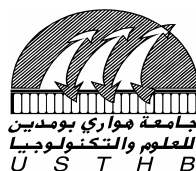


N° d'ordre :09/2007-M/G.C

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE

FACULTE DE GENIE CIVIL



MEMOIRE

Présenté Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

En Génie Civil

Spécialité : Construction

Par

Mr : BENELDJOUZI Mohamed

Thème

***QUANTIFICATION DES COEFFICIENTS DE SITE VIA DES
SIMULATIONS NUMERIQUES ET CONFRONTATION
AVEC LES RECOMMANDATIONS REGLEMENTAIRES***

Soutenu le : 15 Juillet 2007 devant le jury suivant :

Mr BENOUAR Djillali	<i>Professeur, USTHB</i>	Président
Mr LAOUAMI Nasser	<i>Directeur de recherche, CGS</i>	Directeur de thèse
Mr BAHAR Ramdane	<i>Professeur, UMMTO</i>	Examineur
Mr HADID Mohamed	<i>Maître de conférences, ENTP</i>	Examineur
Mr KAOUA Farid	<i>Maître de conférences, USTHB</i>	Examineur

Résumé

Des simulations numériques combinées à une étude statistique ont été effectuées et ont permis la caractérisation de chacun des sites classés par le RPA99 par des fonctions de transfert moyennes et enveloppes. Ces dernières renseignent d'une manière plus exacte sur la gamme des fréquences et les niveaux d'amplification qui caractérisent chacun des sites. Via une approche probabiliste basée sur les fonctions de densité spectrale de puissance, les fonctions de transfert ainsi définies ont été utilisées pour une étude sismique des quatre sites, moyennant une méthode de simulation de champs sismiques incidents. Des accélérogrammes réels et synthétiques, au nombre suffisant pour un traitement statistique, sont utilisés et tiennent compte de la variabilité du contenu fréquentiel du champ sismique incident. Pour chaque site, le traitement statistique des résultats permet de calculer un coefficient de site dépendant du contenu fréquentiel du champ sismique incident et un coefficient de site moyen. Les résultats ainsi obtenus sont utilisés pour le calcul des spectres de réponse moyens et enveloppes qui sont combinés aux coefficients de site puis comparés aux spectres réglementaires algériens et américains.

Mots clés : Amplification, Coefficients de site, Séismes, RPA99, Simulations, Statistiques.

Abstract

Numerical simulations combined with a statistical study were carried out and allowed the characterization of the design sites according to the Algerian Earthquake Resistant Rules (RPA99), by average transfer and envelope's functions. These latest take into account the level of amplification as well as the frequency's range of each type of soil on the basis of the RPA99. Through this study, mean transfer functions are used for a seismic analysis of sites by considering a probabilistic approach based on spectral power density functions. Thus, many recorded and synthetic accelerograms taking into account the frequency's variability of incident seismic fields are introduced. For each site, obtained statistical results have permitted to compute a site factor depending on the frequency of incident seismic fields, and also, mean site factor. These results are also been used for computing mean and envelope acceleration response spectra which are associated at the site factors and, afterward, are compared to the RPA99 and IBC2003 design spectra.

Keywords : Amplification, Site Coefficients, RPA99, Simulations, Statistics.

ملخص

إعتمادا على نظرية انتشار الأمواج في الأوساط المستمرة، نقوم بتمييز المواقع المصنفة في القواعد الجزائرية للبناء المقاوم للزلازل بواسطة دوال تحويل وسطية و تطويقية، مع الأخذ بعين الاعتبار الشروط والتعليمات المتضمنة في القواعد، فيما يتعلق بقيم سرعة انتشار الأمواج في مختلف الطبقات المكونة للمقاطع الأرضية وكذا الوصف الجيوتقني لهذه الطبقات.

بواسطة مقارنة احتمالية تعتمد على دوال كثافة القوة الطيفية، نقوم باستخدام دوال التحويل في تحليل زلزالي لجميع المواقع المصنفة في القواعد، عبر إدراج زلازل وهمية وحقيقية عديدة، إنطلاقا من إنشاء تصوري لعدة حقول زلزالية ضاربة، تأخذ بعين الاعتبار التغير في المضمون الترددي للحقل الزلزالي الضارب.

عن طريق تحليل إحصائي للنتائج المتحصل عليها، نقوم بحساب معامل مواقع خاضع للمضمون الترددي للحقل الزلزالي الضارب، وكذا معامل مواقع وسطي، ثم ننشئ، اعتمادا على هذه النتائج، طيوف الأجابة التسارعية الوسطية والتطويقية التي نقوم بمقارنتها، بعد تشكيلها مع معاملات المواقع ، مع طيوف الأجابة الحسابية الجزائرية والأمريكية.

Remerciements

Si ce travail a pu voir le jour, c'est grâce aux soutiens et aides de beaucoup de personnes. Pour cela, l'écriture des remerciements est une tâche énormément difficile. Difficile, car les mots sont écrits et figés dans le temps ; la crainte de froisser autrui par une omission involontaire est ainsi présente. Que ces personnes trouvent ici le témoignage de mon respect et de ma reconnaissance la plus profonde.

Je tiens à remercier, en premier lieu, mon directeur de thèse Monsieur Laouami Nasser pour avoir initié et encadré ce travail. Je désire le remercier pour tous les efforts qu'il a prodigués sans ménagement pour faire aboutir ce travail. Son sérieux et sa rigueur, qui me furent toujours bénéfiques, m'ont permis de mener à bien mon travail de recherche et d'acquérir de nouvelles connaissances.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Abdennasser Slimani, chargé de recherche au CGS, qui, par sa motivation et sa disponibilité, a bien souvent facilité le déroulement de ce travail. Je le remercie également pour son soutien et ses encouragements.

Mes vifs remerciements s'adressent aussi à Monsieur Djilali Benouar, directeur du laboratoire bâti dans l'environnement qui m'a accueilli dans son laboratoire. Sa considération, son aide précieuse et ses conseils avisés me furent d'une grande utilité. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère gratitude.

Je n'oublie pas de remercier les membres du jury Messieurs Ramdane Bahar, Farid Kaoua et Mohamed Hadid pour l'honneur qu'il nous ont fait d'avoir accepté d'examiner ce travail. Merci aussi à Monsieur Djilali Benouar qui nous a honorés en acceptant de présider le jury. Le débat et les nombreuses questions qui ont suivi l'exposé oral témoignent de leur grand intérêt pour ce travail.

Enfin, un grand merci à mes amis et collègues du VRDPO avec qui j'ai passé d'agréables moments. Je les remercie pour leurs encouragements et leur soutien moral. Merci aussi à mes enseignants et amis de l'USTHB qui ont montré un intérêt pour ce travail.

Dédicaces

A mes très chers parents, qui ont tout dévoué pour moi.

*A ma très chère épouse qui, par sa bonne humeur et sa présence, m'a aidé à surmonter des moments
ô combien difficiles.*

A mes chers enfants Céline, Hiba et Salaheddine ; leur rôle de perturbateur est désormais fini !

A mes chers frères et sœurs.

Liste des figures

- Figure 1.1 : Ondes sismiques affectant des structures implantées dans des sites différents
- Figure 1.2 : Effet d'amplification des ondes sismiques suivant la couverture sédimentaire et la topographie du site
- Figure 3.1 : Profil de sol mono couche
- Figure 3.2 : Propagation d'ondes de cisaillement dans un profil mono couche
- Figure 3.3 : Propagation d'ondes de cisaillement dans un profil multi couches
- Figure 4.1 : Fonction de transfert (S2-3 σ)
- Figure 4.2 : Fonction de transfert (S2-2 σ)
- Figure 4.3 : Fonction de transfert (S2-1 σ)
- Figure 4.4 : Fonction de transfert (S2)
- Figure 4.5 : Fonction de transfert (S2+1 σ)
- Figure 4.6 : Fonction de transfert (S2+2 σ)
- Figure 4.7 : Fonction de transfert (S2+3 σ)
- Figure 4.8 : Fonction de transfert moyenne (S2)
- Figure 4.9 : Fonction de transfert moyenne et enveloppe (S2)
- Figure 4.10 : Fonction de transfert (S3-3 σ)
- Figure 4.11 : Fonction de transfert (S3-2 σ)
- Figure 4.12 : Fonction de transfert (S3-1 σ)
- Figure 4.13 : Fonction de transfert (S3)
- Figure 4.14 : Fonction de transfert (S3+1 σ)
- Figure 4.15 : Fonction de transfert (S3+2 σ)
- Figure 4.16 : Fonction de transfert (S3+3 σ)
- Figure 4.17 : Fonction de transfert moyenne (S3)
- Figure 4.18 : Fonction de transfert moyenne et enveloppe (S3)
- Figure 4.19 : Fonction de transfert (S4-3 σ)
- Figure 4.20 : Fonction de transfert (S4-2 σ)
- Figure 4.21 : Fonction de transfert (S4-1 σ)
- Figure 4.22 : Fonction de transfert (S4)
- Figure 4.23 : Fonction de transfert (S4+1 σ)
- Figure 4.24 : Fonction de transfert (S4+2 σ)
- Figure 4.25 : Fonction de transfert (S4+3 σ)
- Figure 4.26 : Fonction de transfert moyenne (S4)
- Figure 4.27 : Fonction de transfert moyenne et enveloppe (S4)
- Figure 5.1 : Accélérogrammes synthétiques stationnaires (sol ferme et sol meuble - réalisations typiques)
- Figure 5.2 : Accélérogrammes synthétiques non stationnaires (sol ferme et sol meuble - réalisations typiques)
- Figure 5.3 : Spectres de Fourier des accélérogrammes synthétiques non stationnaires (sol ferme et sol meuble)
- Figure 6.1 : Courbe de charge et décharge d'un matériau élastique linéaire
- Figure 6.2 : Système linéaire invariant
- Figure 6.3 : DSP moyenne $f_c=6.36$ Hz
- Figure 6.4 : DSP moyenne $f_c=9.57$ Hz
- Figure 6.5 : DSP moyenne $f_g=4.5$ Hz
- Figure 6.6 : DSP moyenne $f_g=3.125$ Hz

Figure 6.7 : DSP moyenne $f_g=1.0$ Hz
 Figure 7.1 : Oscillateur élastique à 1 ddl
 Figure 7.2 : Pseudo spectre d'accélération $f_g=4.5$ Hz (S2)
 Figure 7.3 : Pseudo spectre d'accélération $f_g=3.125$ Hz (S2)
 Figure 7.4 : Pseudo spectre d'accélération $f_g=1.0$ Hz (S2)
 Figure 7.5 : Pseudo spectre d'accélération $f_c=6.36$ Hz (S2)
 Figure 7.6 : Pseudo spectre d'accélération $f_c=9.57$ Hz (S2)
 Figure 7.7 : Pseudo spectre d'accélération moyen et enveloppe (S2)
 Figure 7.8 : Pseudo spectre d'accélération $f_g=3.125$ Hz (S3)
 Figure 7.9 : Pseudo spectre d'accélération $f_g=4.5$ Hz (S3)
 Figure 7.10 : Pseudo spectre d'accélération $f_g=1.0$ Hz (S3)
 Figure 7.11 : Pseudo spectre d'accélération $f_c=6.36$ Hz (S3)
 Figure 7.12 : Pseudo spectre d'accélération $f_c=9.57$ Hz (S3)
 Figure 7.13 : Pseudo spectre d'accélération moyen et enveloppe (S3)
 Figure 7.14 : Pseudo spectre d'accélération $f_g=1.0$ Hz (S4)
 Figure 7.15 : Pseudo spectre d'accélération $f_g=3.125$ Hz (S4)
 Figure 7.16 : Pseudo spectre d'accélération $f_g=4.5$ Hz (S4)
 Figure 7.17 : Pseudo spectre d'accélération $f_c=6.36$ Hz (S4)
 Figure 7.18 : Pseudo spectre d'accélération $f_c=9.57$ Hz (S4)
 Figure 7.19 : Pseudo spectre d'accélération moyen et enveloppe (S4)
 Figure 7.20 : Pseudo spectres d'accélération moyen (S2, S3, S4)
 Figure 7.21 : Pseudo spectre d'accélération moyen combiné au Cs (S2)
 Figure 7.22 : Pseudo spectre d'accélération moyen combiné au Cs (S3)
 Figure 7.23 : Pseudo spectre d'accélération moyen combiné au Cs (S4)
 Figure 7.24 : Pseudo spectres d'accélération moyens combinés aux Cs (S2, S3, S4)
 Figure 7.25 : Spectre d'accélération de calcul RPA99 (S1)
 Figure 7.26 : Spectre d'accélération de calcul RPA99 (S2)
 Figure 7.27 : Spectre d'accélération de calcul RPA99 (S3)
 Figure 7.28 : Spectre d'accélération de calcul RPA99 (S4)
 Figure 7.29 : Spectres d'accélération de calcul RPA99 (S1, S2, S3, S4)
 Figure 7.30 : Pseudo spectre d'accélération (S2_RPA99, S2_Cs)
 Figure 7.31 : Pseudo spectre d'accélération (S3_RPA99, S3_Cs)
 Figure 7.32 : Pseudo spectre d'accélération (S4_RPA99, S4_Cs)
 Figure 7.33 : Spectre d'accélération de calcul selon IBC2003
 Figure 7.34 : Pseudo spectre d'accélération (S2_RPA99, S2_Cs, C_IBC)
 Figure 7.35 : Pseudo spectre d'accélération (S3_RPA99, S3_Cs, D_IBC)
 Figure 7.36 : Pseudo spectre d'accélération (S4_RPA99, S4_Cs, E_IBC)

Liste des tableaux

- Tableau 2.1 : Types de profils de sols prévus par l'eurocode_8
- Tableau 2.2 : Catégories de sites et facteurs de sites selon UBC_94
- Tableau 2.3 : Types de profils de sols selon UBC_97
- Tableau 2.4 : Facteurs de zones sismiques – UBC_94
- Tableau 2.5 : Facteur N_a pour les courtes périodes (source proche) – UBC_97
- Tableau 2.6 : Facteur N_v pour les longues périodes (source proche) – UBC_97
- Tableau 2.7 : Types de sources sismiques – UBC_97
- Tableau 2.8 : Valeurs du coefficient de site F_a , fonction de la catégorie de site et de la réponse spectrale en accélération issue des cartes d'aléa aux courtes périodes - IBC_2003.
- Tableau 2.9 : Valeurs du coefficient de site F_v , fonction de la catégorie de site et la réponse spectrale en accélération issue des cartes d'aléa à une période de une (01) seconde (IBC_2003).
- Tableau 4.1 : Catégories de sites (RPA_99)
- Tableau 4.2 : Profils moyens pour les sites S_2 , S_3 et S_4 .
- Tableau 4.3 : Echantillon statistique du sol ferme (S_2)
- Tableau 4.4 : Valeur de l'amplification et de la fréquence en fonction de la dispersion par rapport au profil moyen – Site ferme (S_2)
- Tableau 4.5 : Valeur de l'amplification et de la fréquence en fonction de la dispersion par rapport au profil moyen – Site mou (S_3)
- Tableau 4.6 : Valeur de l'amplification et de la fréquence en fonction de la dispersion par rapport au profil moyen – Site très mou (S_4)
- Tableau 6.1 : Séismes utilisés pour l'estimation de la DSP modélisant les champs sismiques incidents réels
- Tableau 6.2 : Champs sismiques incidents en termes de DSP réelle et analytique
- Tableau 6.3 : Coefficients de site moyens dans le cas $f_c=9.57$ Hz
- Tableau 6.4 : Coefficients de site moyens dans le cas $f_c=6.36$ Hz
- Tableau 6.5 : Coefficients de site moyens dans le cas $f_g=4.5$ Hz
- Tableau 6.6 : Coefficients de site moyens dans le cas $f_g=3.125$ Hz
- Tableau 6.7 : Coefficients de site moyens dans le cas $f_g=1$ Hz
- Tableau 6.8 : Coefficients de site moyens

TABLE DES MATIERES

<u>Titre</u>	<u>Page</u>
Résumé.....	i
Abstract.....	ii
ملخص.....	iii
Remerciements.....	iv
Dédicaces.....	v
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	vii
Table des matières.....	viii
 CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GENERALE	
1.1 Introduction.....	1
1.2 Effets de site – Description et analyse.....	2
1.3 Objectifs et organisation du mémoire.....	4
 CHAPITRE 2 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
2.1 Méthodes d'estimation des effets de site.....	7
2.1.1 Méthodes expérimentales.....	7
2.1.2 Méthodes numériques.....	10
2.2 Prise en compte réglementaire des effets de site.....	13
2.2.1 Aperçu général.....	13
2.2.2 Règlement parasismique algérien (RPA99).....	14
2.2.3 Eurocode 8.....	15
2.2.4 Règlements américains.....	16
2.2.4.1 Uniform Building Code (UBC).....	16
2.2.4.2 International Building Code (IBC).....	20
2.2.4.3 Coefficient de site – Ajustement de la réponse spectrale.....	21
 CHAPITRE 3 : FORMULATION ANALYTIQUE DE L'AMPLIFICATION DES ONDES SISMQUES	
3.1 Intérêt de l'étude.....	22
3.2 Théorie de la propagation des ondes de cisaillement SH.....	22
3.3 Propagation d'ondes de cisaillement harmoniques dans un système Unidimensionnel.....	23
3.4 Présentation du programme SHAKE.....	29
3.4.1 Introduction.....	29
3.4.2 Description du programme SHAKE.....	29
 CHAPITRE 4 : ANALYSE SISMQUE DES SITES REGLEMENTAIRES DU RPA99	
4.1 Proposition de fonctions de transfert pour les sites du RPA99.....	31
4.2 Résultats et commentaires.....	33
4.2.1 Sol ferme (S2).....	33
4.2.2 Sol mou (S3).....	35
4.2.3 Sol très mou (S4).....	37
4.3 Synthèse.....	39

CHAPITRE 5 : APERCU SUR LA THEORIE DES VIBRATIONS ALEATOIRES

5.1 Introduction.....	40
5.2 Processus aléatoire.....	40
5.2.1 Processus aléatoire stationnaire.....	41
5.2.2 Processus aléatoire ergodique.....	41
5.2.3 Processus aléatoire gaussien.....	42
5.3 Analyse spectrale des processus aléatoires.....	44
5.3.1 Décomposition fréquentielle des processus aléatoires.....	44
5.3.2 Fonction moment – Fonction d’auto corrélation.....	45
5.3.3 Densité spectrale de puissance (DSP).....	46
5.4 Simulation d’accélérogrammes artificiels.....	48
5.4.1 Introduction.....	48
5.4.2 Modélisation de la fonction de DSP de l’excitation sismique.....	49
5.4.3 Processus aléatoire non stationnaire.....	51
5.4.4 Modèles de simulation des accélérogrammes.....	52
5.4.4.1 Simulation des accélérogrammes par la méthode de la représentation spectrale.....	52
5.5 Exemple de simulation.....	53

CHAPITRE 6 : QUANTIFICATION DES COEFFICIENTS DE SITE POUR LES SOLS DU RPA99

6.1 Introduction.....	55
6.2 Définition du coefficient de site.....	55
6.3 Comportement linéaire des sols.....	55
6.4 Estimation des coefficients de site.....	56
6.5 Conclusion.....	60

CHAPITRE 7 : ELABORATION DES SPECTRES DE REPONSE

7.1 Introduction.....	62
7.2 Spectres de réponse réglementaires.....	63
7.3 Construction des spectres de réponse moyens.....	64
7.4 Analyse comparative avec les spectres du RPA99.....	70
7.4.1 Introduction.....	70
7.4.2 Spectres de réponse selon les RPA99.....	70
7.4.3 Synthèse.....	73
7.5 Analyse comparative avec les spectres de l’IBC2003.....	74
7.6 Conclusion.....	77

CHAPITRE 8 : CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

ANNEXE : REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GENERALE

1. INTRODUCTION GENERALE

1.1 : Introduction

Le 19 septembre 1985, un violent tremblement de terre frappa la ville de Mexico. Plus de 10000 victimes et de terribles dégâts sont recensés, alors que l'épicentre du séisme de Michoacan était situé à 400 Km de la ville. La cause est maintenant bien connue des scientifiques, il y a eu une forte amplification du mouvement sismique dans le bassin sédimentaire de la ville de Mexico, connue sous le nom d'effets de site.

En effet, en raison de l'action conjuguée de la tectonique des plaques et de l'érosion, la terre est beaucoup moins consistante et plus hétérogène en surface qu'en profondeur. Les roches en surface sont des roches sédimentaires ou des dépôts alluviaux. Ces roches sont moins consolidées et moins compactes et donc, d'impédance plus faible que celles sur lesquelles elles reposent. En les traversant, les ondes sismiques sont amplifiées et même piégées, augmentant ainsi le pouvoir destructeur d'un séisme. Nul ne remet en doute actuellement le rôle crucial et dangereux des effets de site lors d'une sollicitation sismique. Ces derniers font que du fait d'une géologie et/ou d'une géométrie particulière, le mouvement du sol induit par une sollicitation sismique est amplifié et prolongé dans le temps.

Ce phénomène est généré par la modification de la structure géologique des couches de sols en surface qui surmontent, en général, un substratum rocheux de forte impédance. Ainsi, de part le mode de mise en place de la structure sédimentaire du sol en surface, constituée d'un empilement de couches horizontales issues de dépôts sédimentaires moins consolidés, aux caractéristiques mécaniques plus faibles, cette structure sédimentaire joue le rôle d'un filtre amplifiant et modifiant, considérablement, la durée et le contenu fréquentiel du mouvement sismique. Ces modifications sont principalement contrôlées par la fonction de transfert, qui est une caractéristique intrinsèque du site considéré. L'influence décisive de la nature locale du sol de fondation sur l'évolution de l'excitation sismique devient évidente.

Cette réalité incite les spécialistes et ingénieurs, qui doivent concevoir des structures en zones sismiques, de leurs assurer un niveau de sécurité acceptable. Ceci leur permettra de résister, sans grands dommages, aux sollicitations sismiques potentielles, quelles que soient la zone sismique ou la géologie locale considérée. A l'égard de cette préoccupation, l'identification des zones pouvant renfermer des sols aux caractéristiques, particulièrement, défavorables en cas de tremblement de terre, doit constituer un préalable, se traduisant par une estimation correcte des effets de site, et par conséquent, des actions sismiques auxquelles les structures seront soumises.

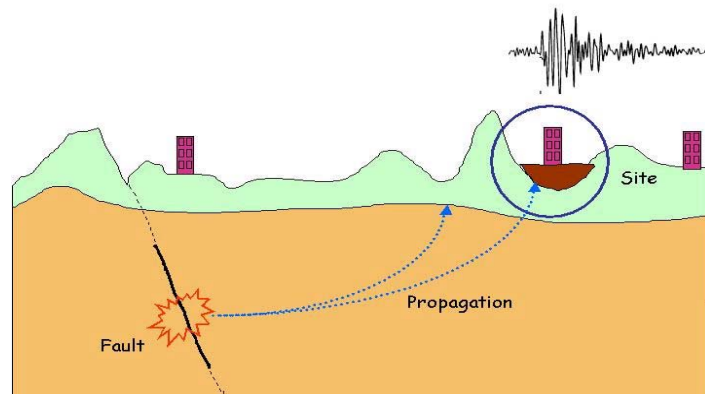


Figure 1.1 : Ondes sismiques affectant des structures implantées dans des sites différents

1.2 Effets de site – Description et analyse

L'énergie libérée lors d'une rupture sismique dans la croûte terrestre est propagée vers la surface sous forme d'ondes sismiques, dont l'amplitude et le contenu fréquentiel sont modifiés au cours du trajet, notamment à proximité de la surface. La modification des caractéristiques des couches de sol sous-jacentes, caractérisant l'importance des contrastes géologiques, peuvent entraîner un changement d'amplitude du signal, parfois très important, sur une courte distance. Ce sont essentiellement ces effets près de la surface qui sont appelés effets de site. Ces effets de site sont, principalement, de deux natures :

Les effets de site géométriques liés aux accidents géologiques du relief, et les effets de site lithologiques associés aux natures géologiques des couches qui tapissent le sous-sol.

