importante pendant un tremblement de terre, ceci apparait clairement au site de Boumerdès qui a la fréquence la plus élevée tandis que la valeur de sa densité spectrale est la plus petite parmi les valeurs des DSP des autres sites.

4.5. Conclusion

Le cœur du programme élaboré est la détermination de la densité spectrale de puissance à la base comme en surface, l'étape concrétisée dans ce chapitre 4.

Il nous reste, à générer et à valider les accélérogramme en surface qui sera réalisé dans le prochain chapitre.

Chapitre 5

Amplifications des Mouvements Sismiques et Réponses Sismiques des Structures

5.1. Introduction

Nous arrivons ainsi à la dernière étape de notre travail, la validation et l'exploitation des résultats obtenus.

Pour la validation, nous comparons les signaux sismiques générés avec le programme élaboré avec ceux enregistrés lors du séisme du 21 mai 2003 survenu à Boumerdès sur les sites choisis.

Une analyse dynamique d'une structure par accélérogramme est réalisée à la fin de ce chapitre pour mettre en pratique ces résultats.

5.2. Réponse Sismique des Sols au moyen du Logiciel FLAC

Pour une analyse dynamique des sols avec FLAC, le site de site d'Hussein dey a été choisi.

Les étapes décrites ci-après sont suivies pour avoir sa réponse sismique :

- Le maillage

Notre dépôt de sol a été représenté par des éléments ajustés en spécifiant les propriétés des différentes couches de telle manière à avoir sa forme stratigraphique réelle, en imposant des conditions aux limites comme montre dans la figure (5.1).

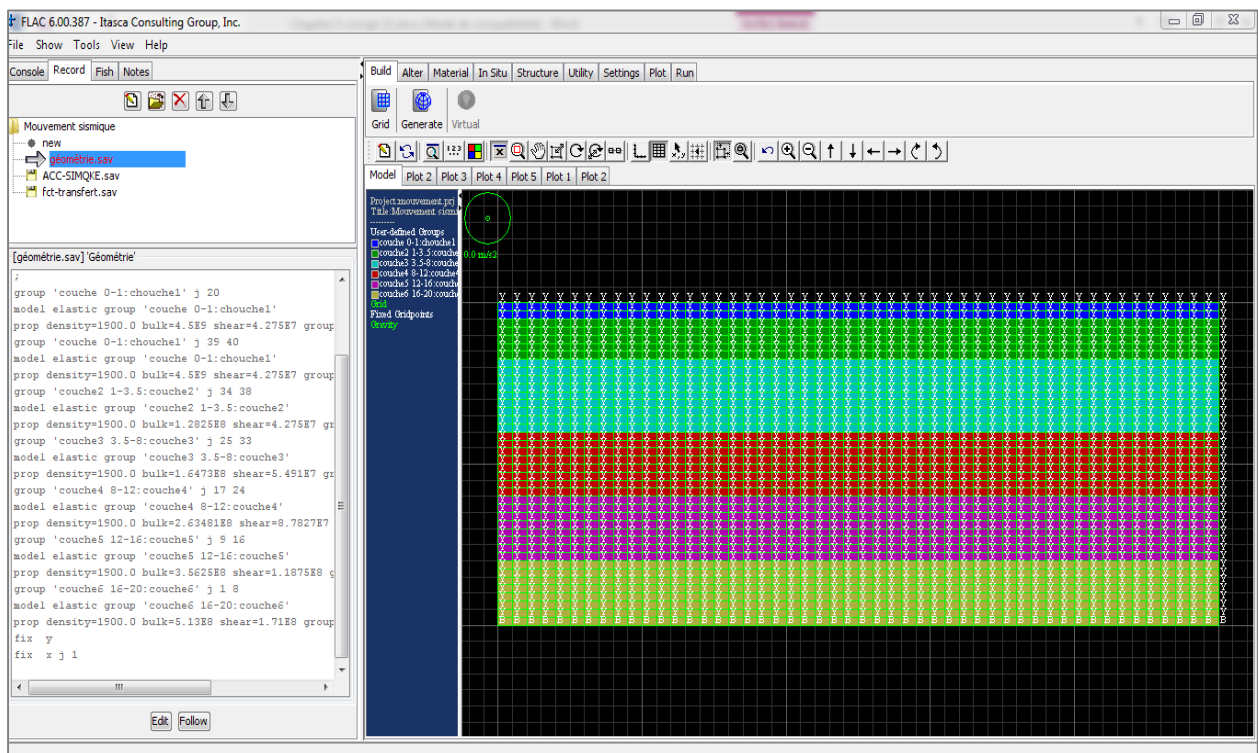


Figure 5.1- Modélisation du dépôt de sol en FLAC

- Un accélérogramme à la base du dépôt pour avoir notre excitation (figure 5.2).