Les effets de site géométriques conduisent à l'amplification ou à l'atténuation du signal vibratoire selon que la topographie du relief est convexe ou concave. L'effet topographique est obtenu, généralement, en présence de morphologie très accidentée susceptible de provoquer des effets de site même sur sol rocheux. Dans le cas du rocher, il est observé, en général, que le mouvement du sol est amplifié à proximité des sommets, tandis qu'il est atténué dans les creux. Ces effets n'apparaissent que dans des topographies extrêmes (crêtes à pentes raides, bord de falaise,...etc). Les connaissances actuelles sur cet effet de site sont encore loin d'être bien cernées et ne permettent que des estimations approximatives.

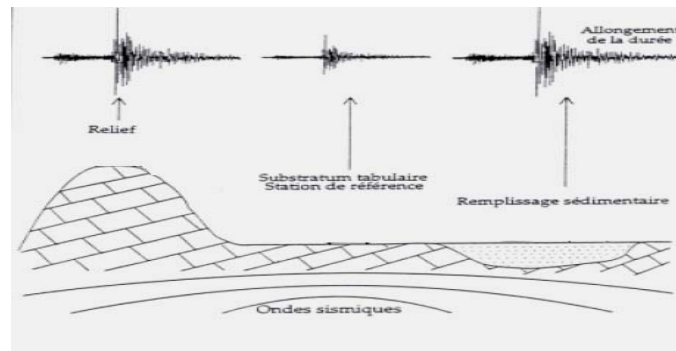


Figure 1.2 : Effet d'amplification des ondes sismiques suivant la couverture sédimentaire et la topographie du site

Dans ce même contexte, un autre effet associé à la rencontre du substratum rocheux et des terrains meubles en surface, est celui de bord de vallée. Il provoque la génération d'ondes de surface qui peuvent dominer localement les ondes S normalement prédominantes. Cet effet se fait ressentir sur une bande parallèle au bord de vallée. Les connaissances relatives à cette bande ainsi qu'à l'effet d'amplification sont actuellement limités. La prise en compte de cet effet n'est possible, à l'heure actuelle, qu'à travers des méthodes de simulation sophistiquées.

La géométrie du substratum rocheux est susceptible aussi de générer un effet de site dit de bassin. En effet, les variations latérales de la géométrie du bassin peuvent conduire à des focalisations du champ d'ondes au niveau de la surface. De surcroît, la génération d'ondes de surface se propageant d'un bord à l'autre du bassin est capable d'amplifier considérablement ces effets, tant en amplitude qu'en durée (Bard et Bouchon, 1985).

Par ailleurs, en milieu urbain, les structures en surface peuvent agir comme des sources sismiques secondaires et perturber le "champ libre" sismique. Dans le cas de zones urbaines denses, la question de l'interaction globale entre le sol et l'ensemble du bâti s'impose.

Des études ont montré (Chavez-Garcia et Bard, 1990 ; Clouteau et al 2001) que les structures de surface se comportent comme des objets diffractants sur le signal sismique incident. En conséquence, tant qu'une structure est en vibration, elle retransmette de l'énergie dans le sol sous forme d'ondes. Si plusieurs structures sont suffisamment proches, ces ondes interfèrent entre elles. Il en résulte des mouvements en surface libre présentant de forts déplacements différentiels et différents de ceux en champs libre vrai, (Wirgin et Bard, 1994).

Les effets de site lithologiques sont dus, principalement, à la stratigraphie des couches de surface peu consolidées.

Les ondes arrivant à la surface se réfléchissent aux interfaces entre les différentes couches et restent piégées aux abords de la surface donnant naissance à une amplification notable du mouvement. L'ampleur de ces effets est renforcée lorsque le contraste d'impédance entre les différentes couches est plus important.

- **Conclusion**

De ce qui précède, il ressort que de nombreux paramètres, en particulier physiques et géométriques, interviennent dans le phénomène d'amplification des ondes sismiques, ce qui rend leur interprétation et leur estimation pénible et onéreuse. De plus, les conséquences qui lui sont liées dépendent de la complexité de ces mêmes paramètres. Par ailleurs, la connaissance détaillée des effets de site n'est, à l'heure actuelle, qu'au stade de la recherche. Leur estimation quantitative hormis quelques cas simplifiés, n'est possible qu'au moyen de méthodes approchées.

1.3 Objectifs et organisation du mémoire

Un effet de site est, en définitive, un phénomène se traduisant par une amplification du mouvement sismique entre le substratum rocheux et la surface du sol, accompagnée d'une modification de son contenu fréquentiel et, parfois, un prolongement de sa durée. Ces modifications sont principalement contrôlées par la fonction de transfert, qui est une caractéristique "intrinsèque" du site considéré. Néanmoins, l'estimation expérimentale du potentiel d'amplification d'un sol donné exige des données géophysiques et géotechniques qui ne sont pas toujours disponibles, ou du moins, rarement disponibles à un niveau de détail suffisant.

Du point de vue de la réglementation parasismique, l'amplification due aux effets de site est prise en compte par la distinction de plusieurs catégories de sols, généralement le rocher et trois sortes de sols, de caractéristiques mécaniques décroissantes, auxquels on associe, communément, des spectres de réponse élastiques.

Les règles parasismiques algériennes, RPA99 (CGS, 2003), dans leur volet cartes de zonage sismique, fournissent des accélérations de zonage estimées au rocher. Les différents types de sols sont pris en charge à travers des spectres de réponse normalisés. Parallèlement, dans la pratique courante, on se limite aux seules données géotechniques pour caractériser le site via des corrélations très imprécises.

C'est une raison assez motivante, à notre sens, pour mener une étude qui aboutira à la caractérisation par des fonctions de transfert moyennes et enveloppes pour les sols réglementaires

du RPA99. Des simulations numériques combinées à une analyse statistique sont utilisées pour le calcul des coefficients de sites et des spectres de réponse moyens pour ces mêmes sols.

Pour mieux cerner le sujet, le présent travail est développé en huit chapitres, résumés comme suit :

Le chapitre 2 est consacré à une synthèse bibliographique dans laquelle les différentes méthodes d'estimation des effets de site sont passées en revue, notamment, les méthodes expérimentales et numériques. Dans son deuxième volet, ce chapitre traite de la prise en compte réglementaire des effets de site qui revêt un intérêt particulier dans le cadre de la présente étude. La prise en compte des effets de site par les règles parasismiques algériennes a été, donc, discutée. Aussi, en raison de leur caractère référentiel, les règles américaines et européennes ont été, également, abordées. Ces règles constituent, en fait, une référence et reflètent un niveau de progrès indéniable en matière de connaissances importantes réalisées dans la recherche et les applications en ingénierie sismique. Ce chapitre a été sanctionné par une conclusion et des commentaires qui mettent en évidence les motivations qui nous ont incité à mener cette étude.

Le chapitre 3 recèle une présentation analytique du phénomène de l'amplification des ondes sismiques, issue de la théorie de la propagation unidimensionnelle des ondes de cisaillement SH, avec son fondement théorique et ses hypothèses.

Dans le chapitre 4, nous avons déterminé la fonction de transfert moyenne et enveloppe de chacun des sites réglementaires. Associée à une simulation statistique de profils de sols, l'analyse est basée sur la théorie de la propagation des ondes de cisaillement dans les milieux continus, dont le contexte théorique a été présenté dans le chapitre 3. Elle est effectuée dans le strict respect des prescriptions réglementaires (intervalles de vitesses de propagation des ondes, description géotechnique et profondeurs des couches).

En utilisant le programme SHAKE, nous avons calculé les fonctions de transfert moyennes et enveloppes ainsi que les fréquences fondamentales de vibration qui en correspondent.

Au travers du chapitre 5, nous avons introduit la théorie des vibrations aléatoires qui nous a permis de faire ressortir une technique de simulation d'accélérogrammes synthétiques basée sur la modèle analytique de densité spectrale de puissance de Kanaï et Tajimi d'un côté, et sur des modèles de DSP expérimentales réelles d'un autre côté.

Le chapitre 6 est consacré à la simulation de champs sismiques incidents, à travers une approche probabiliste basée sur les fonctions de densité spectrale de puissance (DSP) comme indiqué dans le chapitre 5. Il a été procédé, ensuite, au calcul des coefficients de site en utilisant plusieurs champs sismiques incidents avec, en particulier, la valorisation des effets de distance. Ceci a été fait en deux étapes :

Dans la première étape, le champ sismique incident est constitué d'un échantillon d'accélérogrammes synthétiques simulés numériquement par la méthode de Monté Carlo, à l'aide de densités spectrales de puissance expérimentales moyennes, issues d'enregistrements accélérométriques réels.

Dans la deuxième étape, le champ sismique incident est complété par le modèle analytique de DSP de Kanaï et Tajimi. Dans les deux cas, des coefficients de site moyens sont calculés pour les sols réglementaires du RPA99 (ver 2003).

Dans le chapitre 7, les résultats obtenus dans le chapitre précédent sont repris pour le calcul des spectres de réponse moyens, à partir des réponses aux différents champs sismiques incidents. Les spectres obtenus sont combinés aux coefficients de sites déjà calculés, puis comparés aux spectres réglementaires du RPA et à ceux de l'IBC_2003.

En fin dans le chapitre 8, il est proposé des conclusions et des recommandations qui peuvent constituer des investigations complémentaires pour ce travail et des recherches futures.

CHAPITRE 2

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

2. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Les observations post séismes et les recherches théoriques et numériques (Borcherdt, 1970 ; Bard, 1993 ; Seekins, 1996 ; Bonilla et al., 1997) montrent l'importance des effets des conditions locales et la nécessité de les prendre en compte dans les études d'aléa, de micro zonage et de risque sismique. Pour atteindre cet objectif, des informations sur les effets locaux à partir d'enregistrements in situ demeurent nécessaires en vue d'améliorer la compréhension des phénomènes et leur estimation. Quelques enregistrements de mouvements forts enregistrés lors du séisme de Boumerdes du 21 mai 2003 ($M_w=6.8$) ont montré des amplifications importantes tels que ceux de Keddara et de Dar El beida où l'accélération a atteint respectivement 0.58 g et 0.52 g à 20 et 30 Km de l'épicentre (Laouami et al, 2006a).

2.1 Méthodes d'estimation des effets de site

2.1.1 Méthodes expérimentales

Durant les trente dernières années, plusieurs techniques ont été mises au point pour l'estimation des effets de site locaux. Parmi celles-ci, on distingue, d'une part, les approches expérimentales qui sont en plein essor et largement utilisées dans la pratique, et d'autre part, des estimations analytiques et des méthodes de modélisation numériques, qui sont basées sur des concepts physiques et des formalisations mathématiques plus ou moins rigoureux.

Le bruit de fond a, depuis longtemps, attiré l'attention des sismologues qui se sont intéressés à ses applications potentielles (Bonney, 2004).

Depuis les premiers travaux de Kanaï au Japon (Kanaï et Tanaka, 1954), le bruit de fond n'a cessé d'être considéré comme un outil incontournable permettant de caractériser les conditions locales d'un site, voire même, d'évaluer les réponses sismiques pour certains.

Les méthodes d'analyse du bruit de fond sont très variées, néanmoins, en ce qui concerne les applications aux effets de site, certaines d'entre elles prédominent largement. La méthode la plus classique d'analyse expérimentale de l'effet de site est celle des rapports spectraux (SSR). Elle consiste à comparer les signaux enregistrés sur le sol avec les signaux enregistrés sur une ou plusieurs stations de référence installées sur le rocher.

Cette méthode a été mise en pratique pour la première fois par (Borcherdt et Gibbs, 1970). Son principe consiste à déterminer la fonction de transfert d'un site en calculant le rapport spectral, dans le domaine fréquentiel, entre les enregistrements d'un même événement au site considéré, sur un site dit de "référence", c'est-à-dire, un site exempt de toute amplification ou dé amplification locale (Lermo, Chavez-Garcia et al, 1994 ; Seo et al, 1996).

Ainsi, un aspect pratique est conféré à cette méthode, car la simple division du spectre au site sédimentaire considéré par celui du site de référence permet d'estimer, expérimentalement, l'effet d'amplification du mouvement sismique avec, notamment, l'identification des fréquences de résonance du sol, via la détermination de la fonction de transfert de la structure sédimentaire.

Néanmoins, cette méthode se révèle beaucoup plus coûteuse que d'autres méthodes (méthode H/V par exemple), car l'estimation statistiquement représentative de l'effet d'amplification requiert l'enregistrement de plusieurs événements sismiques (au moins une dizaine) ce qui nécessite l'installation d'un réseau de stations sur une durée importante avec un traitement (analyse et interprétation) nettement considérable.

Initiée par (Langston, 1977, 1979), la méthode des fonctions récepteurs repose sur l'hypothèse que la composante verticale du déplacement n'est pas ou est peu affectée par l'amplification locale. L'idée consiste alors à remplacer la réponse de la station de référence par le déplacement vertical mesuré à la même station sur site. La fonction de transfert du site est donc assimilée aux rapports des spectres horizontal et vertical mesurés à la même station, à partir d'enregistrements d'événements sismiques au nombre important. Cette méthode n'est pas toujours fiable ; elle donne de bons résultats pour une géologie relativement simple, mais ne semble pas réellement valide pour une géologie plus complexe. Dans ce dernier cas, la composante verticale de déplacement est affectée par l'amplification locale (effet 2D). Cette fréquence d'amplification apparaît, cependant, à des fréquences plus élevées que pour la composante horizontale. Ainsi, cette méthode ne semble justifiée que pour estimer la fréquence fondamentale (de résonance) du site lorsque celle-ci est basse (Bard, 1998). Néanmoins, le seuil de fréquence limitant son domaine de validité demeure incertain.

La méthode du rapport H/Va été introduite, au départ, par (Nogoshi, 1971) puis mise à jour, par la suite, par (Nakamura, 1989). Elle constitue un outil simple, rapide et peu onéreux. Son principe consiste, comme celui des fonctions récepteurs, à enregistrer des vibrations ambiantes du sol durant une période de temps à l'aide d'une seule station (sismomètre), puis calculer le rapport spectral de composante horizontale/composante verticale. Comme présenté par de nombreux auteurs (Riepl et al, 1998), la courbe résultante illustre le pic de la fréquence de résonance du site, ce qui permet de rendre compte de sa fréquence fondamentale. Ces dernières années, beaucoup de chercheurs ont adopté la technique de Nakamura pour l'évaluation de la fonction d'amplification de sol, à cause de la facilité de sa mise en œuvre et son coût bas, en utilisant des mesures de bruits de fond ou accélérométriques (Lermo, 1988 ; Seekins et al, 1996 ; Laouami et al, 2006b). Cependant, des controverses et des zones d'ombre existent encore dans la compréhension du rapport H/V.

De nombreuses études expérimentales montrent que cette méthode donne de bons résultats pour la fréquence fondamentale, par contre, le pic qui y correspond n'est pas corrélé avec le niveau d'amplification réel. Pour cela, elle s'avère beaucoup moins concluante et incite à une grande prudence quant à l'estimation du niveau d'amplification attendu (Malishewski et Scherbaum, 2004 ; Bonnefoy, 2004).

Les méthodes basées sur les mouvements faibles comprennent deux techniques principales. La première est celle des rapports spectraux citée précédemment. Elle consiste à évaluer la fonction de transfert du déplacement en surface, en calculant le rapport du spectre de la réponse mesurée en un point du remplissage sédimentaire, sur celui mesuré en un point du rocher affleurant (station de référence) à partir d'enregistrement de mouvements faibles, tels que des événements sismiques modérés. Cela revient, en définitive, à calculer l'amplification au point A par rapport au point B produite par la couche. Une telle hypothèse implique les restrictions suivantes dans le choix de la station de référence. Celle-ci doit être installée sur une roche saine, insensible aux effets de site. Elle ne doit, cependant, pas être trop éloignée de la station sur site pour des considérations liées aux effets de source. Pour s'affranchir de cette condition, une extension de cette approche correspondant à différents événements sismiques a été proposée par (Andrews, 1986) pour intégrer l'ensemble des données à l'échelle locale et régionale.

Par ailleurs, lorsqu'il n'existe pas de site de référence, une méthode plus complexe incluant la paramétrisation de la source permet d'accéder aux effets de site. Des méthodes s'appuyant sur l'observation et l'analyse des effets induits par des séismes d'envergure peuvent être aussi utilisées. Cette approche permet de supprimer les incertitudes qui entachent les autres méthodes quant à la prédiction des effets liés aux séismes futures.

La première méthode est observatoire et consiste à recueillir les informations macrosismiques générées par un séisme destructeur, historique ou récent.

Dans les zones urbaines denses présentant une uniformité dans le bâti, l'analyse de ces informations permet de rendre compte, d'une manière assez précise, des zones les plus sollicitées. Les augmentations locales d'intensité peuvent être reliées à des effets de site en se basant sur des cartes géologiques ou topographiques. Cependant, cette méthode, de part sa nature qualitative, ne permet pas de quantifier les effets de site nécessaires en ingénierie sismique.

Une autre méthode instrumentale consiste en l'installation d'un réseau d'accéléromètres de mouvements forts puis procéder à leur analyse en suivant les mêmes procédures relatives aux méthodes utilisant les mouvements faibles.

Malgré sa performance lorsqu'elle est utilisée dans des zones d'activité sismique importante, cette méthode s'avère inapplicable dans les régions à faible activité sismique.

▪ **Conclusion**

En conclusion, l'intérêt majeur des méthodes expérimentales est de fournir des mesures qui intègrent toute la complexité du site sans hypothèses préalables sur la nature et les paramètres du sous-sol. Cependant, elles n'apportent pas d'explication directe aux phénomènes, et l'interprétation doit être prise soigneusement afin d'éviter des conclusions erronées.

L'avantage des méthodes expérimentales basées sur l'enregistrement de mouvements faibles ainsi que celles utilisant le bruit de fond est qu'elles ne nécessitent pas de connaissances préalables des propriétés des sols constituant les sites étudiés. Néanmoins, elles ne rendent pas compte de la non linéarité du mouvement de ces derniers. En effet, les méthodes sont basées sur des mesures obtenues à partir d'enregistrements de mouvements faibles et il n'est pas évident de déterminer à quel niveau de sollicitation l'extrapolation des résultats d'amplification obtenue est possible.

2.1.2 Méthodes numériques

Bien que les méthodes numériques ont, toutes, la même base théorique (équations de la propagation des ondes), plusieurs modèles différents ont été proposés pour l'investigation des multiples aspects de l'effet de site qui induisent des phénomènes complexes. Par exemple, l'un d'entre eux considère les nombreux types du champs d'ondes incident (champ proche, champ lointain, ondes de volume, ondes de surface) ; la géométrie peut être 1-D, 2-D ou 3-D ; où le comportement mécanique de chaque matériau peut renfermer une large gamme (viscoélasticité, comportement non linéaire, milieu saturé, domaine liquide,...etc).

D'une façon générale, l'évaluation de l'amplification des sols exige des données géophysiques et géotechniques qui ne sont pas souvent disponibles. Néanmoins, lorsque les caractéristiques géotechniques du site sont bien connues, les effets de site peuvent être estimés à travers une analyse numérique. En effet, pour des configurations de sols plus complexes ou des lois de comportement plus élaborées, l'utilisation de modèles numériques se révèle nécessaire. Ceux-ci sont des représentations plus ou moins simplifiées des milieux et des éléments étudiés. Ils sont regroupés en trois catégories :

- Les modèles 1D
- Les modèles 2D
- Les modèles 3D

Il existe de nombreuses méthodes analytiques simples qui permettent un calcul de la réponse sismique

d'un site donné en faisant recours à des outils de calcul standard (PC). Parmi celles-ci, la plus utilisée universellement fait usage de la théorie de la réflexion multiple des ondes S à travers un sol stratifié horizontalement appelée, le plus souvent, "Analyse 1D d'une colonne de sol".

Cette colonne de sol est excitée par un plan ascendant d'ondes S, considéré, généralement, comme incident verticalement et correspondant au mouvement de la surface du substratum rocheux. Les paramètres spécifiques requis pour une telle analyse sont la vitesse des ondes de cisaillement, la densité, l'amortissement et l'épaisseur de la couche considérée. Chacun de ces paramètres peut être obtenu à travers des mesures directes in-situ, des mesures de laboratoires à posteriori, basées sur des prélèvements par pénétration in-situ ou bien à travers la connaissance d'une relation approchée avec d'autres paramètres usuels tels que des tests de pénétration standards.

Ces analyses peuvent être exécutées en considérant un comportement linéaire ou non linéaire du sol. La non linéarité est très souvent approchée par la méthode linéaire équivalente qui utilise une procédure itérative pour adapter les paramètres du sol (rigidité et amortissement) à son niveau de déformation réel. Le programme SHAKE (Schnabel et al, 1972) est universellement utilisé pour un tel calcul.

Des modèles constitutifs incorporant la non linéarité complète sont actuellement disponibles. Ils permettent, en outre, de prendre en compte le phénomène de liquéfaction (programme CyberQuake, 1998). Cependant, ces analyses nécessitent une connaissance assez précise du comportement non linéaire des matériaux constituant le sol, qui sont uniquement obtenus à travers des tests de laboratoires sophistiqués.

Cette approximation 1D montre, cependant, ses limites quand l'influence des hétérogénéités latérales du sous-sol sur la réponse sismique n'est plus négligeable (Pitilakis, 1999). Pour cela, cette méthode n'est valable qu'à l'échelle très locale d'un bâtiment isolé ou dans le cas des vallées alluvionnaires peu encaissées (Semblat, 2000).

Les modèles numériques bidimensionnels permettent une évaluation très fine de la réponse sismique pour des configurations de bassin relativement complexes, et des types de comportement du sol plus ou moins élaborés (Makra et al, 2005). Néanmoins, l'utilisation de ces modèles est souvent pénalisée par la relative méconnaissance du sous-sol ou des paramètres sismologiques caractérisant la source.

Parmi les différentes méthodes, nous pouvons citer les plus grandes classes :

- La méthode des éléments ou différences finis (Bard et al, 1999), dans laquelle le domaine est discrétisé et les solutions sont calculées dans tous les nœuds du maillage. Cette méthode est la plus ancienne et la plus solidement maîtrisée. Elle peut être contraignante pour les problèmes de propagation d'ondes dans les milieux non bornés. Cependant, elle est particulièrement adaptée

pour des milieux à comportement non linéaire.

- Les méthodes dites pseudo spectrales ou utilisant le nombre d'onde discret (Bouchon, 1977 ; Campillo, 1986). Le principe de ces méthodes est identique aux méthodes précédentes, mais la résolution en espace ou en temps est transposée en nombre d'onde ou en fréquence afin de réduire les volumes de calcul. Elles permettent une meilleure représentation d'un problème linéaire de propagation d'ondes.
- Les méthodes d'équations intégrales et d'éléments de frontière (Dangla, 1990 ; Bonnet, 1999 ; Xiao, 2002). La dimension du problème est réduite d'une unité et rapportée aux interfaces entre les différents milieux (Semblat et al, 2003). Ces méthodes sont particulièrement adaptées aux problèmes linéaires de propagation d'ondes dans des milieux non bornés.

Les modèles tridimensionnels sont très coûteux en volume de calcul. Les travaux utilisant des modèles 3D pour l'évaluation des effets de site sont encore assez rares (Chavez-Garcia, 2002). Pourtant, ils permettent de dépasser l'hypothèse souvent simplificatrice d'une géométrie 2D. Cependant, diverses études montrent qu'il y a moins de différences, en termes d'augmentation de l'amplification, dans le passage du 2D au 3D que dans celui du 1D au 2D.

Par ailleurs, des méthodes de modélisation de la réponse d'un profil de sol prennent en compte la propagation d'une onde incidente en tant que telle. Pour cette raison, ces méthodes sont dites propagatives. Il est également possible de caractériser un profil de sol par une approche modale, afin d'en estimer les propriétés vibratoires. Les méthodes correspondantes sont dites vibratoires.

Ces dernières permettent une estimation de la fréquence fondamentale du profil de sol, en tenant compte de sa géométrie (Pallucci, 1999 ; Semblat et al, 2001a,b) et de son hétérogénéité lithologique (Dorby, 1976 ; Zhao, 1996). Elles présentent l'avantage d'être relativement simples d'emploi, mais reposent, généralement, sur des hypothèses également simplificatrices. En outre, elles ne permettent pas d'accéder au niveau d'amplification.

▪ **Conclusion**

Comme mentionné par Aki et Irikura, (Aki et Irikura, 1991), les méthodes numériques ont des avantages et des inconvénients, et en général, celles qui peuvent résoudre le problème avec plus

d'un modèle réaliste sont moins précises, tandis qu'elles consomment beaucoup de temps pour une précision satisfaisante. La plupart de ces méthodes sont encore en développement actif car chacune a son mérite d'être appliquée pour une certaine classe de problèmes.

Jusqu'à un passé récent, les modèles numériques n'ont été objectivement testés que rarement, concernant leur aptitude à prédire les effets actuels. En effet, la comparaison entre résultats issus d'observations et ceux obtenus par calcul théorique a été presque toujours obtenue à posteriori.

Les méthodes numériques ne constituent pas une panacée, mais elles peuvent être seulement appliquées pour des cas simples. Malheureusement, les utilisateurs qui manquent de renseignement suffisant à propos de leurs limites et qui pourraient utiliser des logiciels conçus sur la base de ces méthodes, seront conduits, inévitablement, à des erreurs d'estimation.

Même lorsque certaines méthodes sont convenablement utilisées, leur coût peut s'avérer élevé par rapport au coût d'utilisation des moyens de mesures expérimentales. La raison est qu'elles requièrent des investigations géotechniques et géophysiques détaillées pour l'obtention des propriétés nécessaires comme paramètres d'entrée. Cette contrainte peut être, parfois, surmontée grâce à des études paramétriques, mais ceci ne réussit que lorsque les résultats ne présentent pas trop de sensibilité (ce qui est rarement le cas).

2.2 Prise en compte réglementaire des effets de site

2.2.1 Aperçu général

Depuis longtemps, les spécialistes de structures et les géotechniciens ont conclu, à travers des leçons tirées suite aux tremblements de terre d'envergure, que les effets de site sont susceptibles de modifier de façon considérable la réponse dynamique des ouvrages, en particulier, lorsqu'ils sont fondés sur des terrains mous. Cependant, il a fallu attendre les années 80 pour leur prise en compte approfondie par la communauté sismologique internationale, à la suite des séismes de Mexico (1985) et Loma Prieta (1989). Ainsi, la prise en compte du phénomène dans les règlements de construction s'est vite imposée, et beaucoup de ces derniers se sont vus révisés afin d'y intégrer les paramètres qui le régissent.

2.2.2 Règlement parasismique algérien RPA99 (version 2003)

Une grande partie de l'Algérie est sismique et beaucoup de sites présentent des conditions géologiques, topographiques et géotechniques qui favorisent l'apparition des effets locaux. Vu leur importance, certains de ces effets sont partiellement intégrés dans les codes parasismiques à

travers les spectres de réponse. Cependant, il serait utile de pouvoir en tenir compte plus précisément dans les réglementations parasismiques ou d'urbanisme. Ceci nécessite d'une part, une bonne connaissance de la physique des phénomènes et d'autre part, l'existence et le développement de méthodes fiables pour les quantifier.

Au chapitre II paragraphe 2-1 du RPA99 (ver 2003), il a été fait allusion à travers des recommandations ou directives, qu'une attention particulière doit être portée quant au choix de sites d'implantation des ouvrages, en raison des conditions défavorables et pénalisantes que présentent certains d'entre eux, en particulier, les remblais non compactés ou les sols constitués principalement d'alluvions, d'épaisseur variable en pied de pente ou d'épaisseur importante en milieu de vallée, parce qu'ils sont susceptibles d'amplification. Le RPA99 (ver 2003) recommande, en revanche, d'éviter les zones de remblais, de préférer les sols rocheux aux sols meubles de faible capacité portante et de faire un choix judicieux de site d'implantation des bâtiments (en fonction de leur hauteur), en vue d'éviter le phénomène de résonance. Ainsi, le règlement a laissé le soin aux spécialistes et ingénieurs de procéder à des investigations et études complémentaires en fonction de l'importance de l'ouvrage projeté, en vue d'estimer le degré d'instabilité du terrain et de le prendre en compte dans le calcul de structures.

Dans le chapitre III, paragraphe III-3-1, les sites sont classés en quatre (04) catégories en fonction des propriétés mécaniques des sols qui les constituent, à savoir site rocheux S1, site ferme S2, site meuble S3 et site très meuble S4.

Enfin, dans le chapitre IV, les quatre sites sont caractérisés par des facteurs d'amplifications moyens dans le cas de la méthode statique équivalente, et par des spectres de réponse de calcul normalisés dans le cas de la méthode dynamique modale spectrale.

On remarque que les effets de site (amplifications des sols) sont pris en compte à travers des spectres de réponse qui n'intègrent pas d'une façon claire la notion de coefficient de site qui soit variable d'un site à un autre selon le potentiel d'amplification de chaque site. Cette notion de coefficient (ou facteur) de site est maintenant intégré dans le code Européen (Eurocode 8) et les règles américaines.

2.2.3 Eurocode_8 - Conception et dimensionnement de structures pour leur résistance au séisme

Dans l'eurocode 8, des méthodes simplifiées sont proposées pour la prise en compte de l'influence des conditions locales de sol sur l'action sismique, en plus des recommandations et directives données quant au choix du site de construction en vue de minimiser les dangers présentés par certains phénomènes qui pourraient prendre effet au sein de ce dernier:

a) Dans le paragraphe 4.2.2 de la partie 1-1, le règlement stipule, pour des profils de sol de fondation contenant une couche superficielle alluvionnaire d'épaisseur variant de 5 à 20 mètres, et surmontant un sol plus dur (sol de classe A dans l'eurocode) que le spectre de réponse de calcul (spectre d'accélération) à considérer, hormis étude particulière, est celui relatif au type de sol B avec un paramètre de sol majoré de 1,4 (paramètre multiplicateur de l'ordonnée donnant le spectre d'accélération).

b) Dans le cas d'une couche superficielle d'épaisseur variant de 5 m à quelques dizaines de mètres, présentant un contraste de raideur important avec un rocher de classe A sous-jacent, il y a lieu d'effectuer une étude particulière visant à majorer le spectre, au moins dans certaines gammes de fréquence. Dans le cas où la couche superficielle est d'épaisseur H et de caractéristiques mécaniques peu variables, on peut utiliser le spectre associé à un sol de fondation de la classe A, amplifié par le facteur λ défini par :

$$\begin{aligned} \lambda &= 1 && \text{pour} && T < 0,6 T_r \\ \lambda &= 5 \frac{T}{T_r} - 2 && \text{pour} && 0,6 T_r \leq T \leq 0,8 T_r \\ \lambda &= 2 && \text{pour} && 0,8 T_r \leq T \leq 1,6 T_r \\ \lambda &= 6 - 2,5 \frac{T}{T_r} - 2 && \text{pour} && 1,6 T_r \leq T \leq 2 T_r \\ \lambda &= 1 && \text{pour} && T \geq 2 T_r \end{aligned}$$

avec $T_r = \frac{4H}{V_s}$

où V_s désigne la valeur moyenne de la vitesse des ondes de cisaillement dans la couche d'alluvions.

Pour des sols de classe C en argile molle ou vases ainsi que pour les sites ayant des conditions de sol qui ne concordent pas avec les trois classes de sols proposés, il y a lieu de procéder à des études particulières pour la définition des actions sismiques.

Dans l'annexe A de la partie 5, des indications concernant certains facteurs simplifiés d'amplification de l'action sismique pour des reliefs topographiques particuliers (terrains en pente, versant, butte,...) ont été proposées à travers des modifications du spectre de calcul considéré, par le biais du paramètre de caractérisation du profile de sol S.

Dans l'eurocode_8, le paramètre caractérisant l'aléa sismique qui est la valeur de l'accélération efficace ou accélération de calcul a été considérée prise au rocher.

Type de profil de sol	Description	Valeur moyenne de V_s (m/s)
A	a° - Rocher ou autre formation géologique comportant une couche superficielle d'au plus 5 m de matériau moins résistant.	≥ 800
	b° - Dépôts raides de sable, de gravier ou d'argile surconsolidée, d'au moins quelques dizaines de mètres d'épaisseur, caractérisés par une augmentation progressive des propriétés mécaniques avec la profondeur.	≥ 400 (à 10 m de profondeur).
B	Dépôts profonds de sable de densité moyenne, de gravier ou d'argile moyennement raide, ayant des épaisseurs de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres, caractérisés par des valeurs de V_s d'au moins 200 m/s, augmentant à 350 m/s au moins à une profondeur de 50 m.	≥ 200 (à 10 m de profondeur) ≥ 350 (à 50 m de profondeur)
C	a°- Dépôts de sol lâche, sans cohésion, avec ou sans couches cohérentes molles.	< 200 (sur les premiers 20m)
	b°- Dépôts comprenant une majorité de sols cohérents de raideur faible à moyenne.	

Tableau 2.1 : Types de profils de sols prévus par l'eurocode_8

2.2.4 Règlements américains

Nous nous devons de présenter les règlements américains avec plus de détails, en raison des avancées importantes réalisées par les Etats-Unis en matière de recherche et d'application en ingénierie sismique, qui font que ce pays soit, aujourd'hui, situé à la pointe du progrès en matière de génie parasismique dans le monde.

2.2.4.1 UBC (Uniform Building Code)

L'UBC reconnaît l'importance des effets locaux de site et le concept de "Facteur de site" fut introduit dans la procédure de calcul de la force sismique latérale dans l'édition de 1976. En ce temps, le facteur de résonance sol-structure S faisait partie de l'équation de l'effort tranchant à la base. La valeur du facteur S était dépendante du rapport T/T_s , où T est la période fondamentale de la structure et T_s la période caractéristique du site. Le facteur S variait entre un minimum de 1.0 et un maximum de 1.5.

Dans l'édition de 1985, une deuxième méthode de détermination du facteur S fut introduite. Cette méthode ne se basait pas sur le facteur T/T_s . Au lieu de cela, le code avait défini trois profils de sols, qui sont essentiellement sol rocheux, sol profond et sol mou. Ces trois types de sol sont désignés par S_1 , S_2 et S_3 respectivement. Les valeurs du facteur de sol S pour S_1 , S_2 et S_3 sont respectivement 1.0, 1.2, et 1.5, puis un nouveau type de sol, S_4 , fut introduit suite au séisme de Mexico en 1985, pour désigner les sols profonds très mous comme ceux existant dans la ville de Mexico.

Le facteur S pour S_4 valait 2.0. Les facteurs de site S pour les quatre types de sols définis par l'UBC_1994 sont donnés dans le tableau 2.2.

Type de sol	Description	Facteur S
S_1	a° : Sol rocheux ou semblable ($V_s \geq 700$ m/s) b° : Sol moyennement dense à très dense ou moyennement rigide à rigide avec une profondeur ≤ 60 m.	1.0
S_2	Sol moyennement dense à dense ou moyennement rigide à rigide lorsque la profondeur ≥ 60 m.	1.2
S_3	Sol contenant plus de 6 m d'argile molle à moyennement dense mais moins de 12 m d'argile molle.	1.5
S_4	Sol contenant plus de 12 m d'argile molle caractérisée par une vitesse de l'onde SH ≤ 152 m/s.	2.0

Tableau 2.2 : Catégories de sites et facteurs de sites selon UBC_94

La version UBC_1997 a connu des modifications majeures par rapport aux versions antérieures. La première différence importante est que l'UBC, à travers la version de 1994, était considéré comme règlement basé sur la résistance. L'UBC_97 avait essayé de fournir une nouvelle compréhension de l'amplification du mouvement du sol et tentait de rendre compte des effets de source proche. Tout d'abord, une nouvelle classification des sols fut adoptée (tableau 2.3). Par ailleurs, l'UBC_97 recelait un nombre important de leçons tirées à partir des séismes récents ainsi que des nouvelles avancées des autres domaines. Il était destiné à fournir une parité avec les exigences précédentes exception faite des bâtiments ayant de longues périodes en champ proche ainsi que les systèmes structuraux avec une faible redondance.

Type de profil de sol	Description	Valeur moyenne de V_s dans les 30 m supérieurs en m/s
S_A	Rocher rigide	≥ 1500
S_B	Rocher	De 760 à 1500
S_C	Rocher souple ou sol très dense	De 360 à 760
S_D	Sol raide	De 180 à 360
S_E	Sol mou	< 180
S_F	Sols nécessitant une évaluation spécifique ^a	

Tableau 2.3 : Types de profils de sols selon UBC_97

^a Sols nécessitant une évaluation spécifique de site dans le type de profil S_F :

- Sol vulnérable à une rupture ou effondrement potentiels sous charges sismiques tels que les sols liquéfiables, argiles à sensibilité rapide et haute ou sols faiblement cimentés susceptibles d’effondrement.
- Tourbe et/ou argile hautement organique avec une épaisseur de couche $H > 3\text{m}$.
- Argiles hautement plastiques avec $H > 8\text{m}$ et $I_p > 75\%$.
- Argiles épaisses molles/moyennement denses avec $H > 40\text{m}$.

L’incorporation des facteurs tenant compte des effets de source proche (N_a et N_v) pour les longues et courtes périodes respectivement dans la zone sismique N°04, est destinée à reconnaître l’amplification du mouvement du sol qui s’opère à des distances proches de la source. Ceci se justifie par le fait que l’enregistrement de mouvements forts dans les récents tremblements de terre puissants tels que Northridge_94 et Kobe_95, avait montré que le mouvement du sol est significativement important à proximité de la source du séisme. Ces évènements sismiques se traduisaient par des mouvements de sol en source proche qui dépassaient largement le niveau de pic d’accélération effectif (EPA) adopté pour la zone sismique N° 04 dans l’UBC_94.

Zone	1	2A	2B	3	4
Z	0.075g	0.15g	0.20g	0.30g	0.40g

Tableau 2.4: Facteurs de zones sismiques – UBC_94

Il a été observé également, selon l’UBC_97, que l’amplification du mouvement du sol aux grandes périodes croît avec des conditions de site moins performantes. Par ailleurs, dans la version de l’UBC de 1994 ainsi que dans les versions précédentes, le calcul de l’effort tranchant à la base dépendait du mouvement du sol supposé d’un certain niveau. Dans la zone sismique N°04, ce niveau du mouvement du sol a été considéré comme étant un pic d’accélération effectif du sol (EPA) de 0.4g, et qui vaut 2/3 du pic d’accélération du sol (PGA) lorsqu’il n’existe pas de relation liant les deux paramètres.

La prise en compte de l’effet de source proche a été appliquée uniquement pour la zone sismique N°04 car ces effets ne sont significatifs que pour les forts séismes (selon l’UBC).

Ainsi, pour rendre compte des effets du phénomène d’amplification, les facteurs de site tenant compte des effets de source proche furent introduits dans l’UBC_97 comme étant une fonction du potentiel d’un séisme à une source connue et de sa distance par rapport au site considéré. Les valeurs des facteurs de site pour les courtes et longues périodes respectivement qui tiennent compte des effets de source, sont donnés dans les tableaux 2.5 et 2.6 pour différents types de sources.

Type de source sismique	Distance par rapport à une source sismique connue		
	$\leq 2\text{Km}$	5Km	$\geq 10\text{Km}$
A	1.5	1.2	1.0
B	1.3	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0

Tableau 2.5: Facteur N_a pour les courtes périodes (source proche) – UBC_97

Type de source sismique	Distance par rapport à une source sismique connue			
	$\leq 2\text{Km}$	5Km	$\geq 10\text{Km}$	$\geq 15\text{Km}$
A	2.0	1.6	1.2	1.0
B	1.6	1.2	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0	1.0

Tableau 2.6 : Facteur N_v pour les longues périodes (source proche) – UBC_97

Type de source sismique	Description de la source sismique	Définition de la source sismique	
		Magnitude moment maximum, M_w	Taux de glissement, SR (mm/an)
A	Failles susceptibles de produire des évènements de larges magnitudes avec et ayant une activité sismique importante.	$M_w \geq 7.0$	$SR \geq 5$
B	Toutes les failles autres que A ou C	$M_w \geq 7.0$ et $M_w < 7.0$ et $M_w \geq 6.5$ et	$SR < 5$ $SR > 2$ $SR < 2$
C	Failles incapables de produire des séismes importants avec une activité sismique relativement faible.	$M_w < 6.5$ et	$SR \leq 2$

Tableau 2.7 : Types de sources sismiques – UBC_97

2.2 4.2 IBC (International Building Code)

Le code international du bâtiment (IBC) a été développé à partir du programme national de recherche de risque sismique (NEHPR) de 1997, en vue d'apporter une uniformité au code national du bâtiment des Etats-Unis.

L'IBC (version 2003 ou les versions antérieures) considère la même classification de sites que celle adoptée dans l'UBC_97 (tableau 2.3). Dans ce dernier, les spectres de réponse à 5% d'amortissement sont construits à partir de la réponse spectrale en accélération d'un séisme de référence, considéré comme séisme "maximum" extrait à partir des cartes d'aléa sismique, en deux points : un point dénoté S_s correspondant aux courtes périodes et un autre point nommé S_l correspondant aux périodes valant une (01) seconde.

Des facteurs sont appliqués à la réponse spectrale en accélération pour un séisme maximum obtenu à partir des cartes d'aléa sismique, correspondant à des conditions de site relatives au site de classe B (rocher souple), pour tenir compte des conditions locales de site, en vue du développement d'un spectre de réponse approprié.

La réponse spectrale due au séisme maximum considéré pour les courtes périodes (0.2 seconde) et pour la période d'une (01) seconde, se trouvent dans les cartes incluses dans l'IBC, conformément aux dispositions du NEHPR. Ces cartes sont basées sur des analyses probabilistes d'aléa sismique, utilisant des modèles de source et de faille établis par USGS. Ces analyses furent établies pour une réponse spectrale à 5% d'amortissement et des périodes de 0.2 et 1 secondes, correspondant à un mouvement de sol ayant deux (02) % de probabilité d'être dépassé en 50 ans. Ce niveau de risque se rapporte au "séisme maximum considéré".

2.2.4.3 Coefficient de site – Ajustement de la réponse spectrale en accélération pour le séisme maxi

Comme les valeurs de S_s et S_l correspondent à un site de classe B (site exempt d'effet d'amplification ou de dé amplification), un ajustement doit être apporté si le site en question est autre que le site de classe B. Les valeurs de S_s et S_l sont ajustées en vue de la prise en compte des effets de site par les formules suivantes :

$$S_{MS} = F_a \cdot S_s$$

$$S_{MI} = F_v \cdot S_l$$

où :

F_a : coefficient de site pour des réponses à courtes périodes

F_v : coefficient de site pour des réponses à une période de 1 seconde

Les valeurs de F_a et F_v sont données dans les tableaux 2.8 et 2.9.

Classe de site	Réponse spectrale en accélération aux courtes périodes (cartes d'aléa)				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	a
F	a	a	a	a	a

Tableau 2.8 : Valeurs du coefficient de site F_a , fonction de la catégorie de site et de la réponse spectrale en accélération issue des cartes d'aléa aux courtes périodes - IBC_2003.

Classe de site	Réponse spectrale en accélération aux courtes périodes (cartes d'aléa)				
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	a
F	a	a	a	a	a

Tableau 2.9 : Valeurs du coefficient de site F_v , fonction de la catégorie de site et la réponse spectrale en accélération issue des cartes d'aléa à une période de une (01) seconde - IBC_2003.

Note : Dans les cartes d'aléa sismique, les valeurs intermédiaires sont obtenues par interpolation linéaire droite.

^a : Une analyse spécifique doit être effectuée pour déterminer les valeurs appropriées.

CHAPITRE 3

FORMULATION ANALYTIQUE DE L'AMPLIFICATION DES ONDES SISMIQUES

3. FORMULATION ANALYTIQUE DE L'AMPLIFICATION DES ONDES SISMIQUES

3.1 Intérêt de l'étude :

L'analyse de la réponse locale d'un site est un composant critique de l'ingénierie sismique lorsqu'elle se rapporte à l'aspect géotechnique du problème. Elle facilite l'incorporation des propriétés des matériaux du sous-sol, en plus de la topographie et d'autres paramètres, dans le but de prédire le mouvement du sol en surface, en matière d'amplitude, de contenu fréquentiel et de durée, résultant de l'introduction de données sismiques spécifiques relatives au rocher

En vue de la quantification des coefficients des sites réglementaires du RPA99 (version 2003), la détermination de la fonction de transfert (ou fonction d'amplification) est une étape nécessaire.

Par définition, la fonction de transfert désigne la relation reliant l'amplitude du signal à la surface (point A) par rapport à celle considérée à une profondeur donnée (point B).

Dans le RPA99 (ver 2003), l'accélération prise en compte dans le calcul des projets est supposé prise au rocher, ce qui fait abstraction complète des effets de site locaux pouvant prendre des valeurs importantes, notamment en cas de sols mous. Pour cela, nous proposons une étude numérique de l'amplification relative à chacun des sites réglementaires S_1 , S_2 , S_3 et S_4 par le biais du programme universel SHAKE.

3. 2 Théorie de la propagation unidimensionnelle (verticale) des ondes de cisaillement SH

Comme il s'agit d'étudier l'amplification, donc l'augmentation du niveau d'amplitude du mouvement sismique du sol, la détermination des caractéristiques du mouvement sismique au voisinage de la surface du sol à travers l'évaluation de sa réponse à une excitation sismique doit constituer un préalable.