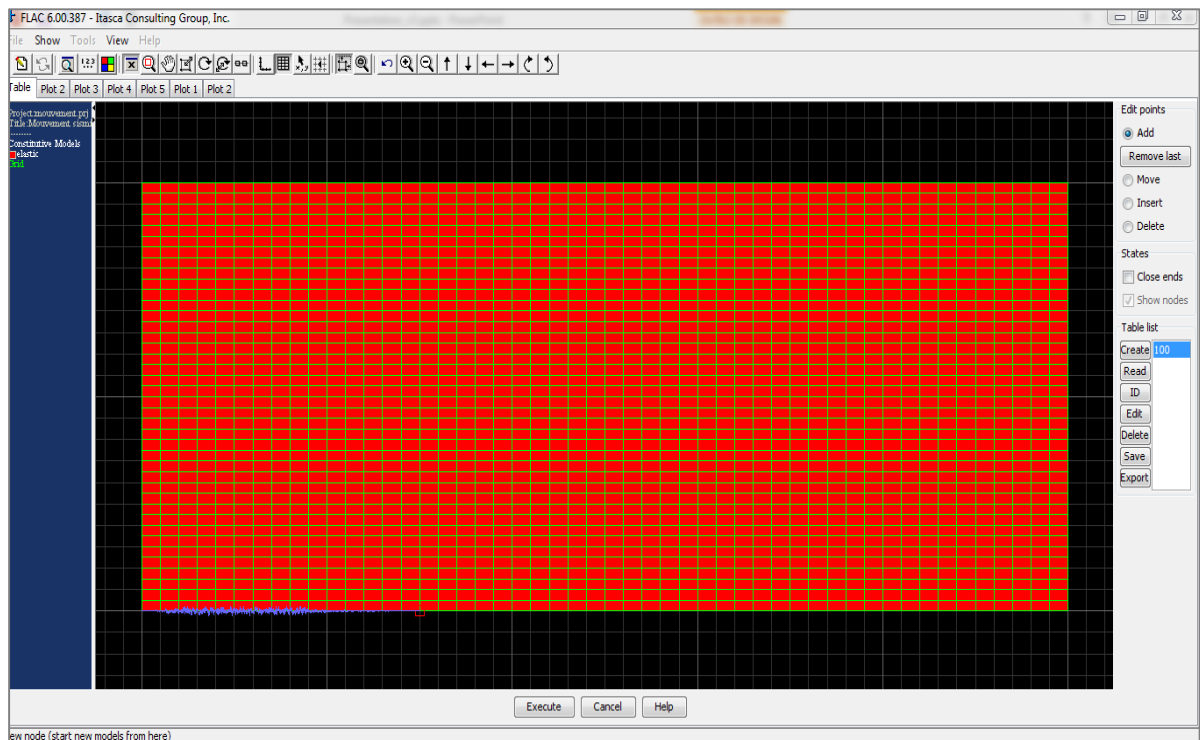


Figure 5.2- Excitation à la base du dépôt (FLAC)

- Le code FLAC est utilisé pour avoir la réponse du modèle à la sollicitation dynamique : évaluation des effets de site et évaluation de la stabilité du modèle sous sollicitations dynamiques. En figure 5.3 est montrée la réponse dynamique (sismique) du dépôt de sol.

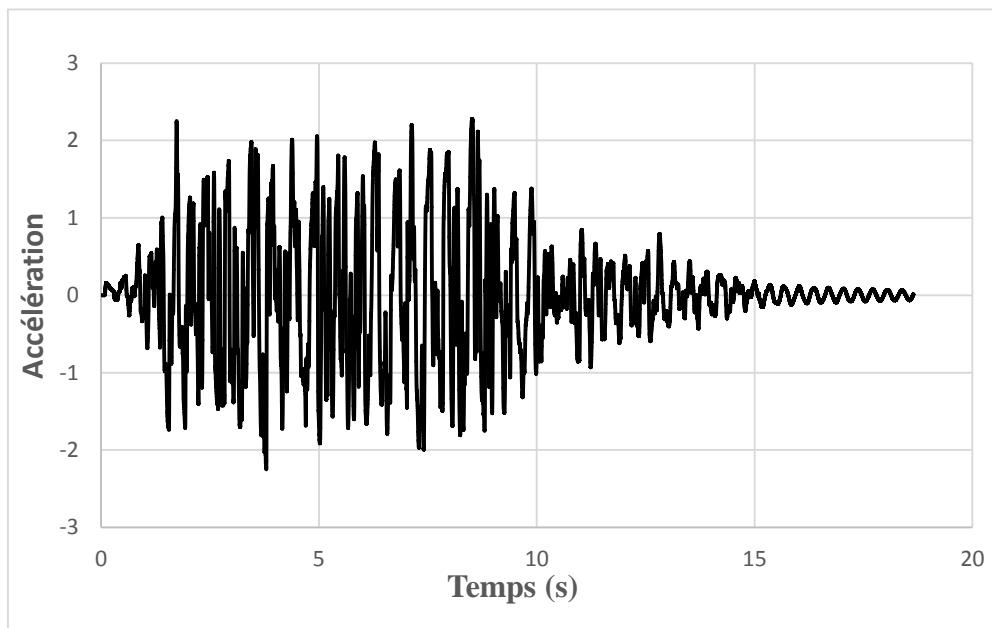


Figure 5.3- Réponse dynamique du dépôt (FLAC)

5.3. Simulation des Mouvements Sismiques :

5.3.1. A l'affleurement Rocheux

La figure (5.4) montre un accélérogramme généré à l'affleurement rocheux de chacun des quatre sites étudiés en le calculant à partir de la densité spectrale de puissance de l'accélérogramme enregistré à la station rocheuse de Keddara pendant le séisme de Boumerdes 2003, avec notre programme.

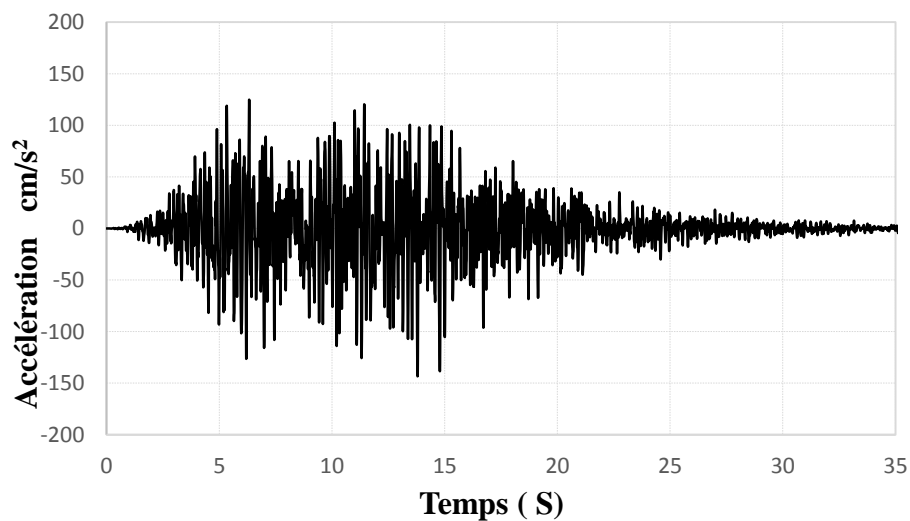


Figure 5.4- Accélérogramme simulé à l'affleurement rocheux de Keddara

5.3.2. En Surfaces de Sols

En utilisant la densité spectrale de puissance calculée précédemment en surface de sol pour les quatre sites choisis, nous avons pu calculer ou bien générer les accélérogrammes en surfaces montrés sur les figures 4.5 au 4.8 :