Le phénomène physique de la vibration sismique est un problème tridimensionnel. Néanmoins, en génie parasismique, ce problème est souvent traité dans un espace bidimensionnel. Cependant, un certain nombre d'hypothèses permet de réduire le problème à un problème unidimensionnel, à savoir :

- ✓ L'intérêt se focalise, en génie parasismique, sur les séismes possédant un potentiel destructeur, c'est-à-dire, des séismes avec des mouvements forts. Ainsi, les ondes sismiques

- ✓ se propagent en direction de la surface avec un faible angle d'incidence, leur déplacement est, par conséquent, considéré comme vertical.
- ✓ Généralement, le sol a tendance de devenir mou près de la surface. Le contraste d'impédance important corrige le trajet des ondes suivant une direction qui devient de plus en plus verticale lorsqu'elles traversent les couches de sols molles.
- ✓ Même lorsque les caractéristiques géologiques varient dans la direction horizontale, leur variation dans la direction verticale est beaucoup plus importante par rapport à celle dans la direction horizontale.
- ✓ Durant les séismes, les ondes de surface (ondes de Love ou ondes de Rayleigh) se propagent à travers la surface du sol. Ces ondes ont une amplitude importante et donc une longue période. Les accélérations développées par ces ondes sont moindres, d'où, leur participation dans le potentiel destructeur du séisme demeure mineure. La grande part des dommages revient aux ondes de cisaillement.

Sur la base de ces hypothèses, le mouvement sismique est fréquemment traité comme une onde de cisaillement unidimensionnelle se propageant dans la direction verticale.

3.3 Propagation d'ondes de cisaillement harmonique dans un système unidimensionnel.

L'étude est effectuée avec les hypothèses suivantes :

- ✓ Milieu plan, semi infini dans la direction x , élastique, homogène, isotrope et infini dans la direction z . Les propriétés de la couche de sol sont indépendantes des variables x et z .

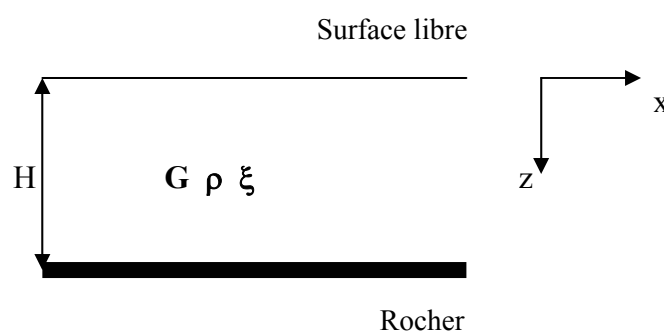


Figure 3.1 Profil de sol mono couche

- ✓ Propagation verticale des ondes de cisaillement ; le vecteur déplacement possède une seule composante non nulle : $\vec{U} (U_x \neq 0, U_y = 0, U_z = 0)$.

L'équation de l'équilibre dynamique du milieu s'écrit :

$$\sigma_{ij,j} + f_i = \rho \gamma_i = \rho \frac{\partial^2 U_x}{\partial t^2} \quad \text{avec } f_i = 0 \quad (3.1)$$

Avec les hypothèses décrites précédemment, le tenseur des déformations se réduit à :

$\varepsilon_{xz} \neq 0$ car $U_x \neq 0$ d'où

$$\varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} U_{x,z} = \frac{1}{2} \frac{\partial U_x}{\partial z} \quad (3.2)$$

La loi de comportement du milieu (loi de Hooke) est donnée par :

$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$ avec les hypothèses précédentes on obtient :

$$\sigma_{xz} = 2\mu \varepsilon_{xz} = \mu \frac{\partial U_x}{\partial z} \quad (3.3)$$

λ, μ : constantes de Lamé

δ : symbole de Kroneker

En remplaçant dans l'équation d'équilibre :

$$\frac{\partial^2 U_x}{\partial z^2} - \frac{1}{V_s^2} \frac{\partial^2 U_x}{\partial t^2} = 0 \quad (3.4)$$

avec $V_s^2 = \frac{G}{\rho}$

G : Module de cisaillement

ρ : Poids volumique

C'est une équation différentielle aux dérivées partielles à coefficients constants. La solution générale peut être obtenue par la méthode de séparation des variables de la forme :

$$U_x(z, t) = X(z).e^{i\omega t} \quad (3.5)$$

où : $X(z)$ est la déformée modale, ω est la pulsation propre en (rd/s).

En remplaçant la valeur de $U(x)$ dans (3.5) :

$$\frac{d^2 X(z)}{dz^2} + \left(\frac{\omega}{V_s} \right)^2 X(z) = 0 \quad (3.6)$$

C'est une équation différentielle du second ordre à coefficients constants qui admet pour solution :

$$X(z) = A \cos \frac{\omega}{V_s} z + B \sin \frac{\omega}{V_s} z \quad (3.7)$$

où A et B seront déterminés selon les conditions aux limites suivantes:

$$1. \quad \sigma_{xz}(z=0) = 0 \quad \text{d'où} \quad \tau_{xz}(z=0) = 0 \quad \text{soit} \quad \frac{\partial X(z)}{\partial z}(z=0) = 0$$

$$\text{on trouve : } B \frac{\omega}{V_s} = 0, \text{ c'est-à-dire } B = 0$$

$$X(z) = A \cos\left(\frac{\omega}{V_s} z\right) \quad (3.8)$$

L'équation (8) représente la déformée modale du déplacement.

2. Pour une forme modale normalisée à l'unité à la surface libre :

$$X(z=0) = A \cos\left(\frac{\omega}{V_s} z\right) = 1 \quad \text{d'où} \quad A=1$$

$$X(z) = \cos\left(\frac{\omega}{V_s} z\right) \quad (3.9)$$

3. Déformée modale nulle à l'interface avec le rocher ($z = H$) :

$$X(z=H) = 0 \quad \text{d'où} \quad \cos\left(\frac{\omega}{V_s} H\right) = 0 \quad \text{soit} \quad \frac{\omega}{V_s} H = (2n+1) \frac{\pi}{2}$$

La pulsation propre du mode n est, par conséquent, donnée par :

$$\omega_n = \frac{\pi}{2} (2n+1) \frac{V_s}{H} \quad (3.10)$$

et la fréquence :

$$f_n = (2n+1) \frac{V_s}{4H} \quad (3.11)$$

Le déplacement global dans la couche de sol est :

$$U_x(z,t) = \cos\left(\frac{\omega}{V_s} z\right) e^{i\omega t} \quad (3.12)$$

Détermination de la fonction de transfert :

De ce qui précède, le déplacement au niveau du rocher est donnée par :

$$U_{r0}(z,t) = X_{r0}(z) e^{i\omega t} \quad (3.13)$$

avec

$$X_{r0}(z) = A e^{i\frac{\omega}{V_r} z} + A' e^{-i\frac{\omega}{V_r} z} \quad (3.14)$$

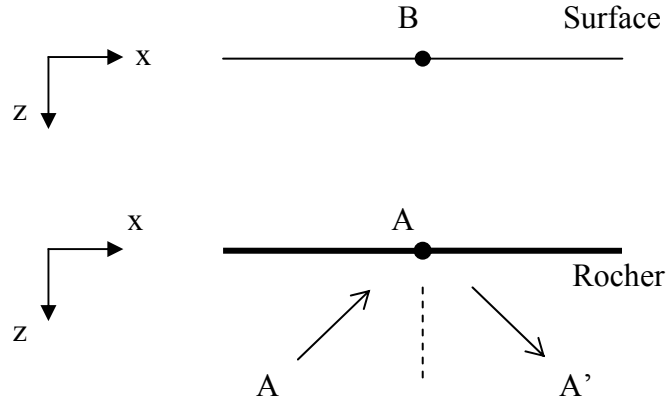


Figure 3.2 : Propagation d'ondes de cisaillement dans un profil mono couche

A : amplitude de l'onde incidente

A' : amplitude de l'onde réfléchie

Les conditions aux limites se traduisent par la continuité des déplacements et la continuité des contraintes à l'interface sol – rocher permettant d'écrire :

$$U(H, t) = U_{r0}(0, t) \Rightarrow \cos \frac{\omega}{V_s} H = A + A' \quad (3.15)$$

$$\tau_{xz}(z = H) = \tau_{xz}^{r0}(z = 0) \Rightarrow -\frac{G}{V_r} \sin \frac{\omega}{V_s} H = i \frac{\omega}{V_r} G_r (A - A') \quad (3.16)$$

G : Module de cisaillement de la couche de sol.

G_r : Module de cisaillement du rocher.

V_s : Vitesse de propagation de l'onde de cisaillement au sein de la couche de sol.

V_r : Vitesse de propagation de l'onde de cisaillement au sein du rocher.

Ainsi :

$$\begin{cases} A + A' = \cos \frac{\omega}{V_s} H \\ A - A' = \frac{\mu}{\mu_r} \frac{V_r}{V_s} \sin \frac{\omega}{V_s} H \end{cases}$$

La fonction de transfert $H_{A,B}$ entre A et B est :

$$H_{A,B} = \frac{TF(X(z=0)e^{i\omega t})}{TF(X_{r0}(z=0)e^{i\omega t})} \quad \text{sachant que} \quad \begin{cases} X(z=0) = 1 \\ X_{r0}(z=0) = A + A' \end{cases}$$

On obtient après simplification

$$H_{A,B} = \frac{1}{A + A'} = \frac{1}{\cos \frac{\omega}{V_s} H} \quad (3.17)$$

Cas d'un sol multi couches :

Les mêmes hypothèses sont retenues pour le cas d'un multi couches

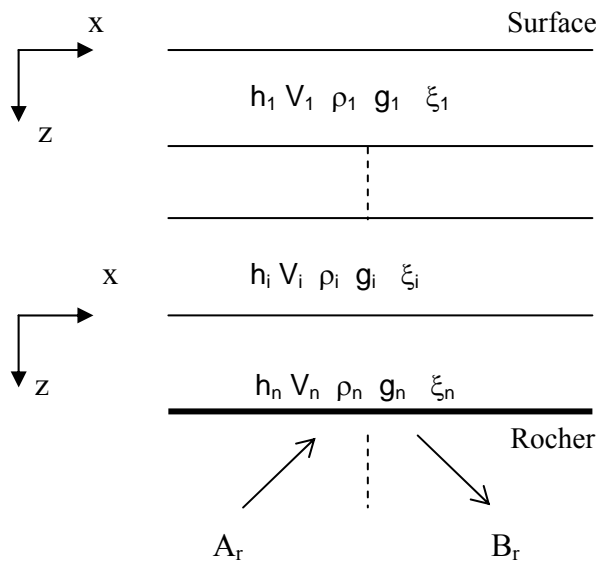


Figure 3.3 : Propagation d'ondes de cisaillement dans un profil multi couches

La forme modale du déplacement à la couche i s'écrit :

$$X_i(z) = A_i \cos \frac{\omega}{V_i} z + B_i \sin \frac{\omega}{V_i} z \quad (3.18)$$

Conditions aux limites :

1. $X_1(z=0) = 1$ soit $A_1 = 1$
(forme modale normalisée à l'unité à la surface)
- $\tau_{xz}(z=0) = 0$ soit $B_1 = 0$

d'où

$$X_1(z) = \cos \frac{\omega}{V_{s1}} z \quad (3.19)$$

$$X_i(z = h_i) = X_{i+1}(z = 0)$$

à partir de la continuité des déplacements entre les couches i et i+1. D'où

$$A_{i+1} = A_i \cos \frac{\omega}{V_i} h_i + B_i \sin \frac{\omega}{V_i} h_i \quad (3.20)$$

$$2. \quad g_i \frac{\partial X_i}{\partial z}(z = h_i) = g_{i+1} \frac{\partial X_{i+1}}{\partial z}(z = 0)$$

à partir de la continuité des contraintes entre les couches i et i+1. D'où

$$B_{i+1} = \frac{g_i}{g_{i+1}} \frac{V_{i+1}}{V_i} \left(-A_i \sin \frac{\omega}{V_i} h_i + B_i \cos \frac{\omega}{V_i} h_i \right) \quad (3.21)$$

3. Le déplacement modal au rocher est donné par :

$$X_r(z) = A_r e^{\frac{i\omega}{V_r} z} + B_r e^{-\frac{i\omega}{V_r} z}$$

$X_n(z = h_n) = X_r(z = 0)$ à partir de la continuité des déplacements entre le rocher et la couche n

$$A_r + B_r = A_n \cos \frac{\omega}{V_n} h_n + B_n \sin \frac{\omega}{V_n} h_n \quad (3.22)$$

$g_n \frac{\partial X_n}{\partial z}(z = h_n) = g_r \frac{\partial X_r}{\partial z}(z = 0)$ à partir de la continuité des contraintes entre le rocher et la couche

n. D'où :

$$A_r - B_r = \frac{g_n}{g_r} \frac{V_r}{V_n} \left(-A_n \sin \frac{\omega}{V_n} h_n + B_n \cos \frac{\omega}{V_n} h_n \right) \quad (3.23)$$

Fonction de transfert :

La fonction de transfert est entre deux couches m et n est par définition, le rapport des amplitudes des déplacements aux sommets des deux couches m et n :

$$H_{m,n} = \frac{A_m + A'_m}{A_n + A'_n} \quad (3.24)$$

3. 4 Présentation du programme SHAKE

3.4.1 Introduction :

Le programme SHAKE fut écrit en 1970-1971 par Dr Per Schnabel et Pr John Lysmer et fut publié en décembre 1972 par Dr Per Schnabel, Pr John Lysmer et H. Bolton Seed dans le rapport N° UCB/EERC/72/12, publié par the Earthquake Engineering Research Center à l'université de Californie à Berkley. Il est considéré comme le programme le plus largement utilisé pour le calcul de la réponse sismique des couches de dépôts de sols stratifiées horizontalement.

Le programme permet de calculer la réponse d'un dépôt de sol semi infini, stratifié horizontalement, surmontant un demi espace, soumis à une propagation verticale des ondes de cisaillement. L'analyse est effectuée dans le domaine fréquentiel, par conséquent, une analyse linéaire est effectuée pour un ensemble de propriétés. Une procédure itérative est utilisée pour tenir compte du comportement non linéaire des sols tel que présenté ultérieurement.

Le mouvement du sol peut être spécifié au sommet d'une sous-couche quelconque du profil de sol ou au niveau de l'affleurement correspondant.

Bien que beaucoup de modifications à travers plusieurs versions du programme SHAKE ont été mentionnées dans les récentes publications, cette version inclut la plus grande partie des modifications ayant servi à l'extension du programme original, dont le but est de conférer à cette dernière version du programme plus de convenance pour utilisation sur P.C.

3.4.2 Description du programme SHAKE :

Le profil de sol est modélisé comme un système homogène viscoélastique d'un ensemble de couches infini horizontalement. La réponse de ce système est calculée en considérant une propagation verticale des ondes de cisaillement. L'algorithme du programme original (Schnabel et al, 1972) est basé sur la solution continue de l'équation d'onde, qui fut adoptée pour les mouvements transitoire en utilisant la transformée de Fourier rapide.

Une approche linéaire équivalente est utilisée pour tenir compte de la non linéarité du sol au moyen d'une procédure itérative pour obtenir des valeurs du module de cisaillement et du coefficient d'amortissement compatibles avec la déformation uniforme équivalente, provoquée dans chaque sous-couche.

Ainsi, il est assigné, au départ, un ensemble de propriétés (module de cisaillement, amortissement et poids unitaire total) pour chaque couche du dépôt de sol. L'analyse est conduite en utilisant ces propriétés, ce qui permet de calculer la déformation de cisaillement (distorsion) provoquée dans chaque couche. Le module de cisaillement est, par conséquent, modifié pour chaque couche ; sa

valeur est calculée en utilisant la relation qui le lie à la déformation. La procédure est répétée jusqu'à ce que les modules de cisaillement compatibles parviennent à égalité. En commençant par la valeur maximale du module de cisaillement pour chaque couche, les propriétés de déformation compatibles sont obtenues au bout de 5 à 8 itération pour la plupart des profils de sol. La même procédure est utilisée pour l'amortissement, néanmoins, le début de l'opération se fait en utilisant la valeur minimale de l'amortissement.

Les hypothèses suivantes sont considérées pour le programme SHAKE (Schnabel et al, 1972).

- ✓ Chaque couche m est complètement définie par son module de cisaillement G_m , par son facteur d'amortissement λ_m , son poids volumique total γ_m (ou sa densité massique ρ_m), et son épaisseur h_m . Ces propriétés sont indépendantes de la fréquence.
- ✓ Les réponses dans le profil de sol sont causées par la propagation verticale des ondes de cisaillement à partir du demi espace rocheux qui le surmonte.
- ✓ Les ondes de cisaillement sont spécifiées comme étant des accélérations définies à des intervalles de temps égaux (une répétition cyclique de l'histoire temporelle des accélérations est proposée dans la solution).
- ✓ La dépendance entre la déformation et le module de cisaillement ainsi que celle entre la déformation et l'amortissement dans chaque couche sont prises en compte par une approche linéaire équivalente basée sur une déformation uniforme équivalente, calculée dans la couche considérée. Le rapport obtenu de la déformation uniforme de cisaillement divisée par la déformation maximale calculée, est spécifiée par l'utilisateur. La même valeur de ce rapport est utilisée pour toutes les couches.

CHAPITRE 4

ANALYSE SISMIQUE DES SITES DU RPA99 - PROPOSITION DE FONCTIONS DE TRANSFERT

4. ANALYSE SISMIQUE DES SITES REGLEMENTAIRES DU RPA (APPROCHE STATISTIQUE) – PROPOSITION DE FONCTIONS DE TRANSFERT

4.1 Proposition de fonctions de transfert pour les sites réglementaires du RPA99

Actuellement, la caractérisation des sites réglementaires (S_1 , S_2 , S_3 , S_4) est faite d'une façon indirecte via des spectres de réponse. Ces derniers reproduisent les réponses maximales des structures modélisables par des oscillateurs simples. L'objectif consiste à proposer une fonction de transfert moyenne pour chaque site, à travers une approche de simulation numérique combinée à une analyse statistique. Contrairement au spectre de réponse, la fonction de transfert permet de caractériser directement et entièrement le profil de sol, puisque elle permet d'estimer ses fréquences de vibration et son potentiel d'amplification. En plus, elle permet de choisir le spectre adéquat pour le calcul et aide à orienter le type de structure à bâtir.

Dans ce qui suit, on détermine, pour chaque site (hormis le site S_1 qui correspond à un site rocheux d'après les règles RPA99-ver 2003), les fonctions de transfert moyennes et enveloppes, en tenant compte des prescriptions des règles parasismiques algériennes concernant les profils de vitesse de propagation correspondant à chaque site (tableau 4.1).

L'approche consiste à considérer pour chaque site, un profil moyen à partir des vitesses $V_{s,min.}$ et $V_{s,max.}$, (Tableau 4.2). Pour tenir compte de la variabilité de la vitesse de propagation des ondes S, on considère, pour tous les sites, un coefficient de variation, C_v , égal à 10%, quelque soit la couche. On calcule, ensuite, l'écart type (σ) autour de la vitesse moyenne (V_m) de chaque couche :

Type de site	Description	Valeur moyenne de V_s (m/s)
S_1	Site rocheux : Roche ou autre formation géologique semblable.	$V_s \geq 800$ m/s
S_2	Site ferme : Dépôts de sables et de gravier très denses et/ou d'argile surconsolidés sur 10 à 20 m d'épaisseur.	$V_s \geq 400$ m/s à partir de 10 m de profondeur
S_3	Site meuble : Dépôts épais de sables et gravier moyennement denses ou d'argile moyennement raide.	$V_s \geq 200$ m/s à partir de 10 m de profondeur
S_4	Site très meuble : Dépôts de sables lâches avec ou sans présence de couches d'argile molle	$V_s < 200$ m/s dans les 20 premiers mètres

Tableau 4.1 : Catégories de sites du RPA99

H (m)	S ₂ (V _m en m/s)	S ₃ (V _m en m/s)	S ₄ (V _m en m/s)
0-10	380	150	100
10-20	580	300	100
20-30	650	450	200
Substratum	1200	1200	1200

Tableau 4.2. Profils moyens pour les sites S₂, S₃ et S₄.

Connaissant la vitesse moyenne et l'écart type, on constitue 25 réalisations de profils de sol autour du profil moyen de chaque site, comme suit :

$V_m - 3\sigma, V_m - 2.75\sigma, \dots, V_m - 0.5\sigma, V_m - 0.25\sigma, V_m, V_m + 0.25\sigma, V_m + 0.5\sigma, \dots, V_m + 2.75\sigma, V_m + 3\sigma.$

Ainsi, pour un site donné, un échantillon statistique de profils est constitué. Par exemple, pour le site S₂, un ensemble de profils dont les vitesses varient de 200 à 400 m/s à partir de 10 m de profondeur, sont pris en compte dans l'échantillon (tableau 4.3).

La fonction de transfert en fonction de la fréquence est calculée par le programme universel SHAKE dans le cas linéaire, pour chaque profil, entre le demi espace et la surface du sol, sur une plage de fréquences allant de 0 à 25 Hz. La fonction de transfert moyenne est obtenue en calculant la moyenne arithmétique des valeurs des fonctions de transfert de chaque profil pour la plage de fréquences considérée. L'écart type est également calculé pour chaque valeur moyenne de l'amplification correspondant à une fréquence donnée :

$$A_m(f_j) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i(f_j)}{n} \quad (4.1)$$

$$\sigma(f_j) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{(A_i(f_j) - A_m(f_j))^2}{n} \right)^{1/2} \quad (4.2)$$

- A_m : amplification moyenne
- f : fréquence
- A_i : amplification correspondant à la fréquence f
- n : nombre total des éléments de l'échantillon

Dans ce qui suit, il ne sera représenté qu'un certain nombre de profils pour chaque type de sol, correspondant à : $V_m - 3\sigma, V_m - 2.5\sigma, \dots, V_m - 0.5\sigma, V_m, V_m + 0.5\sigma, \dots, V_m + 2.5\sigma, V_m + 3\sigma.$

H(m)	$V_{m-3\sigma}$	$V_{m-2.5\sigma}$	$V_{m-2\sigma}$	$V_{m-1.5\sigma}$	$V_{m-1\sigma}$	$V_{m-0.5\sigma}$	V_m (m/s)	$V_{m+0.5\sigma}$	$V_{m+1\sigma}$	$V_{m+1.5\sigma}$	$V_{m+2\sigma}$	$V_{m+2.5\sigma}$	$V_{m+3\sigma}$
0-10	266	285	304	223	342	361	380	399	418	437	456	475	494
10-20	406	435	406	493	522	551	580	609	638	667	696	725	754
20-30	455	487.5	520	552.5	585	617.5	650	682.5	715	747.5	780	812.5	845
	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200

Tableau 4.3 : Echantillon statistique du sol ferme (S_2)

4.2 Résultat et commentaires

4.2.1 Sol ferme S_2 :

L'observation des courbes représentant la fonction de transfert dans le domaine fréquentiel fait remarquer la présence d'un pic d'amplification correspondant à une certaine fréquence. Ce pic dénote, en fait, le mode fondamental du profil ainsi que la fréquence lui correspondant. Ces deux paramètres varient en fonction de la variation de la vitesse de propagation. Ainsi, pour des valeurs de la vitesse inférieures par rapport à celles du profil de référence, le pic s'accroît par rapport à sa valeur pour ce dernier en glissant vers les fréquences inférieures. Pour des vitesses supérieures à celles du profil de référence, le pic décroît en se décalant vers les fréquences supérieures en comparaison avec le profil de référence (tableau 4.4).

La courbe de la fonction de transfert moyenne, quant à elle, illustre la valeur maximale moyenne de l'amplification ainsi que la fréquence qui en correspond. Nous remarquons également l'absence dans la courbe moyenne des modes supérieurs en raison du nombre d'échantillons considérés.

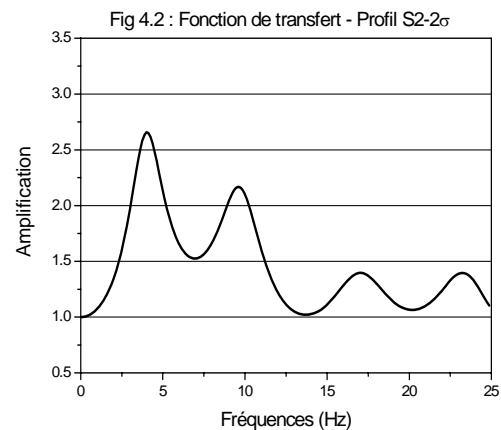
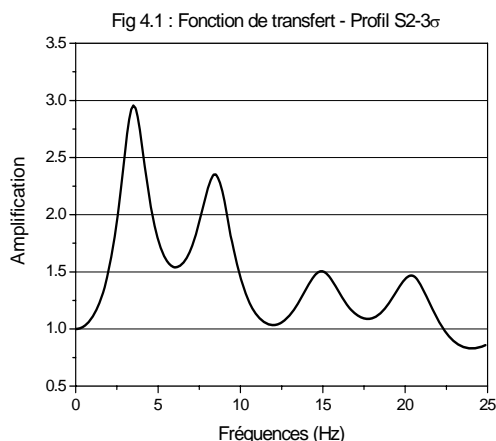


Fig 4.3 : Fonction de transfert - Profil S2-1 σ

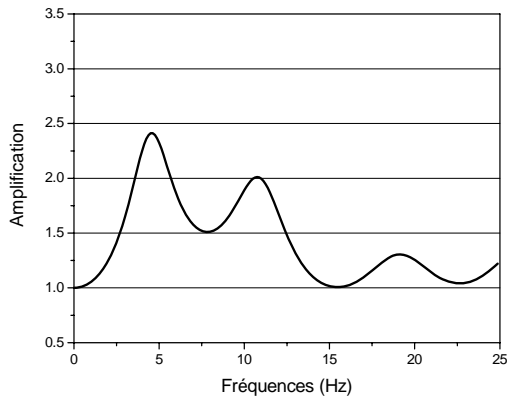


Fig 4.4 : Fonction de transfert - Profil de référence S2

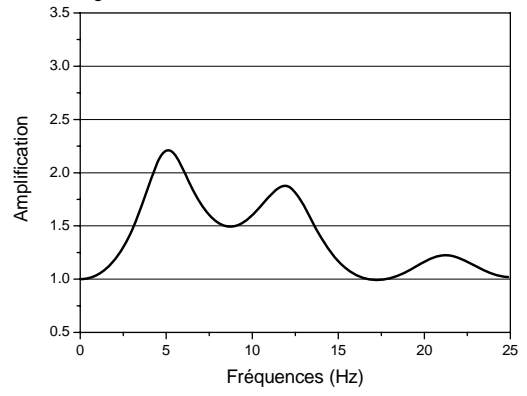


Fig 4.5 : Fonction de transfert - Profil S2+1 σ

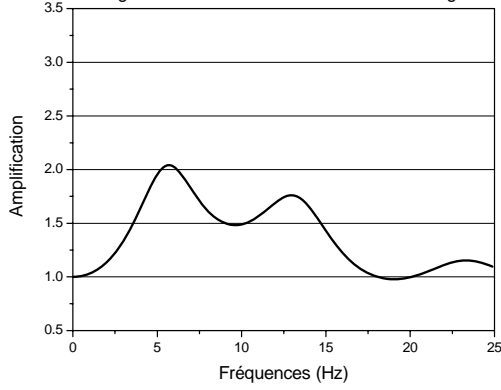


Fig 4.6 : Fonction de transfert - Profil S2+2 σ

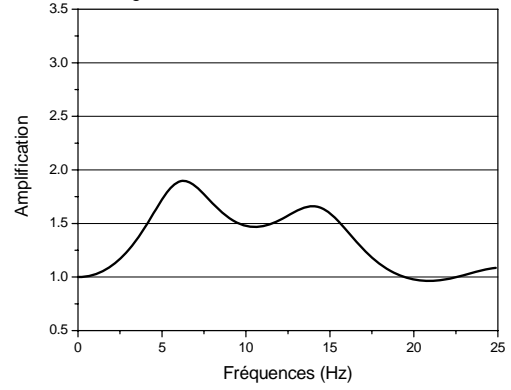


Fig 4.7 : Fonction de transfert - Profil S2+3 σ

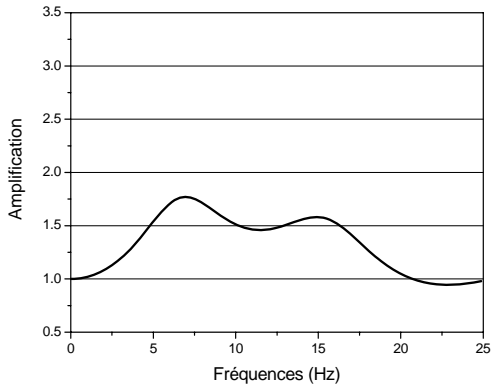


Fig 4.8 : Fonction de transfert moyenne lissée
Sol ferme (S2)

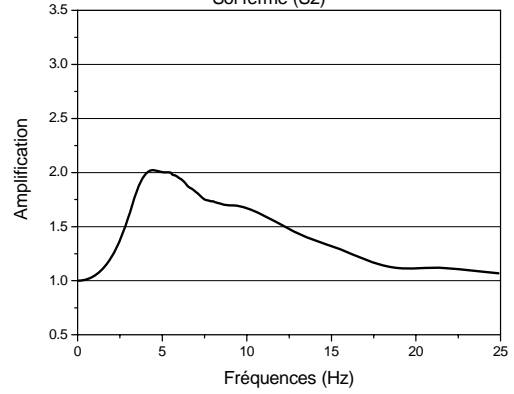
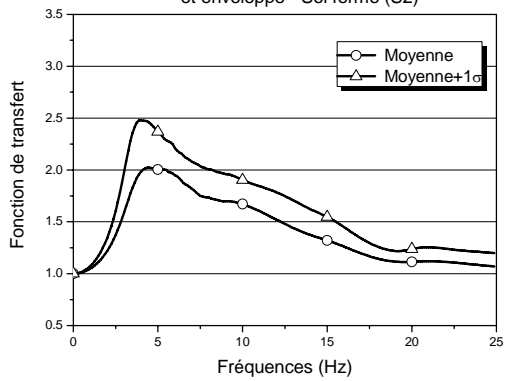


Fig 4.9 : Fonction de transfert moyenne
et enveloppe - Sol ferme (S2)

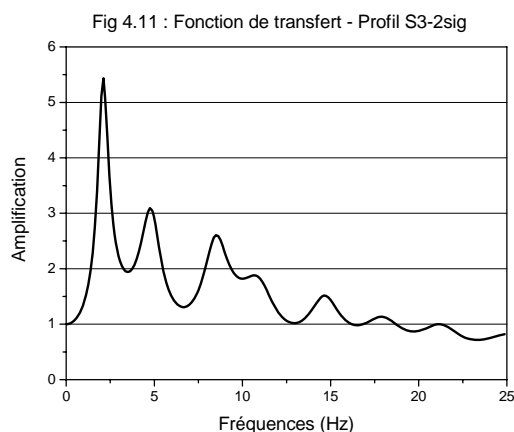
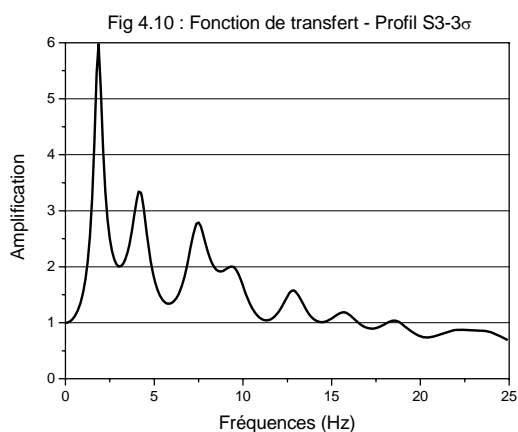


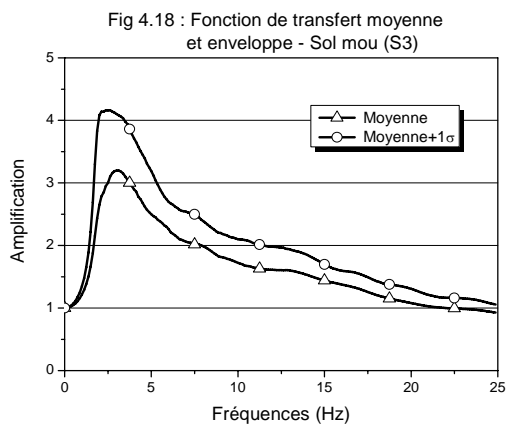
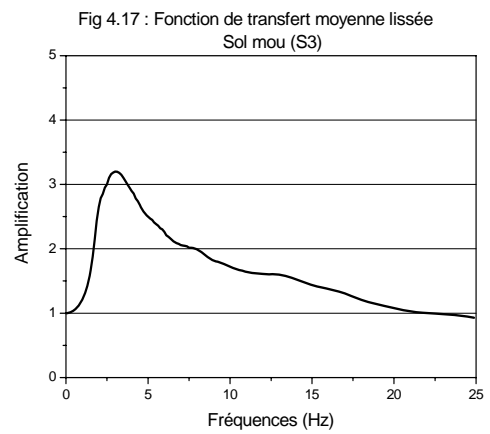
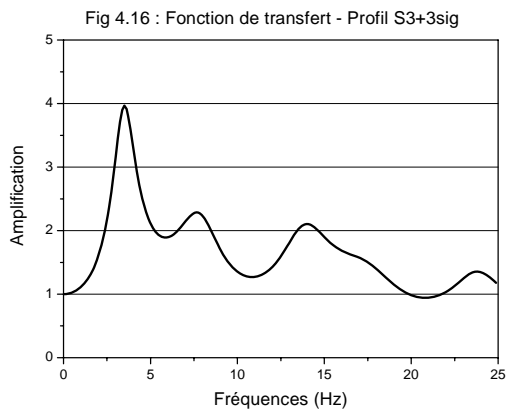
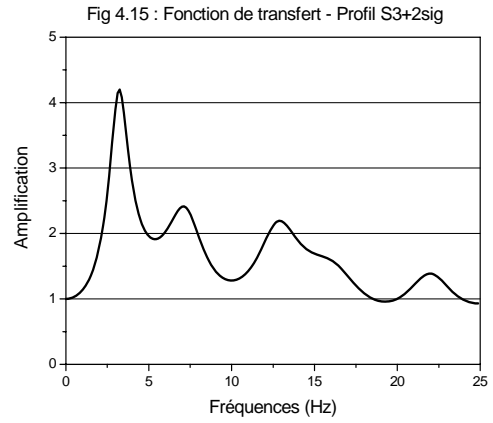
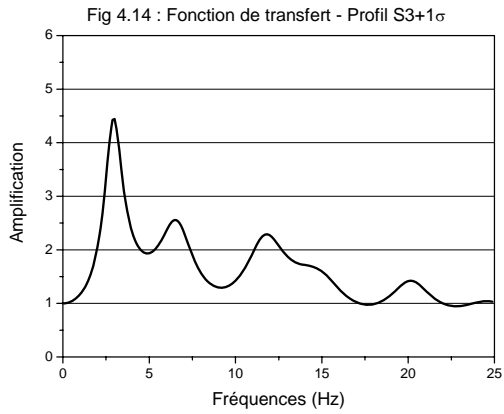
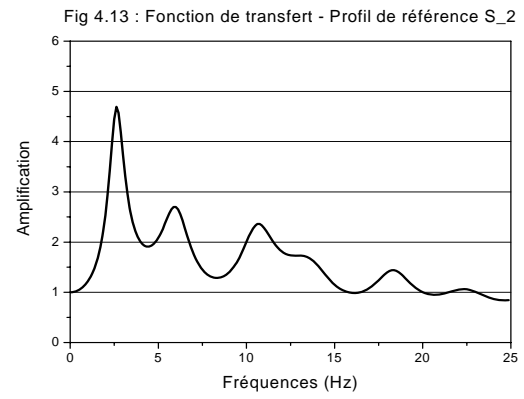
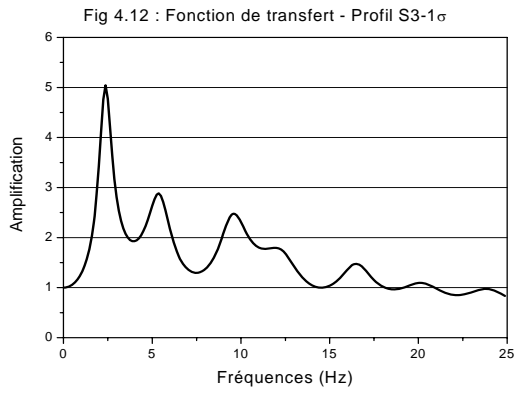
Profil	Fréquence (Hz)	Amplification maximale
$S_2-3\sigma$	3.50	2.95
$S_2-2.5\sigma$	3.75	2.80
$S_2-2\sigma$	4.00	2.65
$S_2-1.5\sigma$	4.25	2.53
$S_2-1\sigma$	4.63	2.41
$S_2-0.5\sigma$	4.88	2.31
S_2	5.13	2.21
$S_2+0.5\sigma$	5.38	2.12
$S_2+1\sigma$	5.63	2.04
$S_2+1.5\sigma$	6.00	1.97
$S_2+2\sigma$	6.25	1.90
$S_2+2.5\sigma$	6.63	1.83
$S_2+3\sigma$	7.00	1.77

Tableau 4.4 : Valeur de l'amplification maximale et de la fréquence en fonction de la dispersion par rapport au profil moyen – Site ferme (S_2)

4.2.2 Sol mou S_3 :

Au même titre que pour le sol type 2, la représentation de la fonction de transfert met en évidence le mode fondamental et la fréquence correspondante pour chaque profil, avec le maintien des mêmes remarques pour les fluctuations du pic d'amplification par rapport aux variations de la vitesse de propagation. Néanmoins, il est aisé de remarquer qu'en termes de valeurs, les pics d'amplification passent à des valeurs nettement supérieures et pour le profil de référence et pour les autres profils en comparaison avec le sol S_2 . Ceci justifie le passage d'un sol ferme possédant des caractéristiques physico mécaniques améliorées, à un sol moins consistant avec des caractéristiques moins performantes. Les mêmes observations sont également retenues pour la courbe de la fonction de transfert moyenne (tableau 4.5).



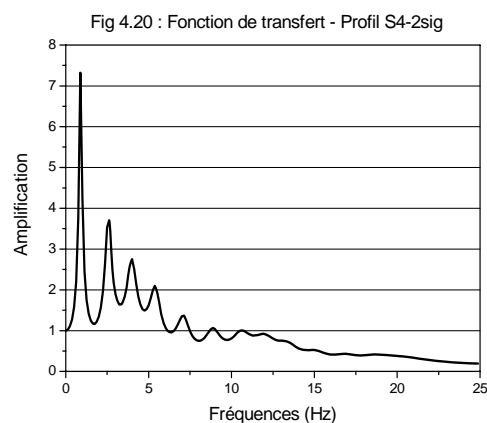
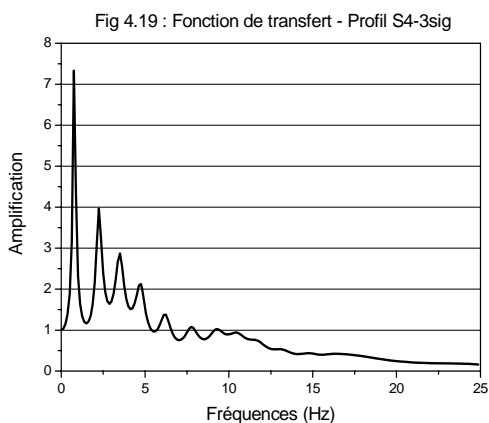


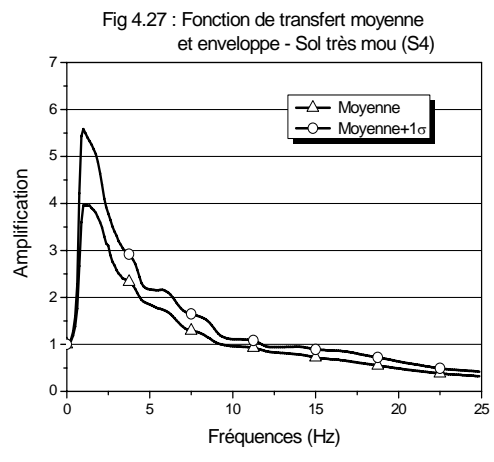
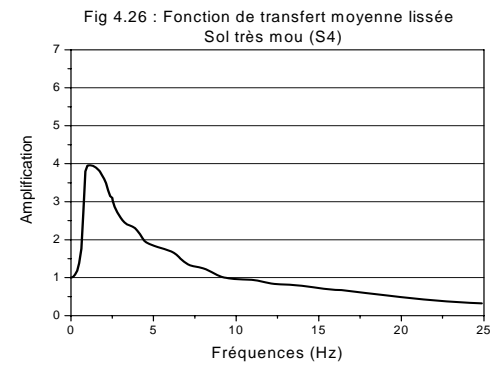
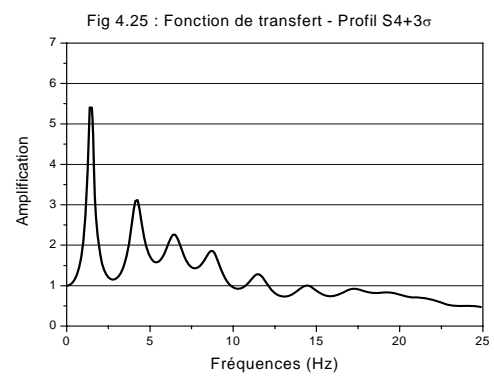
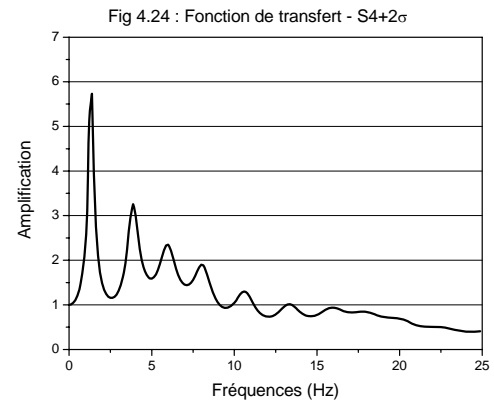
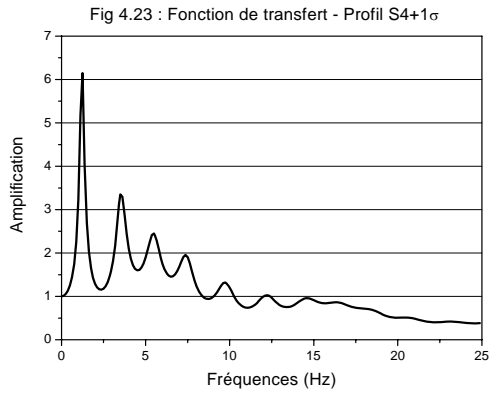
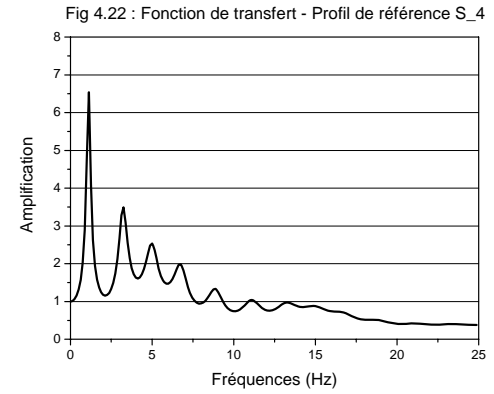
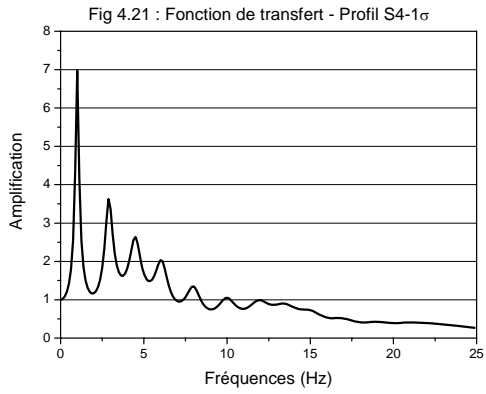
Profil	Fréquence (Hz)	Amplification maximale
S ₃ -3σ	1.88	5.97
S ₃ -2.5σ	2.00	5.74
S ₃ -2σ	2.13	5.43
S ₃ -1.5σ	2.25	5.24
S ₃ -1σ	2.38	5.04
S ₃ -0.5σ	2.50	4.87
S ₃	2.63	4.70
S ₃ +0.5σ	2.75	4.58
S ₃ +1σ	3.00	4.44
S ₂ +1.5σ	3.13	4.31
S ₃ +2σ	3.25	4.19
S ₂ +2.5σ	3.38	4.08
S ₃ +3σ	3.50	3.96

Tableau 4.5 : Valeur de l'amplification maximale et de la fréquence en fonction de la dispersion par rapport au profil moyen – Site mou (S₃)

4.2.3 Sol très mou S₄ :

Les mêmes remarques demeurent valables pour ce type de sol avec, en outre, un décalage remarquable vers les basses fréquences par rapport au pic d'amplification. En effet, nous sommes en présence d'un sol très mou avec des caractéristiques physico mécaniques médiocres, caractérisées par de faibles valeurs de la vitesse de propagation des ondes SH qui donnent, en sortie, des valeurs de l'amplification plus importantes que celles correspondant aux sites S₂ et S₃ (tableau 4.6).





Profil	Fréquence (Hz)	Amplification
S ₄ -3σ	0.75	7.33
S ₄ -2.5σ	0.88	6.44
S ₄ -2σ	0.88	7.32
S ₄ -1.5σ	1.00	5.92
S ₄ -1σ	1.00	6.98
S ₄ -0.5σ	1.00	6.11
S ₄	1.13	6.54
S ₄ +0.5σ	1.13	6.20
S ₄ +1σ	1.25	6.14
S ₄ +1.5σ	1.25	6.10
S ₄ +2σ	1.38	5.73
S ₄ +2.5σ	1.38	5.90
S ₄ +3σ	1.38	5.41

Tableau 4.6 : Valeur de l'amplification maximale et de la fréquence en fonction de la dispersion par rapport au profil moyen – Site très mou (S₄)

4.3 Synthèse

L'étude menée dans ce chapitre se résume en la détermination de la fonction de transfert moyenne à partir d'échantillons de profils de sol que nous avons simulé pour les sites (S₂, S₃, S₄). Pour chaque site, l'échantillon a été obtenu en considérant une variation uniforme de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement SH de chaque couche du profil de référence. Ainsi, pour chaque couche du profil de référence, la vitesse moyenne, V_m, est diminuée puis augmentée, progressivement, par une fraction uniforme de l'écart type, σ, par rapport au coefficient de variation de la vitesse moyenne pris égal à 10% pour toutes les couches.