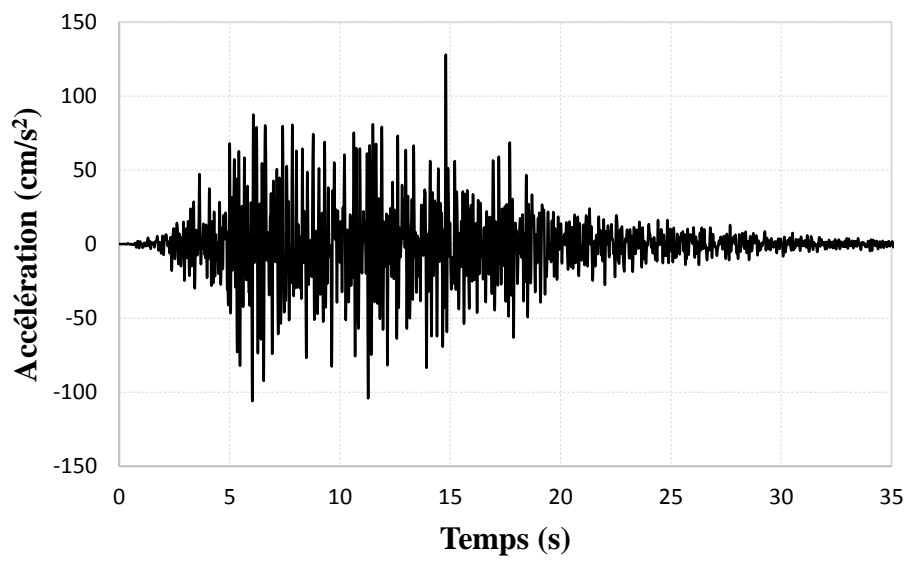


Figure 5.5- Accélérogramme simulé en surface du site de l'Hussein Dey

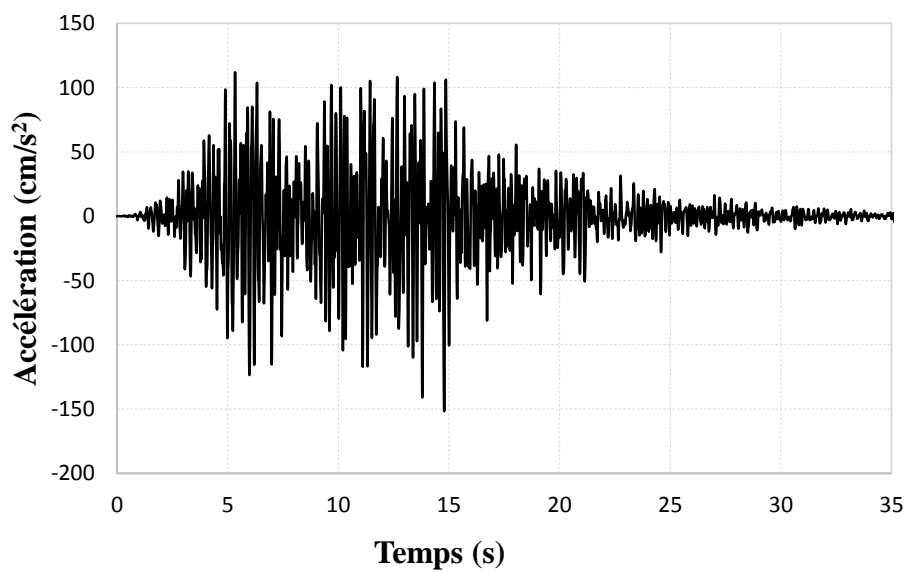


Figure 5.6- Accélérogramme simulé en surface du site de Kouba

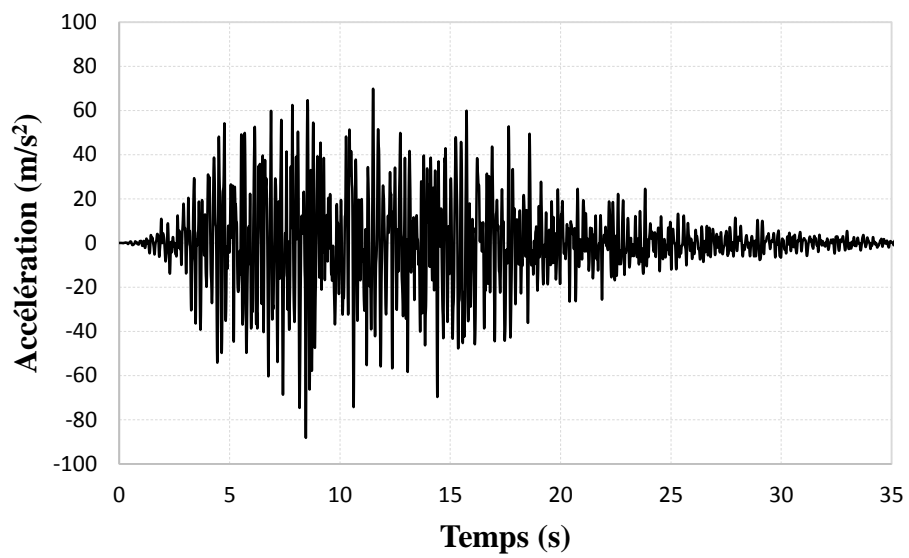


Figure 5.7- Accélérogramme simulé en surface du site de Dar el Beida

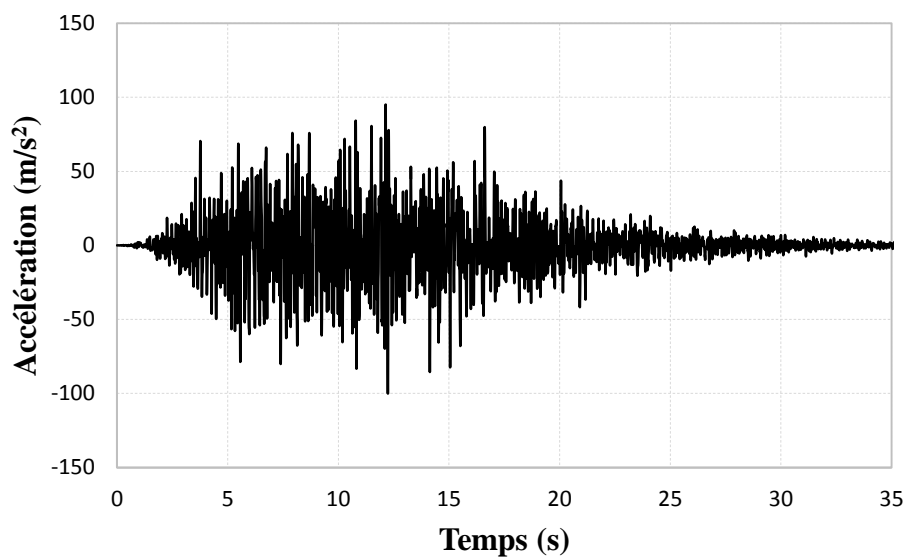


Figure 5.8- Accélérogramme simulé en surface du site de Boumerdès

5.4. Comparaison des Mouvements Simulés avec des Accélérogramme Réels

Après avoir simulé les mouvements sismiques pour les choisis, nous devons valider les résultats obtenus. Donc une comparaison avec les accélérogrammes réels sera effectuée dans ce qui suit :