L'étape suivante a consisté en la réalisation d'un calcul déterministe dans le domaine fréquentiel par le programme SHAKE de la fonction de transfert pour chaque site, donnant la valeur de l'amplification du signal entre le rocher et la surface libre du profil, sur une plage de fréquences variant de 0 à 25 Hz. De plus, comme il s'agit, dans cette étude, de s'enquérir sur le comportement global des sites réglementaires par rapport au phénomène de l'amplification, des courbes moyennes de la fonction de transfert sont constituées à partir des résultats obtenus. Dans ces courbes, chaque point correspond à la moyenne des valeurs de la fonction de transfert des éléments de l'échantillon de sols, calculée pour la même fréquence. Pour mieux cerner ce comportement global, une courbe issue de la courbe moyenne augmentée par la valeur de l'écart type calculé pour chaque fréquence est également constituée et représentée.

CHAPITRE 5

APERCU SUR LA THEORIE DES VIBRATIONS ALEATOIRES

5. APERÇU SUR LA THEORIE DES VIBRATIONS ALEATOIRES

5.1 Introduction

Un système mécanique se dit en vibration lorsque ses particules subissent des mouvements fluctuant dans le temps.

Le concept fondamental du caractère aléatoire du mouvement renferme la notion selon laquelle, il est considéré, dans une expérience aléatoire, que les événements sont produits sous les mêmes conditions. Si une expérience identique est reproduite plusieurs fois et que les enregistrements résultants, qu'ils soient réguliers ou non, sont toujours les mêmes, le processus est dit déterministe. Si, par contre, lorsque sont complètement conservées toutes les conditions sous lesquelles se déroule l'expérience, et que les résultats continuent d'être différents d'un enregistrement à un autre, le processus est dit aléatoire. Dans ce cas, un seul enregistrement ne peut être représentatif du processus aussi bien qu'une description statistique de la totalité des enregistrements.

Les vibrations aléatoires constituent une discipline qui associe la théorie des processus aléatoires à la dynamique des systèmes mécaniques, rendue nécessaire par l'émergence d'une certaine classe de problèmes, pour lesquels, la dynamique classique des systèmes n'est pas capable de fournir une formulation sous sa forme déterministe traditionnelle, par suite d'une méconnaissance des propriétés des systèmes, ainsi que des charges qui leur sont appliquées et leur évolution dans le temps. L'incertitude inhérente aux données du problème se répercute, alors, sur les sorties (réponses des systèmes) qui demeurent méconnues si ce n'est qu'au travers de leur propriétés statistiques.

Alors que l'analyse déterministe suppose parfaitement connu l'état initial du système ainsi que les charges qui lui sont appliquées et leur évolution temporelle, l'analyse probabiliste admet une incertitude dans la connaissance des deux vecteurs du comportement aléatoire, qui sont les caractéristiques du système et les charges qui lui sont appliquées.

5.2 Processus aléatoire

Un processus aléatoire est une collection ou une famille de fonctions d'un paramètre (généralement le temps) (Preumont, 1991). Un processus aléatoire est ainsi défini comme une application qui, à chaque épreuve ou expérience aléatoire, fait correspondre une fonction du temps. En outre, un processus aléatoire $X(\Omega, t)$ peut, alors, être vu comme une fonction du temps si on s'intéresse au résultat d'une expérience aléatoire donnée Ω_0 , ou bien, comme une variable aléatoire distincte si on s'intéresse à la valeur de la fonction à un instant donné.

Dans un processus aléatoire, une histoire temporelle d'une fonction ($X(t)$), prise individuellement est appelée fonction échantillon ou réalisation. Une histoire temporelle ou réalisation ne peut, à elle seule, décrire le processus mais toutes les réalisations possibles qui pourraient résulter d'une expérience aléatoire en sont nécessaires.

5.2.1 Processus aléatoire stationnaire

Il existe dans la nature des phénomènes qui, sans être "constants" ou "permanents", subissent des fluctuations autour d'une moyenne qui est une constante. On peut souvent les représenter par un type particulier de fonctions aléatoires, appartenant à la classe des fonctions aléatoires stationnaires.

Un processus aléatoire est décrit par un ensemble infini d'échantillons de fonctions. Néanmoins, on constate bien qu'en raison du caractère aléatoire, un processus n'est pas défini simplement par sa fonction temporelle, mais aussi, par les densités de probabilité $P_X(x,t)$ des variables aléatoires $X(\Omega,t)$, associées aux différents instants t . La stationnarité d'un processus aléatoire correspond à l'invariance au cours du temps des caractéristiques statistiques de ces différentes variables aléatoires.

$$P_X(x,t) = P_X(x,t+\tau) \quad \forall \tau \quad (5.1)$$

La structure de probabilité du processus est donc invariante vis-à-vis d'un changement de l'origine des temps. Or, comme les densités de probabilité ne sont pas, souvent, facilement accessibles, on se limite, d'habitude, à l'ordre 2. Un processus aléatoire sera dit stationnaire au sens large ou faiblement stationnaire si sa moyenne m_X est indépendante du temps, et sa fonction d'auto corrélation, R_{XX} , ne dépend que des instants considérés :

$$m_X = \text{Cte}$$

$$E[x_1, x_2] = R_{XX}(\tau), \quad \tau = t_2 - t_1$$

Par ailleurs, les processus aléatoires utilisés en pratique ont toujours un début et une fin, et ne peuvent donc être vraiment stationnaires. Mais pour des considérations pratiques, il est très souvent convenable de supposer que le processus est stationnaire pour l'essentiel de la durée, ou qu'il peut être divisé en plusieurs périodes sur lesquelles il est approximativement stationnaire (Newland, 1986).

5.2.2 Processus aléatoire ergodique

L'ergodisme est une propriété d'un processus aléatoire permettant de relier les deux représentations aléatoire et temporelle du processus. Ainsi, un processus stationnaire est dit ergodique si on peut définir ses caractéristiques statistiques en remplaçant les moyennes d'ensemble sur différentes réalisations par des moyennes temporelles effectuées sur une seule réalisation. En effet, il est souvent plus facile d'observer un signal aléatoire longtemps que d'en avoir des réalisations

différentes. Par conséquent, grâce à la propriété d'ergodisme, nous pourrions calculer les propriétés statistiques d'un signal aléatoire, tels que ses moments, uniquement à partir d'une seule réalisation. On peut, donc, conclure que chaque réalisation est complètement représentative de l'ensemble constituant le processus. Mais pour des considérations pratiques, seules les ergodicités dans la moyenne et dans la fonction d'auto corrélation seront considérées (processus faiblement stationnaire). La condition d'ergodicité dans la moyenne indique, pour un processus stationnaire $X(t)$ que :

$$m_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t) dt \quad (5.2)$$

De la même manière, la condition d'ergodicité dans la fonction d'auto corrélation peut être établie telle que :

$$R_{XX}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t) \cdot X(t + \tau) dt \quad (5.3)$$

5.2.3 Processus Gaussien

Nous avons vu que la description complète d'un processus aléatoire nécessite un ensemble infini d'échantillons de fonctions décrits par un ensemble infini de densités de probabilité. Cependant, dans beaucoup d'applications, une description complète n'est pas tout à fait nécessaire. Par exemple, les processus stationnaires sont, souvent, caractérisés par leurs densités spectrales de puissance, ou d'une manière équivalente, par leurs fonctions d'auto corrélation, qui représentent une caractérisation basée sur la densité de probabilité d'ordre 2. Mais ce n'est pas l'unique caractérisation, car il existe une infinité de processus différents, ayant la même densité spectrale de puissance. De plus, les informations fournies par la DSP ne permettent pas, en général, de reconstituer la distribution de probabilité d'ordre 2, ni celles d'ordres quelconques.

Il existe, néanmoins, un processus très spécial théoriquement, avec un nombre de propriétés remarquables, dont l'une veut que, dans le cas stationnaire, la densité spectrale de puissance (ou la fonction d'auto corrélation) recèle des informations suffisantes pour la reconstitution d'un ensemble infini de densités de probabilités. Ce type de processus est connu sous le nom de processus normal ou processus gaussien (Crandall et Mark, 1964).

Un processus normal est un processus parmi peu, pour lesquels les ordres supérieurs de distribution de probabilité sont décrits et étudiés.

Dans la nature, beaucoup de processus jouant le rôle d'excitation pour les systèmes vibratoires sont, approximativement normaux.

Cette observation est, vraisemblablement, appuyée par le théorème de la limite centrale, dont l'interprétation stipule qu'un processus aléatoire est, approximativement normal si chacun de ses échantillons peut être considéré comme généré par la somme ou la superposition d'un grand nombre de sources aléatoires indépendantes, où chacune n'est pas prédominante.

5.2.3.1 Description du processus normal

Un processus aléatoire est dit normal ou gaussien, si les distributions de probabilité d'ensemble sont gaussiennes ou encore, si les V.A $X(t_i)$ sont conjointement gaussiennes.

La densité de probabilité d'ordre 1 d'un processus normal est décrite par la fonction suivante :

$$P_X(x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma} \exp\left\{-1/2\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right\}, \quad -\infty < x < +\infty \quad (5.4)$$

où m et σ sont, respectivement, la moyenne et l'écart type de la variable aléatoire $X(t)$.

$$m = E[X(t)]$$

$$\sigma^2 = E[(X(t) - E[X(t)])^2]$$

Cette distribution est appelée distribution normale ou distribution gaussienne.

La fonction de densité de probabilité conjointe des M V.A $X(t_i)$ du processus gaussien $X(t)$ est représentée par la notation matricielle suivante :

$$P_X(x) = (2\pi)^{-M/2} |\Gamma_{XX}|^{-1/2} \exp\left\{-1/2(\mathbf{X} - \mathbf{m}_X)^T \Gamma_{XX}^{-1} (\mathbf{X} - \mathbf{m}_X)\right\} \quad (5.5)$$

\mathbf{X} représente le processus et est le vecteur des M V.A.,

\mathbf{m}_X est le vecteur des valeurs moyennes, et Γ_{XX} est la matrice de covariance $M \times M$

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T$$

$$\mathbf{m}_X = [m_1, m_2, \dots, m_M]^T$$

$$\Gamma_{XX} = [\Gamma_{kl}], \quad \Gamma_{kl} = \text{cov}(x_k, x_l) = \rho_{kl} \sigma_k \sigma_l$$

Si les M V.A sont non corrélées, il est à la fois nécessaire et suffisant pour que des variables aléatoires gaussiennes soient indépendantes.

La fonction de densité de probabilité conjointe est simplement exprimée en termes des moyennes et des covariances. Alors, un processus gaussien est complètement défini par sa moyenne \mathbf{m}_X et sa fonction de covariance Γ_{XX} . Il en résulte qu'un processus gaussien faiblement stationnaire est également fortement (strictement) stationnaire.

Un processus obtenu par intégration ou dérivation d'un processus gaussien, est aussi gaussien. Il en résulte que la réponse $[\ddot{y}(t), \dot{y}(t), y(t)]$ d'un système linéaire soumis à des excitations gaussiennes, est aussi gaussienne.

5.3 Analyse spectrale des processus aléatoires

L'analyse spectrale est une méthode utilisée dans la physique pour déterminer les caractéristiques d'un phénomène observé, dont l'intensité en fonction du temps constitue un signal. Pour en extraire les propriétés intrinsèques, ce signal est traité mathématiquement en vue de fournir des informations sur le phénomène.

Un système physique transforme un signal d'entrée en un signal de sortie. Le problème réside, alors, dans la manière d'exprimer les caractéristiques du signal de sortie en fonction du signal d'entrée et de celles du système.

Dans le cas général, la relation entre les valeurs du signal d'entrée et celles du signal de sortie est méconnue. Seule la relation entre les valeurs du signal d'entrée et les variations du signal de sortie peut être connue. Heureusement, il existe une classe importante de systèmes (linéaires ou supposés tels), caractérisés par des équations différentielles linéaires à coefficients constants, régis par le principe de superposition. Pour de tels systèmes, on peut décomposer le signal d'entrée en une somme de signaux simples, auxquels on saurait faire correspondre des signaux de sortie également simples, dont la superposition donnerait le résultat attendu.

Cependant, une difficulté apparaît lorsque, pour cette décomposition, il est exigé que le signal soit défini sur un domaine infini, ce qui n'est pas le cas pour les enregistrements réels, qui ne sont connus que sur des durées limitées. Il faudrait, donc, construire des modèles du signal en faisant des hypothèses sur les parties non enregistrées, tel que supposer, par exemple, que le signal reproduit, indéfiniment, le contenu de l'enregistrement, ou bien, admettre que le niveau du signal est négligeable en dehors de l'enregistrement.

5.3.1 Décomposition fréquentielle d'un processus aléatoire stationnaire

Dans les études basées sur la théorie linéaire des vibrations, l'analyse de Fourier d'excitations périodiques est communément utilisée, en raison de la simplicité qu'elle procure pour la résolution du problème, car la linéarité permet de traiter, séparément, chaque composante fréquentielle de Fourier.

A cet effet, considérons une fonction $f(t)$ périodique, de période T . Sous des conditions générales, une telle fonction peut être représentée par une superposition de plusieurs sinusoides sous la série suivante :

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n e^{in\omega_0 T} \quad (5.6)$$

où $\omega_0=2\pi/T$ est la pulsation fondamentale.

Les coefficients de Fourier C_n , peuvent être directement évalués par la relation :

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t) e^{-in\omega_0 t} dt \quad (5.7)$$

De simples calculs permettent la vérification de la formule de Parseval, selon laquelle, la moyenne temporelle quadratique de $f(t)$ est égale à la somme des carrés des valeurs absolues des coefficients de Fourier :

$$\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f^2(t) dt = \sum_{-\infty}^{+\infty} |C_n|^2 \quad (5.8)$$

Dans le cas où $f(t)$ n'est pas périodique, c'est à dire de période infinie, et si $f(t)$ définie pour $-\infty \leq t \leq +\infty$ vérifie :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)| dt < \infty \quad (5.9)$$

alors $f(t)$ peut être représentée par une superposition continue de sinusoides par l'intégrale de Fourier suivante :

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (5.10)$$

où $F(\omega)$ est la transformée de Fourier de $f(t)$. $F(\omega)$ peut être évaluée par la relation :

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (5.11)$$

5.3.2 Fonction moment – Fonction d'auto corrélation

Etant donné un processus aléatoire $X(t)$. Le moyen le plus approprié pour le définir est de spécifier ses densités de probabilité d'ordre croissant :

$$P_X(x,t), P_X(x_1,t_1; x_2,t_2), \dots, P_X(x_1,t_1; x_2,t_2, \dots, x_n,t_n)$$

5.3.2.1 Fonction moment

Mathématiquement, les moments d'une ou de plusieurs variables aléatoires sont définis comme les espérances mathématiques des différentes puissances de ces variables aléatoires :

$$E[X(t)] = \int x P_X(x, t) dx \quad (5.12)$$

$$E[X(t_1) \cdot X(t_2)] = \iint x_1 x_2 P_X(x_1, t_1, x_2, t_2) dx_1 dx_2 \quad (5.13)$$

Les équations (5.12) et (5.13) représentent, respectivement, les moments d'ordre 1 et 2 des variables aléatoires $X(t)$, et $X(t_1; t_2)$

5.3.2.2 Fonction d'auto corrélation

On appelle fonction d'auto corrélation d'une variable aléatoire $X(t)$, la fonction :

$$\phi_{XX}(t_1, t_2) = E[X(t_1) \cdot X(t_2)] \quad (5.14)$$

Propriétés :

Pour un processus aléatoire stationnaire, la fonction d'auto corrélation est symétrique $\phi_{XX}(\tau) = \phi_{XX}(-\tau)$ et sa valeur maximale est atteinte à son origine ($\tau = 0$).

Il ressort que les deux premiers moments sont d'une importance pratique considérable, dont l'intérêt qui leur est accordé provient du fait que, sans caractériser complètement le processus, ils contiennent les informations les plus importantes. De plus, les processus gaussiens qui représentent une vaste classe de problèmes physiques sont complètement définis par ces deux moments.

5.3.3 Densité Spectrale de puissance (DSP)

La densité spectrale de puissance permet de caractériser entièrement un processus aléatoire pour en autoriser une utilisation pratique. La notion de densité spectrale de puissance est extrêmement importante pour les systèmes linéaires, en raison de la simplicité avec laquelle elle permet de décrire la relation entrée – sortie du système.

La fonction d'auto corrélation est définie non négative. Pour un processus stationnaire, elle est donnée par :

$$\phi_{XX}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_1 x_2 p_X(x_1, t_1; x_2, t_2) dx_1 dx_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_1 x_2 p_X(x_1, x_2, t_2 - t_1) dx_1 dx_2 = R_{XX}(t_2 - t_1) = R_{XX}(\tau) \quad (5.15)$$

Sa transformée de Fourier est donnée par :

$$S_{XX}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{XX}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (5.16)$$

S_{XX} est nommée densité spectrale de puissance (DSP).

$S_{XX}(\omega) \geq 0$ (théorème de Bochner)

Par transformée de Fourier inverse de la densité spectrale de puissance, la fonction d'auto corrélation est donnée par :

$$R_{XX}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{XX}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (5.17)$$

Les relations 5.16 et 5.17 sont connues sous le nom de relations de Weiner – Khintchine.

Les processus aléatoires (faiblement) stationnaires ne possèdent pas de transformée de Fourier, puisqu'un échantillon d'un processus stationnaire ne s'annule pas à l'infini ; il n'est pas absolument intégrable. C'est pour cela que l'analyse spectrale de Fourier se fera, non pas sur un échantillon du processus, mais sur sa fonction d'auto corrélation $R_{XX}(\tau)$ (Newland, D.E., 1984; Preumont, A., 1990). Celle-ci étant la transformée de Fourier inverse de la fonction de densité de puissance spectrale.

La signification physique de $S(\omega)$ peut être donnée en considérant l'état limite pour la fonction d'auto corrélation où $\tau=0$:

$$R(0) = E[X^2(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{XX}(\omega) d\omega \quad (5.18)$$

Cela signifie que la moyenne quadratique du processus est égale à la somme de $S(\omega)$, sur toutes les fréquences considérées. $S(\omega)$ est, donc, la distribution de l'énergie moyenne du processus dans le domaine fréquentiel.

$S_{XX}(\omega)$ est liée aussi, d'une façon directe, à $\bar{X}(\omega)$ (Preumont, A., 1990) qui est la décomposition fréquentielle du signal.

$$S_{XX}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2\pi}{T} E\left[|\bar{X}(\omega, T)|^2\right] \quad (5.19)$$

$S_{XX}(\omega)$ est une fonction réelle, paire et positive (≥ 0)

Les signaux, ayant une densité spectrale de puissance constante, sont appelés Bruit blanc.

$$S_{XX}(\omega) = S_0 \quad (5.20)$$

Un tel processus n'est pas physiquement réalisable puisque sa variance n'est pas bornée. Il constitue cependant une idéalisation très importante dans l'étude de la réponse des systèmes linéaires.

5.4 Simulation d'accélérogrammes artificiels:

5.4.1 Introduction :

Le calcul d'accélérogrammes synthétiques s'avère très important dans le cadre des études d'aléa sismique et pour le dimensionnement des structures, plus particulièrement, lorsque les bases de données de mouvements forts sont pauvres. La génération d'accélérogrammes synthétiques permet, donc, de palier au manque de données, et fournit aux ingénieurs du génie civil des traces temporelles pour des approches dynamiques de dimensionnement des structures.

Même lorsqu'ils existent, les enregistrements réels de séismes sont limités dans le sens où ils ne sont qu'une réalisation unique d'un ensemble de paramètres aléatoires (magnitude, distance focale, propriétés d'atténuation, contenu fréquentiel, durée,...). L'enregistrement est une réalisation qui ne se reproduira jamais de la même manière et par conséquent, si une autre réalisation se reproduit, elle peut ne pas satisfaire les critères de conception. La recommandation est donc de considérer un tremblement de terre comme étant un processus stochastique non stationnaire.

La nature du sol (non homogène, discontinu, anisotrope) apporte des modifications en fréquence et en amplitude du signal entre la source et la surface libre. Les ondes sismiques sont ainsi modifiées par déphasage et amplification au voisinage de la structure. Il se peut même que les caractéristiques de l'excitation sismique varient notablement d'un point d'appui de la structure à un autre.

Plusieurs modèles stochastiques de génération numérique d'accéléérations du sol ont été proposés et appliqués aux problèmes de structures.

Cependant, Shinozuka perfectionna la méthode de la représentation spectrale qui peut être facilement programmée pour la simulation numérique d'accéléérations ou de déplacements du sol. Ces accélérations sont considérées comme des échantillons d'un champ stochastique gaussien, homogène et unidimensionnel.

Une autre méthode, utile pour l'ingénieur, permet de simuler des accélérogrammes à partir d'un spectre de réponse réglementaire. La relation reliant ce dernier à la DSP est basée sur la théorie des vibrations aléatoires. Le modèle établit la liaison entre la DSP du processus et le spectre de la pseudo vitesse à amortissement nul $S_v(f, \xi=0)$:

$$A_i^2 = \frac{4 \Delta f S_v^2}{T \int_0 a^2(t) dt} \quad (5.21)$$

A_i : amplitude du processus à la fréquence f_i

T : durée totale du signal > 13 s

f : fréquence

a : accélération

5.4.2 Modélisation de la fonction de densité spectrale de l'excitation sismique

En réalité, le signal sismique reçu en un site donné dépend de plusieurs facteurs, comme le type de source (mécanisme), le chemin de la propagation d'ondes, la dispersion des ondes dans le milieu hétérogène, l'effet des conditions locales du site (amplification), etc... Théoriquement, le signal peut être représenté, en incorporant l'effet de ces paramètres, sous la forme suivante:

$$S_{X_i X_i}(\omega) = S_0(\omega) R(\omega) |H_i(\omega)|^2 \quad (5.22)$$

où

$$R(\omega) = \exp\left[-\frac{\omega R}{Q(\omega) V_s}\right] \quad (5.23)$$

avec :

$S_0(\omega)$ est le signal sismique à la source,

$R(\omega)$ est la fonction de transfert due au trajet entre la source et le site (effet de la propagation d'ondes),

$H(\omega)$ est la fonction de transfert des couches géologiques locales du site,

$Q(\omega)$ est la fonction d'atténuation fréquentielle,

V_s est la vitesse de propagation de l'onde de cisaillement.

En pratique, il est très commode de simplifier le problème, pour l'estimation du signal, en suggérant l'hypothèse que le champ d'observation est proche de la source et que les ondes se propagent verticalement. L'estimation du signal sismique se réduit à l'expression suivante (Rofooei et al, 2001) :

$$S_{X_i X_i}(\omega) = S_0(\omega) |H_i(\omega)|^2 \quad (5.24)$$

De plus, en analysant les mouvements sismiques réels, les spectres d'amplitude de Fourier exhibent généralement des variations en fréquences.

Kanaï et Tajimi proposèrent un modèle analytique de densité spectrale de puissance, basé sur la fonction de transfert d'un oscillateur simple, qui permet de modéliser les mouvements sismiques par un bruit blanc stationnaire ($S_0(\omega) = \text{cste}$) filtré, d'une durée limitée. Il correspond à la réponse en accélération d'un oscillateur de pulsation propre ω_g et d'amortissement β_g à un bruit blanc d'amplitude S_0 :

$$|H_i(\omega)|^2 = \frac{1 + 4\beta_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2\right]^2 + 4\beta_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2} \quad (5.25)$$

où ω_g et β_g sont les caractéristiques dynamiques d'un oscillateur modélisant la couche géologique superficielle.