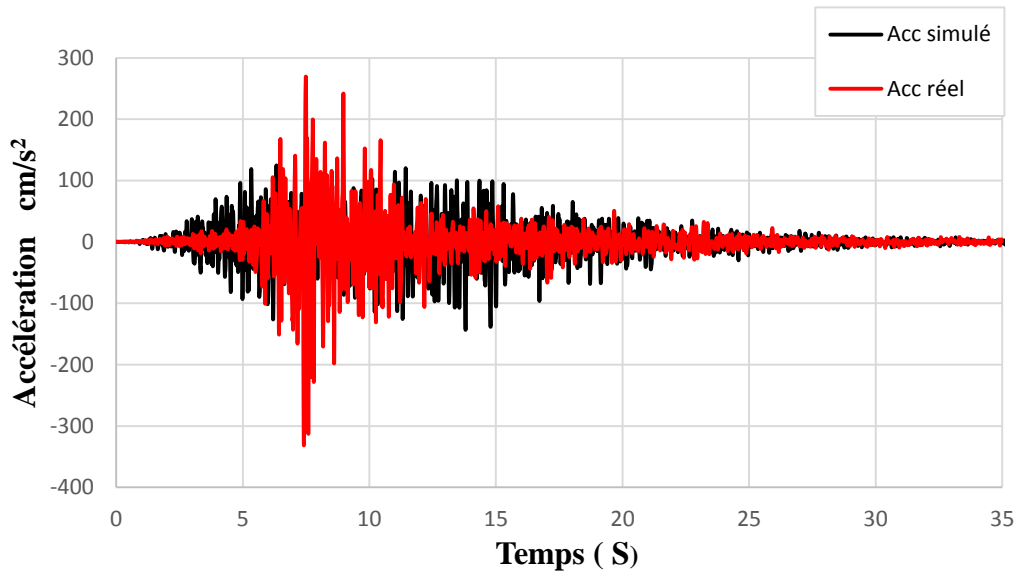


Figure 5.9- Accélérogrammes simulé et réel du site rocheux de Keddara

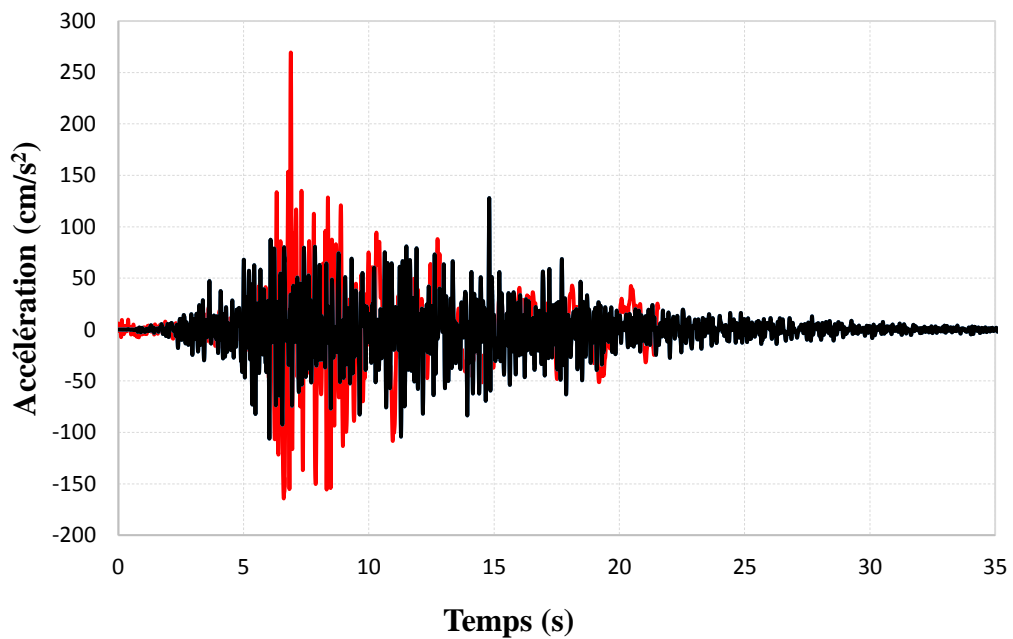


Figure 5.10- Accélérogrammes simulé et réel en surface du site de l'Hussein Dey

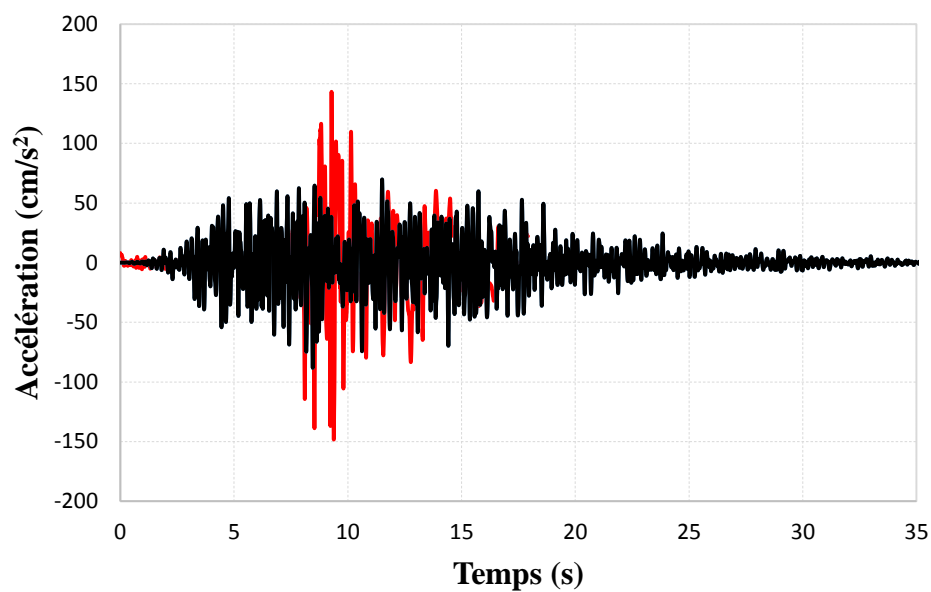


Figure 5.11- Accélérogrammes simulé et réel en surface du site de Kouba

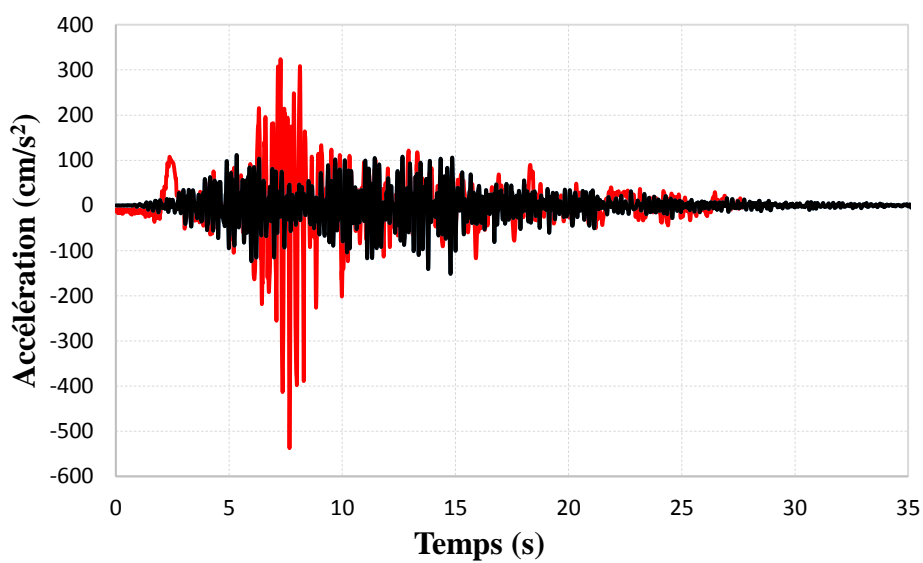


Figure 5.12- Accélérogrammes simulé et réel en surface du site de Dar el Beida

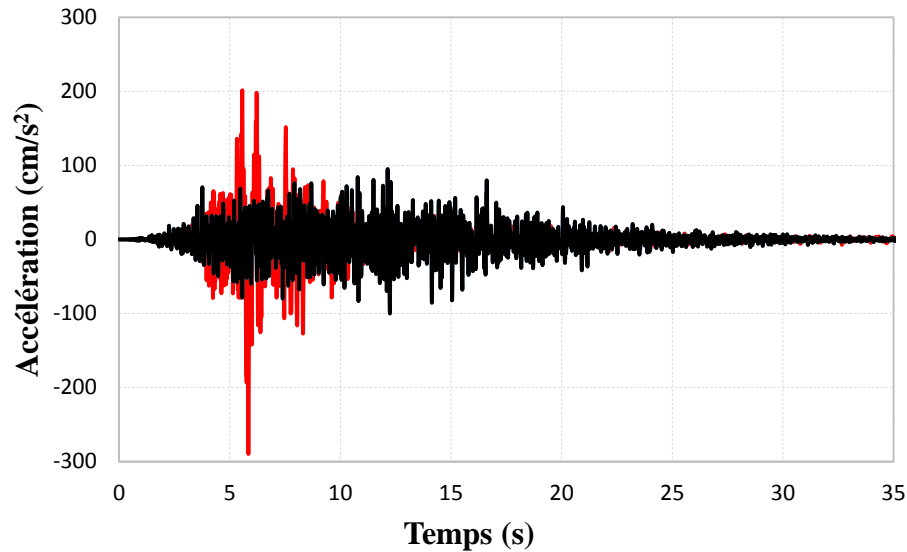


Figure 5.13- Accélérogrammes simulé et réel en surface du site de Boumerdès

On constate que l'allure des accélérogramme est identique ainsi qu'ils ont le même intervalle de variation Malgré que leur parcours est différent et cela est dû principalement aux erreurs d'enregistrements (l'environnement, pas de filtre da parasite,) Mais les accélérogrammes simulés donnent une bonne compatibilité avec les réels.

5.5. Réponses Sismiques de Structures aux Mouvements Simulés et Enregistrés

5.5.1. Identification de la structure

La structure étudiée est un bâtiment à usage administratif implanté en zone de forte sismicité (zone IIb). Il est composé d'un RDC et de cinq étages dont la géométrie est décrite dans les figures (5.14) et (5.15) en 3-D et en plan, respectivement. Elle est composée d'une ossature mixte (voile-portiques) en béton armé. Les planchers sont composés de poutrelles et corps creux (16+4), le remplissage des façades est en maçonnerie. Le bâtiment est supposé fondé sur un sol meuble.

Les dimensions en plan du bâtiment (figure 5.15), typiques à tous les planchers, sont de 15.85 x 10.25 m², avec une hauteur de 4 m pour le rez-de-chausser et le premier étage et 3,06 m pour les autres étages.

Les dimensions des sections de tous les poteaux et les poutres porteuses et non porteuses sont, respectivement, 35 x 35cm², 30 x 40 cm² et 30 x30 cm². Les voiles sont d'une épaisseur de 15 cm.

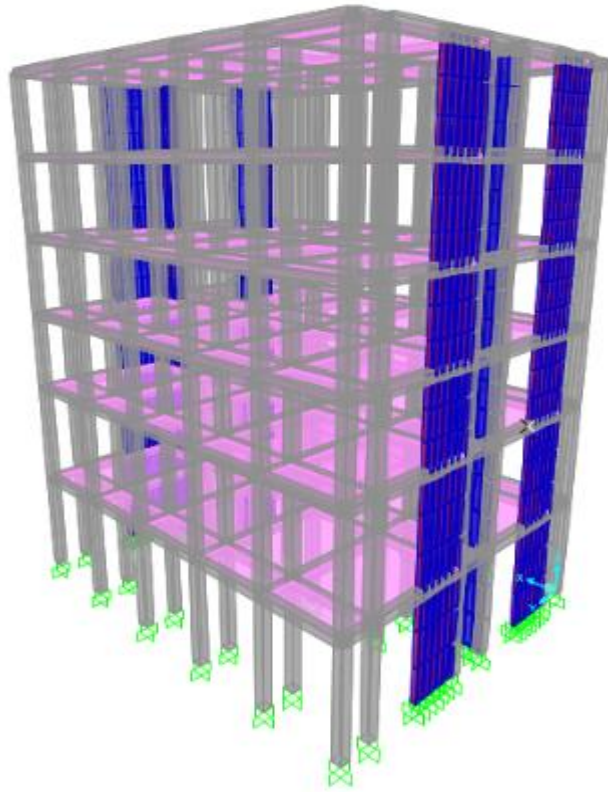


Figure 5.14- Vue en 3-D du bâtiment considéré.

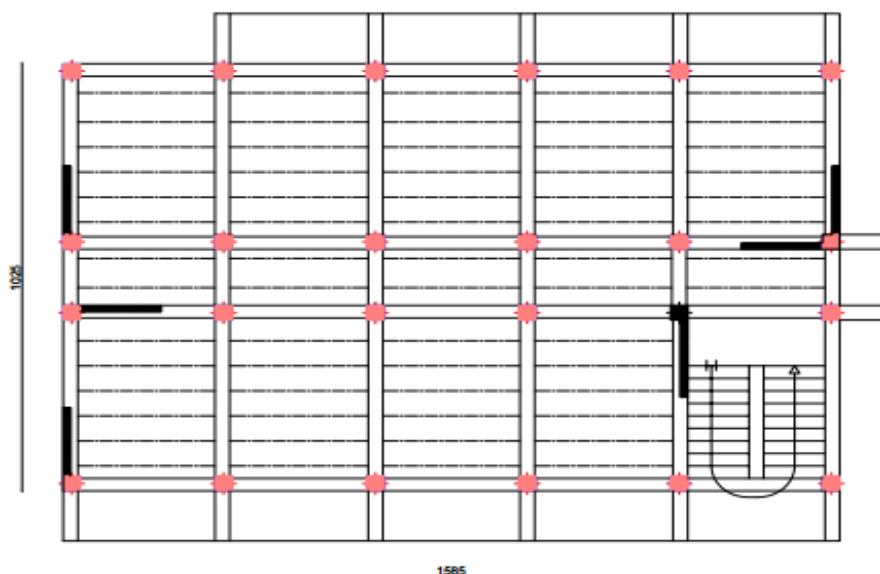


Figure 5.15- Vue en plan du bâtiment considéré.

5.5.2. Réponses Sismiques de Structures aux Mouvements Enregistrés

La charge sismique à appliquer à la base du bâtiment choisi est évaluée selon la méthode d'analyse par accélérogramme.

L'analyse des structures sous l'action des séismes consiste à déterminer les forces maximales et surtout les déformations maximales qu'elles peuvent subir. Ces informations permettent de les dimensionner afin de résister au tremblement de terre

Dans notre étude, nous avons excités notre structure deux fois, au premier lieu avec un accélérogramme de Boumerdès réel et simulé.

Les déplacements latéraux d'étages du bâtiment.

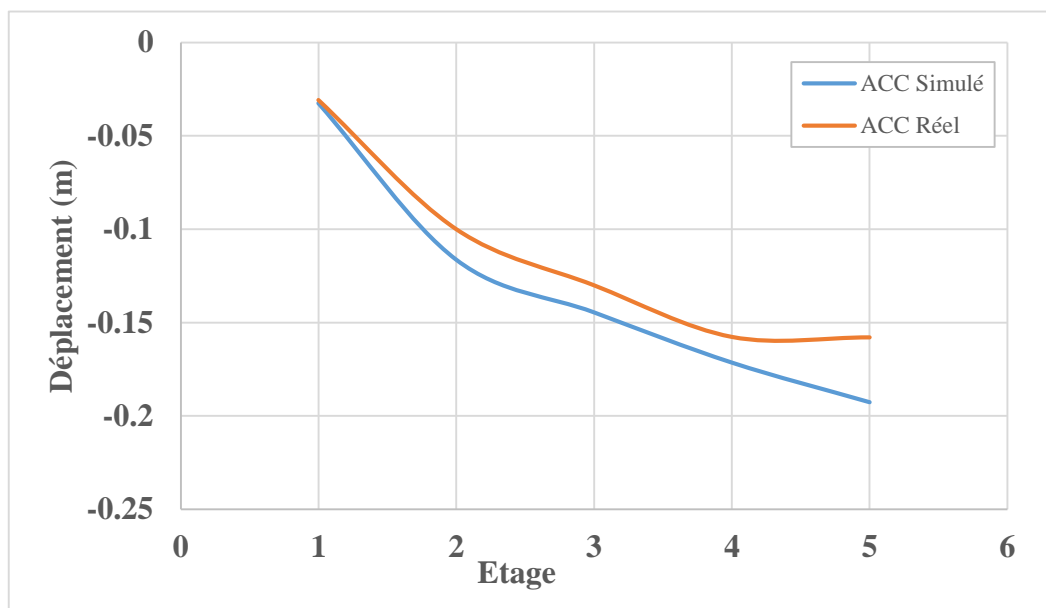


Figure 5.16- déplacement latéral du bâtiment dans les deux cas d'excitations Simulées et réelles.