Der Kiureghian, A., et Neuenhofer, A., (1992) ont proposé des valeurs de ces paramètres dynamiques pour trois types de sols:

- Sol ferme : $\omega_g = 15rd / s ; \beta_g = 0.6$
- Sol de moyenne consistance : $\omega_g = 10rd / s ; \beta_g = 0.4$
- Sol meuble : $\omega_g = 5rd / s ; \beta_g = 0.2$

Cependant, ce filtre conduit à des variances stationnaires infinies de la vitesse et du déplacement, dues à la singularité existant au voisinage de $\omega \rightarrow 0$, car la DSP vitesse est donnée par $\frac{S(\omega)}{\omega^2}$, et la

DSP déplacement par $\frac{S(\omega)}{\omega^4}$

Pour cela, (Clough et Penzien) proposèrent en 1975 un filtre correctif afin de réduire les valeurs spectrales au voisinage des faibles fréquences. Ce filtre a pour expression :

$$|H'_i(\omega)|^2 = \frac{(\omega/\omega_f)^4}{\left[1 - (\omega/\omega_f)^2\right]^2 + 4\beta_f^2(\omega/\omega_f)^2} \quad (5.26)$$

où ω_f et β_f sont les caractéristiques du filtre correctif

Ces paramètres ne doivent influencer l'allure du spectre qu'au niveau des faibles fréquences, ce qui conduit à choisir le paramètre ω_f relativement faible vis-à-vis de la fréquence du sol. Zerva et Der Kiureghian ont proposé les valeurs suivantes :

$$\begin{cases} \omega_f = 0.1\omega_g \\ \beta_f = 0.6 \end{cases}$$

Qu'elle soit utilisée directement ou qu'elle permette de générer des accélérogrammes synthétiques, la densité spectrale de puissance est à la base de la description aléatoire des mouvements sismiques et, par conséquent, de l'analyse stochastique en ingénierie sismique.

5.4.3 Processus aléatoire non stationnaire

Les mouvements sismiques sont, par nature, non stationnaires, aussi bien en amplitude qu'en contenu fréquentiel. La phase forte d'un signal concerne l'essentiel de son énergie et de son contenu fréquentiel, généralement riche en hautes fréquences. La phase descendante est plutôt caractérisée par de basses fréquences. En d'autres termes, le signal sismique est caractérisé par un contenu fréquentiel variant en fonction du temps. Cette variation peut aussi être mise en évidence par le spectre évolutif de Mark $S(t, \omega)$ (Mark, 1969). Dans la génération de signaux artificiels, le processus

sera considéré stationnaire, ce qui revient à utiliser des expressions de DSP indépendantes du temps. On distingue, en général, les processus séparable et non séparable.

▪ **Processus séparable**

C'est un processus où l'instationnarité affecte simplement l'amplitude. En d'autres termes, le processus stationnaire est modifié par un facteur correctif déterministe, appelé enveloppe temporelle. Il est défini, comme suggéré par Amin et Ang (Nour, 2004) par:

$$X_{nsta}(t) = a(t) \cdot X_{sta}(t) \quad (5.27)$$

▪ **Processus non séparable**

C'est un processus où l'instationnarité affecte aussi bien l'amplitude que le contenu fréquentiel, ce qui est compatible avec les observations faites sur les accélérogrammes réels. Les observations ont montré les points suivants :

- L'amplitude croît dans un premier temps (phase début), reste ensuite approximativement constante sur une certaine période appelée phase forte (phase stationnaire), et décroît ensuite pour s'annuler (phase finale).
- Le début de l'accélérogramme est en général plus riche en composantes de haute fréquence (ondes P), que la suite de l'enregistrement. La phase finale de l'accélérogramme est cependant plus riche en faibles fréquences (ondes de surface).

Un accélérogramme est donc une fonction à variations rapides et irrégulières autour de zéro, dont la durée totale T peut varier de quelques secondes à plusieurs dizaines de secondes.

Généralement, cette fonction se décompose en une phase initiale pour laquelle les accélérations sont faibles, une phase forte suivie d'une phase modérée et une phase de retour progressive à une accélération nulle.

La durée de phase forte est, souvent, plus significative pour conduire l'analyse sismique d'un ouvrage. Elle est définie comme étant la partie comprise entre 5% et 95% du diagramme énergétique cumulatif, correspondant à l'enregistrement initial (Trifunac et Brady, 1975).

5.4.4 Modèles de simulation des accélérogrammes

5.4.4.1 Simulation des accélérogrammes par la méthode de la représentation spectrale

L'accélérogramme est modélisé comme étant un échantillon d'un processus stochastique stationnaire, gaussien, ergodique, de moyenne nulle. Il est décrit directement par sa densité spectrale de puissance (DSP). Le modèle de simulation utilise la méthode de **Monté Carlo** perfectionnée par Shinozuka et al (1987). Il est défini par la série suivante

$$\ddot{X}(t) = 2 \sum_1^N \sqrt{S(\omega_i) \cdot \Delta\omega} \cdot \text{Cos}(\omega_i t + \phi_i) \quad (5.28)$$

où $S(\omega_i)$ est la fonction de densité spectrale du processus

$\Delta\omega$ est l'incrément fréquentiel

$$\omega_i = i \Delta\omega$$

$N \Delta\omega$ est la fréquence maximale considérée

ϕ_i sont des angles de phase aléatoires indépendants et uniformément distribués sur $[0, 2\pi]$.

En faisant tendre l'indice limite de la série, N , vers l'infini, les processus simulés deviennent asymptotiquement gaussiens sur la condition que les ϕ_i soient indépendants. Cependant, cette condition est nécessaire pour que les processus soient à moyenne nulle.

La génération digitale de l'accélération peut être accomplie par les moyens de la **F.F.T.** (Fast Fourier Transform). Cette technique de calcul nécessite que le nombre de points N soit un multiple de 2 ($N = 2^n$). La fréquence limite ou fréquence de coupure est prise égale à la fréquence de Nyquist et est donnée par

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} \quad (5.29)$$

L'expression de l'accélération prend la forme digitalisée suivante

$$\ddot{X}_k = 2 RE \left[\sum_{l=0}^{N'-1} \sqrt{S_l \Delta\omega} \cdot e^{i\phi_l} \text{Exp}\left(\frac{i2\pi l k}{N'}\right) \right] \quad (5.30)$$

avec $N' = 2N$ et $\Delta\omega = (4\pi f_c)/N'$

Une fois l'excitation calculée, il est judicieux de fenêtrer ses phases début et fin de manière à le rendre plus réaliste.

5.5 Exemple de simulation

On va simuler des accélérogrammes en utilisant le modèle de la fonction de densité spectrale de Kanaï et Tajimi modifié par Clough et Penzien. La simulation est faite pour le cas d'un sol ferme et meuble.

La technique de calcul utilise la FFT pour la génération digitale de l'excitation. Le nombre de points sur la fonction de densité spectrale (fréquences positives et négatives), $N' = 2^{12} = 4096$, et avec un

pas temporel de 0.01 *sec*. L'excitation est donc simulée pour une durée de 40.96 *sec*. La fréquence prédominante de la densité spectrale, qui est égale à 2.4 *Hz* pour le sol ferme et 0.8 *Hz* pour le sol meuble, est largement inférieure à la fréquence limite considérée, $f_c = 50$ *Hz*.

Celles-ci conduisent donc à générer l'accélérogramme avec une résolution fréquentielle de 0.15 *rd/s* (0.02 *Hz*).

Une fois l'excitation stationnaire calculée (figure 5.1), elle est multipliée par une enveloppe temporelle qui a une forme parabolique au début de l'excitation et une atténuation exponentielle à sa phase finale. Elle a l'expression suivante

$$a(t) = \begin{cases} (t/3)^2 & 0 \leq t \leq 3s \quad (\textit{phase début}) \\ 1 & 3 \leq t \leq 13s \quad (\textit{phase forte}) \\ \exp[-0.26(t-13)] & t \geq 13s \quad (\textit{phase finale}) \end{cases} \quad (5.31)$$

La figure 5.1 montre les accélérogrammes stationnaires simulés pour le cas de sols ferme et meuble, normalisés à 0.2 g. Pour le sol ferme, dont la fréquence est importante, l'accélérogramme simulé est un échantillon d'un processus à bande large et exhibe donc une allure d'une sinusoïde d'amplitude et de fréquence rapidement variables avec le temps. Par contre, l'accélérogramme simulé pour le cas d'un sol meuble, exhibe une allure d'une sinusoïde d'amplitude et de fréquence lentement variables avec le temps puisqu'il représente une réalisation d'un processus à bande étroite dont la fréquence prédominante est faible.

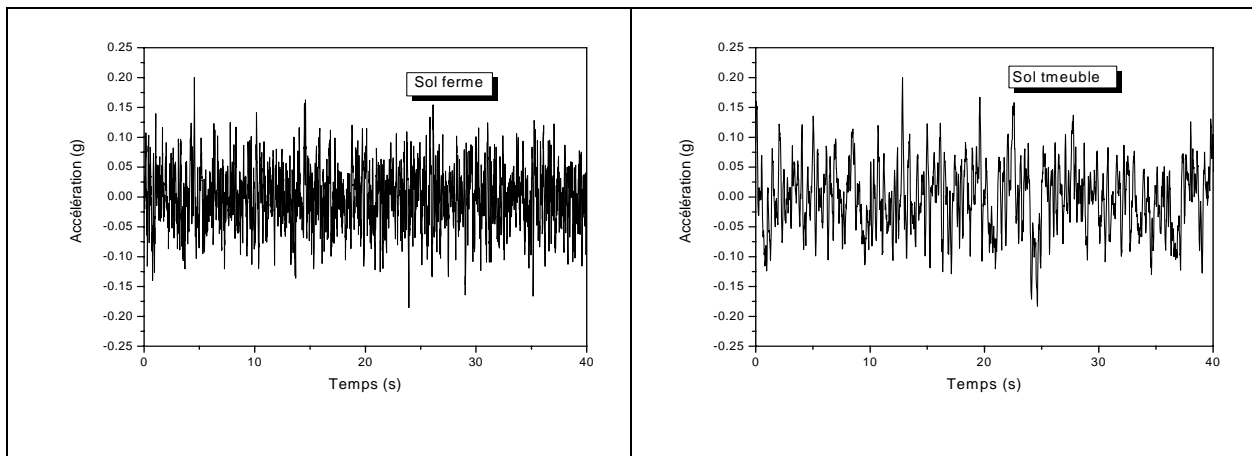


Figure 5.1 Accélérogrammes synthétiques stationnaires (sol ferme et sol meuble - réalisations typiques)

La figure 5.2 montre deux (02) accélérogrammes synthétiques non stationnaires pour le cas de sols ferme et meuble.

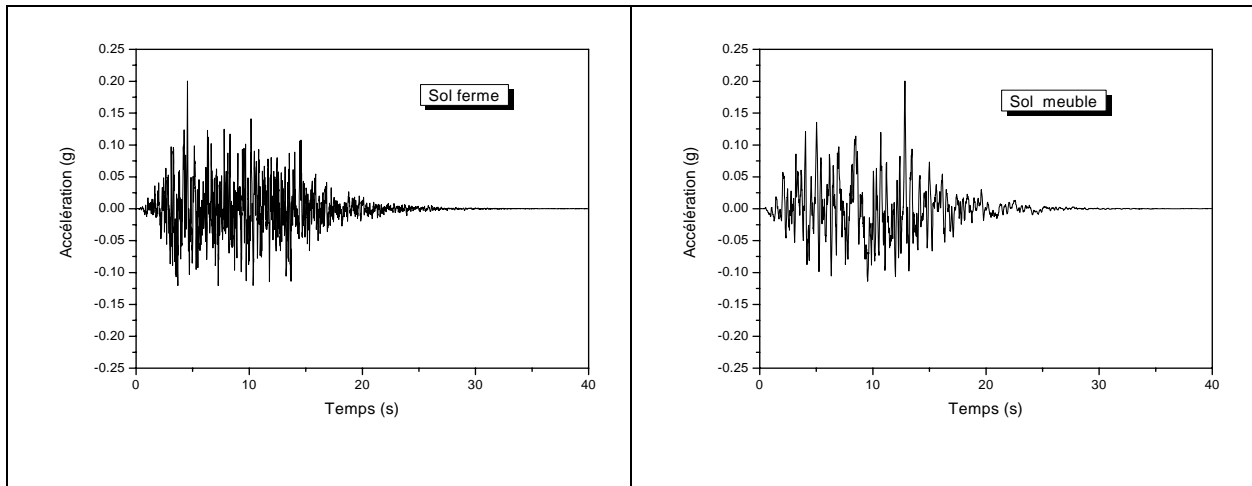


Figure 5.2 : accélérogrammes synthétiques non stationnaires (sol ferme et sol meuble - réalisations typiques)

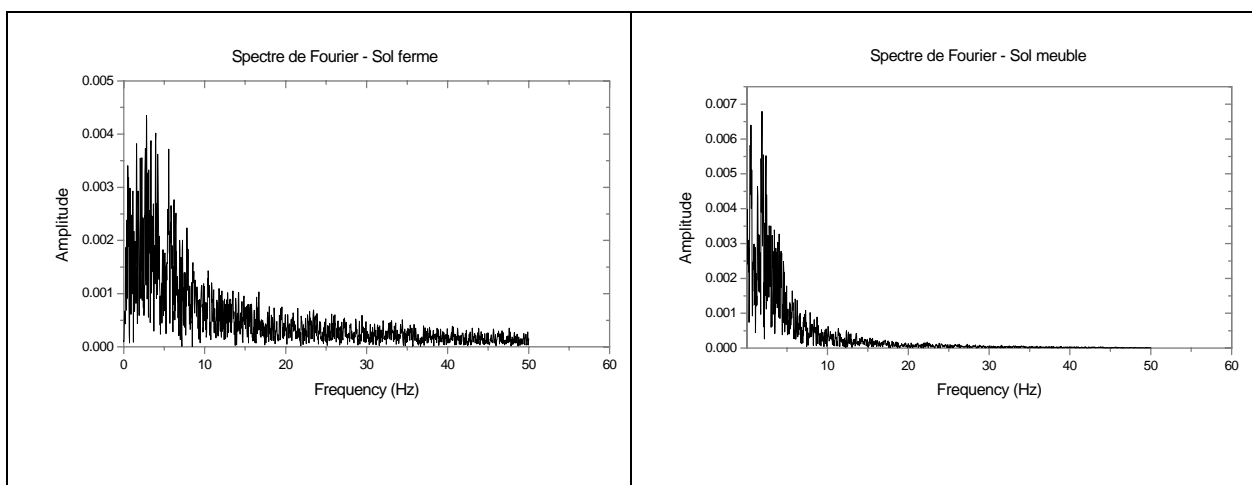


Figure 5.3 Spectres de Fourier des accélérogrammes synthétiques non stationnaires (sol ferme et sol meuble)

CHAPITRE 5

QUANTIFICATION DES COEFFICIENTS DE SITE POUR LES SOLS REGLEMENTAIRES DU RPA99

6. QUANTIFICATION DES COEFFICIENTS DE SITE POUR LES SOLS REGLEMENTAIRES DU RPA99 (VER 2003)

6.1 Introduction

Un effet de site est un phénomène se traduisant par une amplification du mouvement sismique entre le substratum rocheux et la surface du sol, accompagnée d'une modification de son contenu fréquentiel et, parfois, un prolongement de sa durée. De ce fait, pouvoir correctement le quantifier constitue un souci primordial en ingénierie sismique.

6.2 Définition du coefficient de site

Un coefficient de site est défini comme étant le rapport entre la l'amplitude maximale du signal en surface et l'amplitude maximale enregistrée à la base rocheuse. Dans le cas d'une accélérations sismiques, il est donné par :

$$C_s = \frac{PGA_{surface}}{PGA_{base}} \quad (6.1)$$

PGA : Peak Ground Acceleration.

Un coefficient de site rend compte du taux d'amplification du signal sismique incident entre le substratum rocheux et la surface du site.

6.3 Comportement linéaire des sols

Pour un sol à comportement linéaire, il existe un domaine de faibles déformations pour lequel la relation entre la contrainte appliquée et la déformation associée est linéaire. Si à l'intérieur de ce domaine on effectue une décharge (diminution de la contrainte appliquée), le chemin suivi dans le plan (σ, ε) est le même chemin suivi lors de la charge. En particulier, si l'effort s'annule complètement, la déformation résiduelle de l'échantillon est nulle. Le sol a, donc, un comportement élastique linéaire (Pecker, 1984).

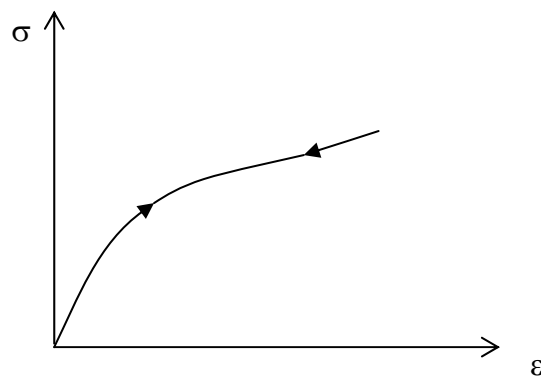


Figure 6.1 : Courbe de charge et décharge d'un matériau élastique linéaire

Par ailleurs, un système linéaire est invariant dans le temps, c'est-à-dire, ses propriétés restent constantes lors de la sollicitation. Un système linéaire avec une entrée et une sortie est complètement caractérisé par sa réponse impulsionnelle $h(t)$ et sa fonction de transfert $H(\omega)$. Sa relation entrée/sortie dans le domaine temporel prend la forme d'une convolution :

$$Y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (6.2)$$

$Y(t)$: signal de sortie

$x(t)$: signal d'entrée

Dans le domaine fréquentiel, le problème s'écrit :

$$S_{YY}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{XX}(\omega) \quad (6.3)$$

où
$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{-i\omega t} dt \quad (6.4)$$

$S_{YY}(\omega)$ et $S_{XX}(\omega)$ représentent les densités spectrales de puissance de sortie et d'entrée respectivement. Le problème de la relation entrée/sortie du système peut être aisément résolu dans le domaine fréquentiel en remplaçant l'excitation réelle par un bruit blanc équivalent d'intensité égale à la densité spectrale de puissance à la fréquence naturelle du système.

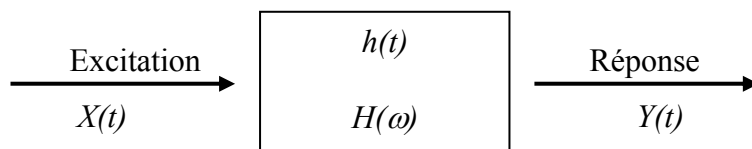


Figure 6.2 : Système linéaire invariant

6.4 Estimation des coefficients de sites

Pour le calcul des coefficients des sites réglementaires S_2 , S_3 et S_4 , il a été fait usage d'une méthode stochastique basée sur l'estimation des fonctions de densité spectrale de puissance d'un mouvement sismique, en considérant un comportement élastique linéaire des couches des sols. A cet effet, plusieurs champs sismiques incidents sont simulés et utilisés comme input sismique pour solliciter les différents sites étudiés. Pour ce faire, l'étude a été menée en deux étapes :

Dans la première étape, le champ sismique incident est défini à l'aide de densités spectrales de puissance expérimentales moyennes, calculées à partir de DSP relatives aux enregistrements accélérométriques réels disponibles pour certains intervalles de fréquences.

Pour ce cas, nous avons utilisé un échantillon de douze accélérogrammes réels (tableau 6.1).

N°	Séisme	Composante	Localisation	Type de champ	Distance à l'épicentre (Km)
01	08292003_144751_ST2	E-W	Keddara	proche	21.9
02	08292003_144751_ST2	N-S	Keddara	proche	21.9
03	09082003_074410STA2	E-W	Dar El Beida	proche	17.5
04	09082003_074410STA2	N-S	Dar El Beida	proche	17.5
05	1002003_151147_ST2	E-W	Keddara	proche	21.9
06	1002003_151147_ST2	N-S	Keddara	proche	21.9
07	07022005_74249_AFR	E-W	El Affroun	lointain	83.4
08	07022005_74249_AFR	N-S	El Affroun	lointain	83.4
09	12012004_174225_HRA	E-W	Hamam Righa	lointain	110
10	12012004_174225_HRA	N-S	Hamam Righa	lointain	110
11	12012004_174225_KMA	E-W	Khemis Miliana	lointain	127
12	12012004_174225_KMA	N-S	Khemis Miliana	lointain	127

Tableau 6.1 : Séismes utilisés pour l'estimation de la DSP modélisant le champ sismique incident réel

La fréquence centrale et la largeur de bande, dans le cas de DSP réelle, sont les paramètres qui contrôlent l'effet de la distance. Dans les calculs de simulation, on considère les champs sismiques incidents, définis en termes de fréquences centrales et de largeurs de bandes.

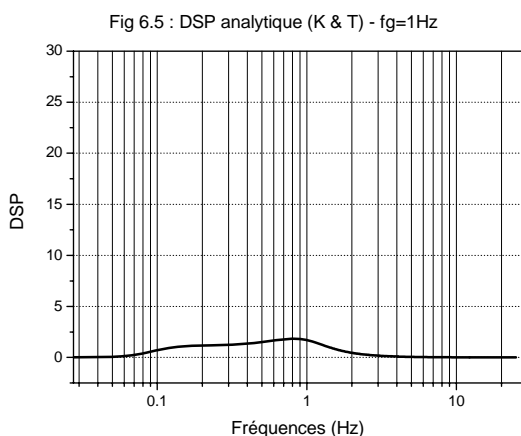
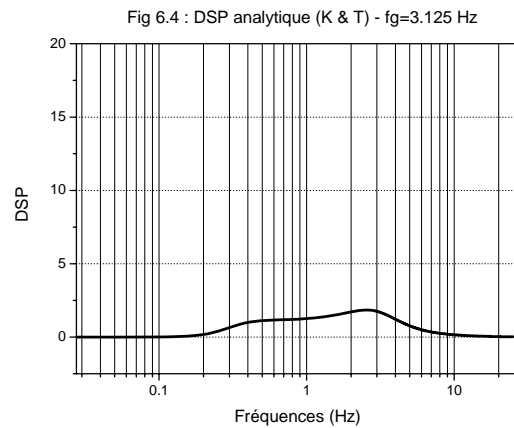
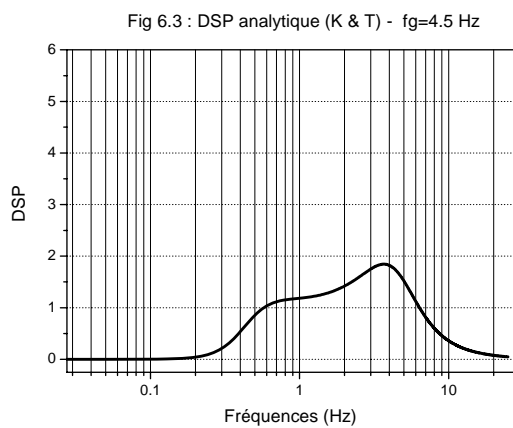
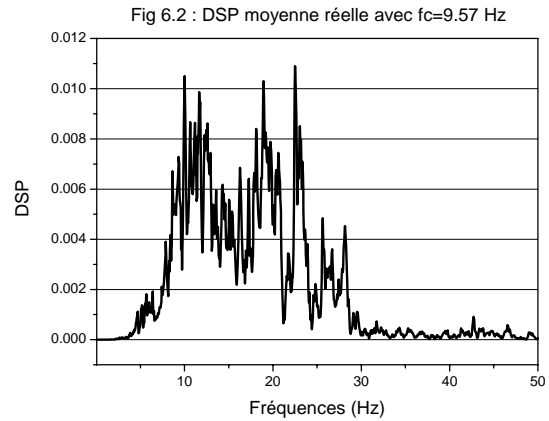
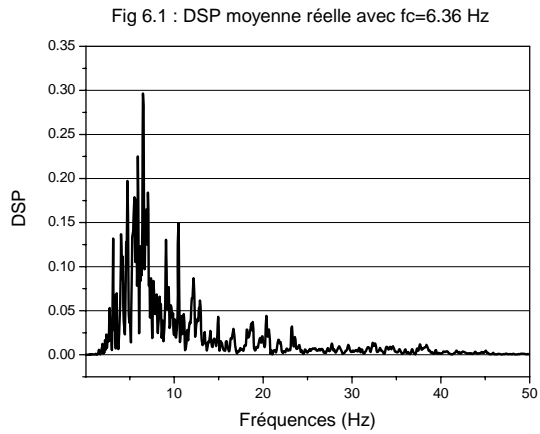
Dans la deuxième étape, le champ sismique incident est complété, pour les intervalles de fréquences autres que ceux définis précédemment, par le modèle analytique de Kanai et Tajimi. Dans ce cas, l'effet de distance est contrôlé par la fréquence du filtre. L'amortissement considéré dans le calcul est celui associé au sol ferme à rocheux, et la variation de la fréquence du sol est considérée comme résultat de l'effet de filtrage avec la distance (tableau 6.2). Pour les calculs, on définit les champs sismiques incidents en termes de fréquences fondamentales des sols étudiés, correspondant aux valeurs maximales des fonctions de transfert moyennes calculées précédemment pour les sites S₂, S₃, et S₄.