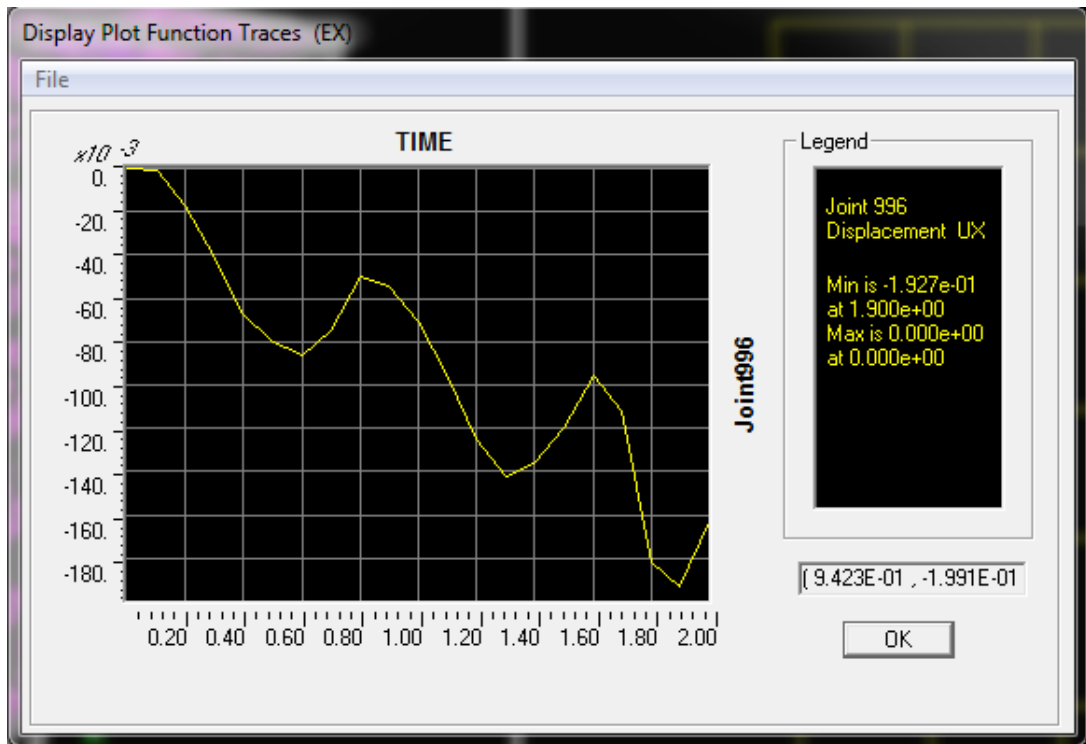


Figure 5.17- déplacement du bâtiment du à l'excitation simulée.

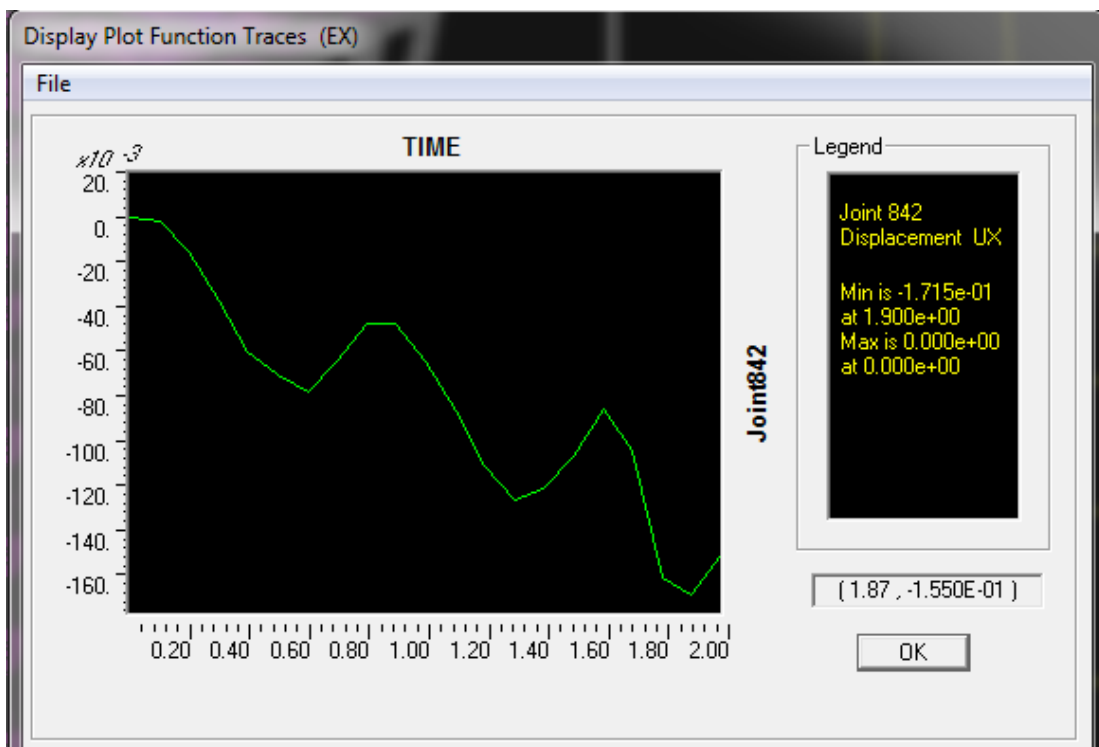


Figure 5.18- déplacement du bâtiment du à l'excitation réelle

5.6. Conclusion

La validation nous a donné de bons résultats, donc la simulation est un grand gain dans la vie des ingénieurs en génie civil.

Conclusion Générale et Recommandations

1. Conclusions Générales

Diverses méthodes sont offertes 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 est appelé à générer les signaux sismiques.

Plusieurs approches sont disponibles dans la littérature pour la génération des mouvements sismiques, pour notre travail de master, nous avons opté à l'utilisation du modèle de Clough Penzian pour le calcul de la densité spectrale de puissance afin de pouvoir générer des accélérogrammes à la base rocheuse comme en surface libre du sols. Le modèle a été numérisé dans un programme Matlab.

Les signaux sismiques générés ont été comparés à des enregistrements réels. Cette comparaison a permis de valider le programme élaboré.

Une étude de réponses sismiques d'une structure a été réalisée pour approuver l'exploitation des mouvements générés.

2. Recommandations futures

Utilisation du modèle de Boore pour mieux comprendre le comportement du séisme.

Elaboration d'un programme pour l'identification des paramètres sismiques.

Prise en compte de la variabilité spatiale dans la génération des mouvements sismiques afin de s'approcher de la réalité.

.....

Références Bibliographiques

Afra H., Hadid M., (1995), *Interaction sol-structure. Séminaire en dynamique des sols*, Centre de Recherche Appliquée en Génie Parasismique.

Amin M. and Ang A. H. -S., (1968), *Nonstationary Stochastic Models of Earthquake Motions*, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 94, pp. 559–583.

Bommer J. J., Acevedo A. B. and Douglas J., (2003), *The Selection and Scaling of Real Earthquake Accelerograms for Use in Seismic Design and Assessment*, Proceedings of ACI International Conference on Seismic Bridge Design and Retrofit, American Concrete Institute.

Boore. D.M., (2009), *Comparing Stochastic Point-Source and Finite-Source Ground-Motion Simulations: SMSIM and EXSIM*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 99, pp. 3202–3216.

Boore. D. M., (2003), *Simulation of ground motion using the stochastic method*, Pure and Applied Geophysics, Vol.160, pp. 635–676.

Boore. D. M., (1983), *Stochastic simulation of high frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.73, pp.1865–1894.

Bora S.S., Scherbaum F., Kuehn N., and Stafford P., (2014), *Fourier spectral and duration models for the generation of response spectra adjustable to different source-, propagation-, and site conditions*, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 12, pp. 467–493.

Cacciola P., Deodatis G., (2011), *A method for generating fully non-stationary and spectrum-compatible ground motion vector processes*, Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 31, pp. 351–360.

Derras B., Maachou O., Zendagui D., (2002), *Simulation des mouvements sismiques par différents modèles de cohérence*, JNGG, Nancy.

Fahjan Y. M., (2008), *Selection and Scaling of Real Earthquake Accelerograms to Fit the Turkish Design Spectra*, pp. 1231-1250.

Fahjan Y. M., (2010), *Selection, Scaling And Simulation Of Input Ground Motion For Time History Analysis Of Structures*, SEMINAR AND LUNCH ON EARTHQUAKE ENGINEERING AND HISTORIC MASONRY.

Goldberg J. E., Bogdanoff J. L., and D. R. Sharpe, (1964), *The response of simple nonlinear systems to a random disturbance of earthquake type*, the Seismological Society of America, Vol. 54, pp. 263–276.

Goto H. and Toki K., (1969), *Structural response to nonstationary random excitation*, Proceedings of 4th WCEE, Santiago, pp. 130–144.

- Harichane Z., Afra H., (2011), *Notions de base du génie parasismique*, In: Bouafia A., Editor. Introduction à la géotechnique. Alger: OPU, p.141–160.
- Kaiming B., Hong H., (2012), *Modelling and simulation of spatially varying earthquake ground motions at sites with varying conditions*, Probabilistic Engineering Mechanics Journal, Vol.29, pp. 92–104.
- Kanai K., (1957), *Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground motion*, Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Vol.35, pp. 309–325.
- Okawa I., Toshihide K. and al., *On the generation of the design earthquake ground motion time history*.
- Pecker A., (2012), *Dynamique des ouvrages*, Polycopié, ENPC, France.
- Pecker A., (1984), *Dynamique des sols*, Ed. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, p. 262.
- Priestley M.B., (1965), *Evolutionary spectra and nonstationary processes*, Journal of the Royal Statistical Society, Vol. 27, pp. 204–237.
- Priestley M.B., (1981), *Spectral Analysis and Time Series*, Academic Press.
- Rezaeian S. and Der Kiureghian A., (2012), *Simulation of orthogonal horizontal ground motion components for specified earthquake and site characteristics*, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 41, Issue 2, pp. 335–353.
- RICE S. O., (1954), *Mathematical analysis of random noise*, in Selected Papers on Noise and Stochastic Processes (edited by N. Wax), DD, Dover, New York, pp.180–181.
- RPA 99, (2003), *Règles Parasismiques Algériennes*, Document technique réglementaire DTR BC 248, Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (C.G.S), Alger.
- Shinozuka M., (1972), *Monte Carlo solution of structural dynamics*, Dept. of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Columbia University, Comptures & Structures, Vol. 2, pp. 855–874.
- Shinozuka M., Brant P. W., (1969), *Application of evolutionary power spectrum in structural dynamics*, Tech. Rpt. No. 3, NSF-GK 3858, Columbia University.
- Shinozuka M., Sato Y., (1967), *Simulation of nonstationary random processes*, Proc. American Society of Civil Engineers; ASCE, Engineering Mechanics Institute; EMI, pp.11–40.
- Slob S., (2006), *Micro Seismic Hazard Analysis. Workshop/Training on Earthquake Vulnerability and Multi-Hazard Risk Assessment: Geospatial Tools for Rehabilitation and*

Reconstruction Efforts, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. <http://nceg.upesh.edu.pk/workshop-17to31mar-05/slides.html>

Somerville P., Smith N., Punyamurthula S., and Sun J., (1997), *Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC steel project* (report no. sac/bd-97/04), FEMA/SAC Steel Project.

Wolf JP., (1985), *Dynamic soil–structure interaction*, Englewood Cliffs (NJ): Prentice Hall.

Zentner I., (2014. Last accessed), *Génération de signaux sismiques*, Code Aster documentation http://www.code-aster.org/V2/doc/default/fr/man_r/r4/r4.05.05.pdf.

Zentner I., Traversa P., and Humbert N., (2015), *On the use of Fourier spectral ground motion prediction models for the simulation of hazard consistent time histories*, In ICASP12.

Zerva A., (2009), *Spatial Variation of Seismic Ground Motions: Modelling and Engineering Applications*, Taylor & Francis Group.