	DSP définissant le champ sismique incident				
	Réelle	Réelle	Analytique (Kanai & Tajimi)	Analytique (Kanai & Tajimi)	Analytique (Kanai & Tajimi)
f _c ou f _g (Hz)	<i>f_c=9.57</i>	<i>f_c=6.36</i>	<i>f_g=4.5</i>	<i>f_g=3.125</i>	<i>f_g=1.0</i>
Largeur de bande	<i>0.39</i>	<i>0.61</i>			
Amortissement			<i>0.6</i>	<i>0.6</i>	<i>0.6</i>

Tableau 6.2 : Champs sismiques incidents en termes de DSP réelle et analytique

Dans tous les cas, on utilise la méthode de Monté Carlo pour la simulation de 1000 accélérogrammes synthétiques comme sollicitations à partir des DSP des champs incidents, et 1000 réponses sismiques à partir des DSP résultants de la convolution via les fonctions de transfert calculées précédemment.

Ainsi, 1000 coefficients de site sont calculés par le rapport $PGA_{\text{surf}}/PGA_{\text{base}}$. On déduit alors le coefficient de site moyen et son écart type pour chaque champ incident et pour chaque site (tableaux 6.3 à 6.7).



Les coefficients de site calculés via l'analyse statistique ont été comparés, à titre de validation, avec ceux calculés par une méthode probabiliste basée sur la théorie des vibrations aléatoires. On définit dans le domaine fréquentiel l'intensité moyenne ou l'écart type du champ sismique incident par :

A la base :
$$\lambda_0^b = \int_0^{\omega_n} G(\omega) d\omega \quad (6.5)$$

En surface :
$$\lambda_0^s = \int_0^{\omega_n} G(\omega) |H(\omega)|^2 d\omega \quad (6.6)$$

avec :

$$G(\omega) = \frac{1}{\pi T_d} C_n^2(\omega) \quad (6.7)$$

$$\omega_n = \frac{\pi}{\Delta t}$$

- T_d : Durée du mouvement
- $G(\omega)$: DSP réelle ou analytique (K & T)
- $H(\omega)$: La fonction de transfert moyenne calculée précédemment pour chaque site
- C_n : Amplitude de Fourier
- ω_n : Fréquence de Nyquiste définie comme étant la fréquence maximale dans le spectre de Fourier
- Δt : Pas temporel

D'après la théorie des vibrations aléatoires, la réponse maximale X_{max} est donnée par :

A la base :
$$X_{max}^b = \lambda_0^b \cdot p^b \quad (6.8)$$

En surface :
$$X_{max}^s = \lambda_0^s \cdot p^s \quad (6.9)$$

Avec p : facteur de pic.

En utilisant cette approche, et en considérant $p^p = p^s$, le coefficient de site peut se calculer à l'aide de la formule suivante :

$$C_s^p = \frac{X_{max}^s}{X_{max}^b} = \frac{\lambda_0^s}{\lambda_0^b} \quad (6.10)$$

Les résultats obtenus sont comme suit :

Type de sol	C_S moyen	$C_S+1\sigma$
S ₂	1.69	1.94
S ₃	2.02	2.32
S ₄	1.37	1.58

Tableau6.3 : Coefficients de sites moyens dans le cas $f_c=9.57$ Hz

Type de sol	C_S moyen	$C_S+1\sigma$
S ₂	1.6	1.85
S ₃	2.43	2.82
S ₄	2.13	2.48

Tableau 6.4 : Coefficients de sites moyens dans le cas $f_c=6.36$ Hz

Type de sol	C_S moyen statistique	σ	C^p_S moyen probabiliste
S ₂	1.51	0.20	1.50
S ₃	2.33	0.33	2.34
S ₄	2.19	0.31	2.26

Tableau 6.5 : Coefficients de site moyens dans le cas $f_g=4.5$ Hz

Type de sol	C_S moyen statistique	σ	C^p_S moyen probabiliste
S ₂	1.44	0.20	1.43
S ₃	2.37	0.34	2.40
S ₄	2.48	0.37	2.58

Tableau 6.6 : Coefficients de site moyens dans le cas $f_g=3.125$ Hz

Type de sol	C_S moyen statistique	σ	C^p_S moyen probabiliste
S ₂	1.19	0.18	1.16
S ₃	1.76	0.27	1.73
S ₄	2.77	0.45	2.87

Tableau 6.7 : Coefficients de site moyens dans le cas $f_g=1$ Hz

6.5 Conclusion

L'estimation statistique des coefficients de site est faite selon une analyse sismique linéaire, basée sur la convolution des fonctions de transfert moyennes définies au chapitre 4, avec les DSP modélisant les champs sismiques incidents.

Le champ sismique incident est défini à l'aide de densités spectrales expérimentales lorsque c'est possible (existence de mouvements sismiques réels) pour certains intervalles de fréquences (Figures 6.1 et 6.2), et complétés, pour les autres intervalles de fréquences, par le modèle analytique de DSP de Kanaï et Tajimi (figures 6.3 à 6.5).

DSP	Réelle	Réelle	K-T	K-T	K-T	C_S _Moy	σ
f_c, f_g (Hz)	9.57	6.36	4.5	3.125	1.0		
S ₂	<u>1.69</u>	<u>1.6</u>	<u>1.51</u>	<u>1.44</u>	<u>1.19</u>	<u>1.48</u>	<u>0,19</u>
S ₃	<u>2.02</u>	<u>2.43</u>	<u>2.33</u>	<u>2.37</u>	<u>1.76</u>	<u>2.18</u>	<u>0,28</u>
S ₄	<u>1.37</u>	<u>2.13</u>	<u>2.19</u>	<u>2.48</u>	<u>2.77</u>	<u>2.19</u>	<u>0,52</u>

Tableau 6.8 : Coefficients de site moyens

Les résultats obtenus à partir des échantillons et des champs sismiques incidents considérés montrent un coefficient de site dépendant plus du contenu fréquentiel du champ incident que du potentiel d'amplification des sites. Ainsi, pour les fréquences supérieures ou égales à 4 Hz, le coefficient du site S_3 est le plus important comparé aux autres sites, en particulier, au site le plus mou S_4 . Pour les fréquences inférieures à 4 Hz, c'est le coefficient du site S_4 qui est le plus important. Enfin, jusqu'à 5 Hz, le coefficient du site S_2 est le moins important, et dépasse celui du site S_4 pour des fréquences au-delà de 5 Hz.

Le calcul d'un coefficient de site moyen met en évidence une grande dispersion des valeurs autour de cette valeur moyenne. Cette dispersion augmente depuis le site S_2 pour atteindre une valeur très importante pour le site S_4 en passant par le site S_3 .

Ainsi, considérer un coefficient de site moyen induit selon les cas soit une surestimation soit une sous estimation de l'action sismique. Si pour les sites S_2 et S_3 l'ordre de grandeur de l'écart type est raisonnable, dans le cas du site S_4 , la notion de coefficient e site moyen perd de son sens tellement l'écart type est important.

CHAPITRE 7

ELABORATION DES SPECTRES DE REPONSE

7. Elaboration des spectres de réponse

7.1 Introduction

Il est bien connu qu'en génie civil, la représentation d'un séisme par un accélérogramme n'est pas couramment utilisée. Bien que cette représentation décrit complètement le mouvement sismique, l'analyse temporelle d'une structure par rapport à un séisme réel nécessite des moyens et un temps de calcul considérables, de plus, elle s'affranchit difficilement du caractère particulier du choix d'un accélérogramme. La notion la plus répandue pour représenter un séisme en ingénierie sismique est le spectre de réponse d'oscillateurs linéaires. Le spectre de réponse en accélération, vitesse ou déplacement met en évidence le contenu fréquentiel d'un mouvement sismique. Il fournit la réponse maximale d'oscillateurs linéaires élastiques soumis à un séisme.

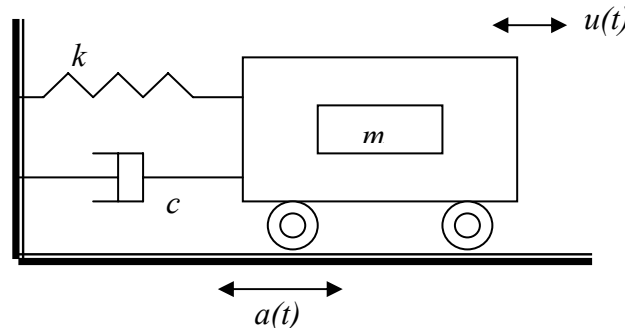


Figure 7.1 : Oscillateur élastique à 1 ddl

Pour un oscillateur de masse m , de raideur k et d'amortissement c , soumis à une excitation sismique représentée par son accélérogramme $a(t)$, le principe fondamental de la dynamique s'écrit :

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = ma(t) \quad (7.1)$$

où $u(t)$ représente le déplacement relatif de l'oscillateur par rapport à son support.

En posant :

$\omega_n = \frac{k}{m}$ $\xi = \frac{c}{2m}$ $\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$, la réponse de l'oscillateur, connue sous le nom d'intégrale de Duhamel, a pour expression :

$$u(t) = -\frac{1}{\omega_D} \int_0^t a(\tau) e^{-\xi\omega_D(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (7.2)$$

Le maximum de cette réponse constitue l'ordonnée d'un point du spectre en déplacement ayant pour abscisse la fréquence propre ou la pulsation propre de l'oscillateur.

Le tracé du spectre est obtenu par le calcul du maximum de la réponse en faisant varier, progressivement, la pulsation propre de l'oscillateur. Le spectre de réponse en pseudo accélération est déduit de la relation :

$$a_{max} = \omega_n^2 d_{max} \quad (7.3)$$

La pseudo accélération constitue une bonne approximation du maximum du module de l'accélération absolue de l'oscillateur pour les amortissements faibles utilisés dans la pratique.

Par ailleurs, la résolution de l'équation (7.1) peut se faire dans le domaine fréquentiel. En appelant $h(t)$ la réponse impulsionnelle d'un système linéaire et $a(t)$ l'excitation à l'entrée, la réponse du système considéré s'écrit :

$$u(t) = \int_0^{\infty} h(\tau) a(t - \tau) d\tau \quad (7.4)$$

L'équation (7.4) représente un produit de convolution qui peut se transformer en produit simple en substituant aux expressions temporelles leurs transformées de Fourier. Pour l'oscillateur représenté dans la figure 7.1, la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle s'écrit :

$$H(i\omega) = \frac{-1}{(\omega_n^2 - \omega^2) + 2i\xi\omega\omega_n} = \frac{U(i\omega)}{A(i\omega)} \quad (7.5)$$

avec $U(i\omega)$ et $A(i\omega)$ les transformées de Fourier respectivement du déplacement relatif de l'oscillateur $u(t)$ et de l'excitation $a(t)$.

Cette fonction représente la fonction de transfert entre le déplacement relatif du système et l'accélération du support. Le calcul de la réponse de l'oscillateur s'effectue dans le domaine fréquentiel par l'évaluation du simple produit $H(i\omega)A(i\omega)$. Le maximum de la transformée de Fourier inverse de cette réponse constitue l'ordonnée d'un point du spectre en déplacement ayant pour abscisse la fréquence propre ou la période propre de l'oscillateur.

7.2 Spectres de réponse réglementaires

Les spectres réglementaires ne sont pas construits théoriquement à partir d'un enregistrement. Ils sont généralement obtenus en prenant la moyenne parfois augmentée d'un écart type, sur un ensemble d'oscillateurs élastiques simples, soumis à une grande quantité de séismes compatibles avec une catégorie de sols préalablement définie. Une grande quantité de séisme suppose l'existence d'une base d'enregistrements représentatifs, nombreux et diversifiés, ce qui n'est pas

toujours le cas. La notion de processus aléatoire, est finalement, mieux adaptée. L'ensemble des accélérogrammes susceptibles de se produire en un site donné peut être défini par un processus aléatoire caractérisé par sa densité spectrale de puissance. Un accélérogramme se considère alors comme une réalisation d'un processus aléatoire.

7.3 Construction des spectres de réponse moyens

Dans le chapitre précédent, nous sommes arrivés à la caractérisation des sites réglementaires du RPA99 (ver 2003) par des coefficients de sites. Ces sites ont été, préalablement, caractérisés par des fonctions de transfert moyennes. Dans le présent chapitre, nous essayons de reprendre les résultats obtenus précédemment pour construire les spectres de réponse moyens en pseudo accélération, pour les sites S_2 , S_3 et S_4 .

La démarche consiste à calculer, en premier lieu, le spectre de réponse moyen en pseudo accélération pour chaque site et pour chaque champ sismique incident utilisé, c'est-à-dire, deux champs sismiques incidents expérimentaux, constitués d'accélérogrammes synthétiques simulés en surface à partir de DSP expérimentales réelles, et trois champs sismiques incidents analytiques, formés d'accélérogrammes simulés en surface, à partir d'un bruit blanc filtré selon le modèle analytique de et Tajimi. Dans les deux cas, on calcule la réponse spectrale maximale en accélération par l'intégrale de Duhamel.

Ainsi, pour chaque champ incident, les 1000 accélérogrammes déjà calculés sont normalisés puis injectés dans un oscillateur élastique à 1 ddl, pour lequel on fait varier, progressivement, la fréquence fondamentale. 1000 réponses temporelles sont alors obtenues, ce qui permet de faire ressortir, pour chaque fréquence considérée, 1000 réponses spectrales maximales. Le spectre moyen et son écart type s'obtiennent en calculant la moyenne de toutes les réponses spectrales maximales sur toute la plage de fréquences considérée. Les spectres moyens et enveloppes sont illustrés dans les figures 7.1 à 7.8.

Sol ferme (S₂) :

Fig 7.2 : Pseudo spectre d'accélération ($\xi=5\%$)
DSP Kanai & Tajimi - fg=4.5 Hz

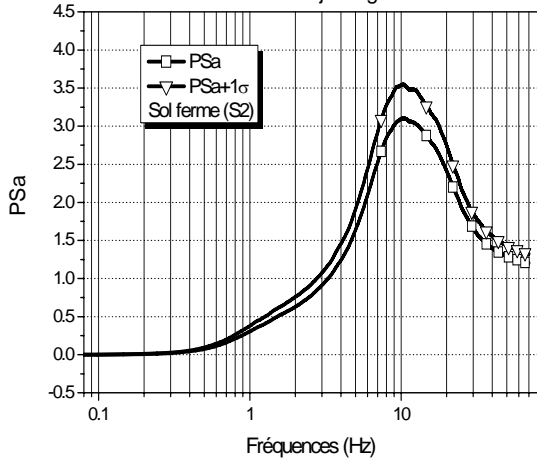


Fig 7.3 : Pseudo spectre d'accélération ($\xi=5\%$)
DSP Kanai & Tajimi - fg=3.125 Hz

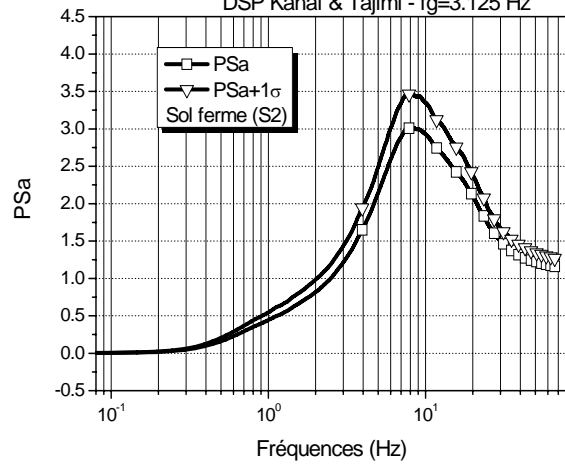


Fig 7.4 : Pseudo spectre d'accélération ($\xi=5\%$)
DSP Kanai & Tajimi - fg=1 Hz

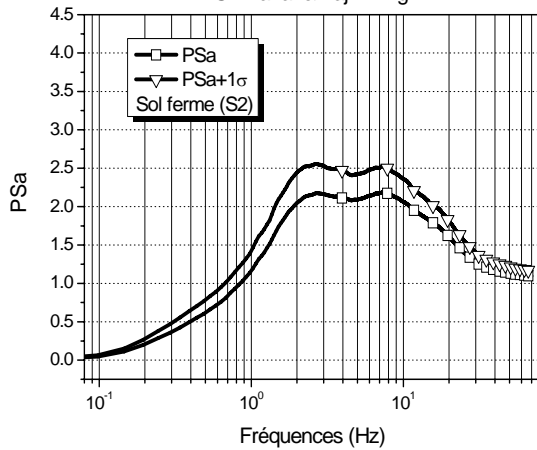


Fig 7.5 : Pseudo spectre d'accélération ($\xi=5\%$)
DSP réelle fc=6.36 Hz

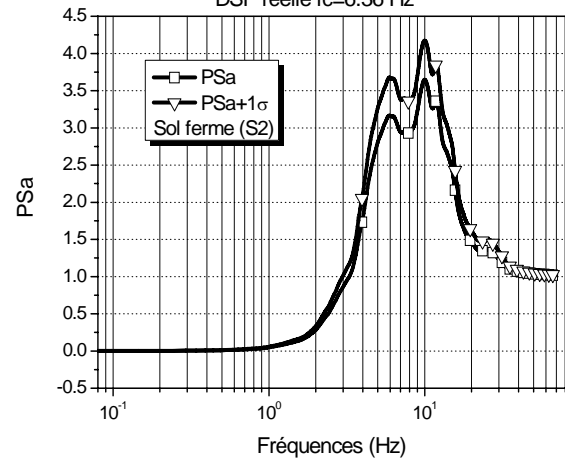


Fig 7.6 : Pseudo spectre d'accélération ($\xi=5\%$)
DSP réelle fc=9.57 Hz

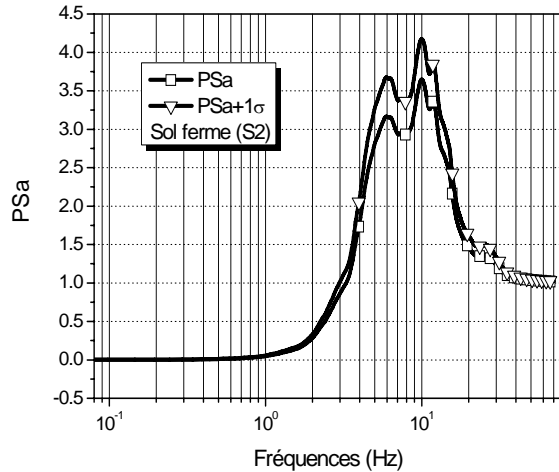
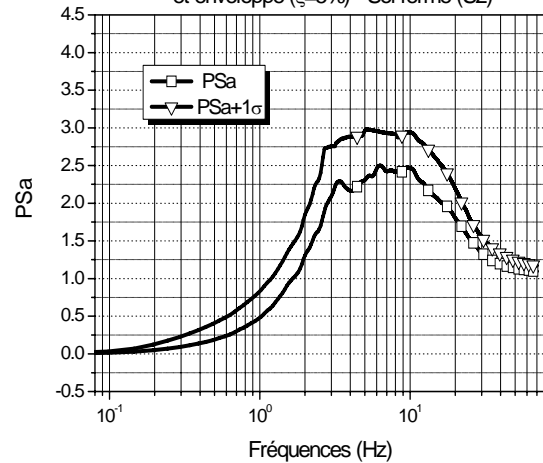
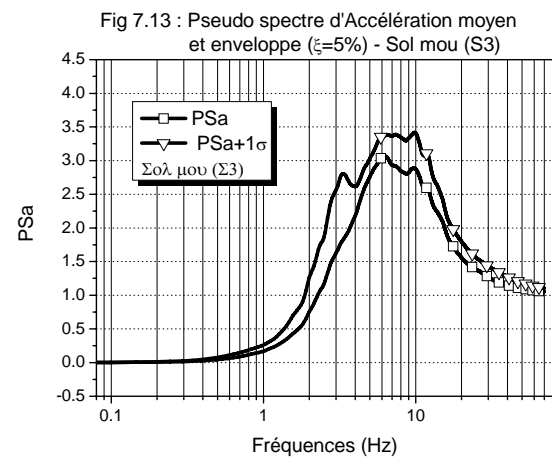
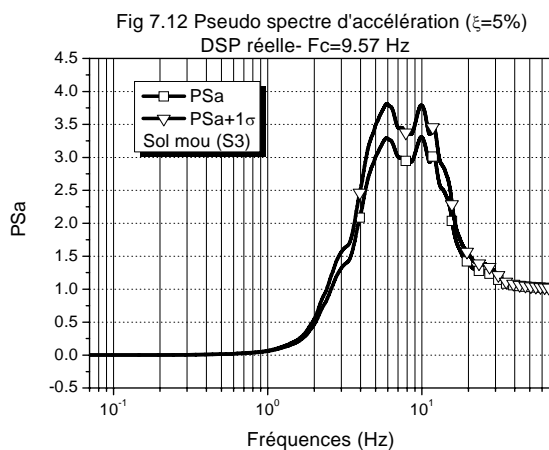
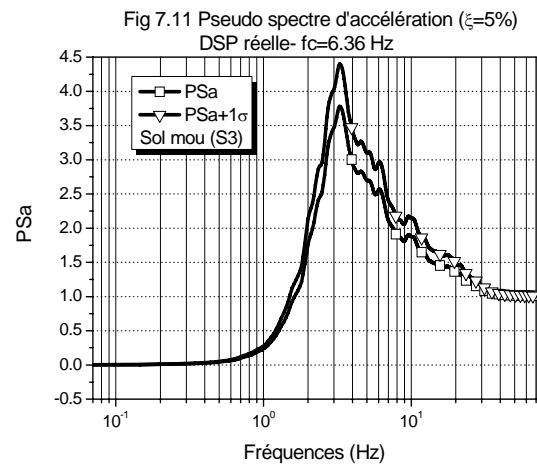
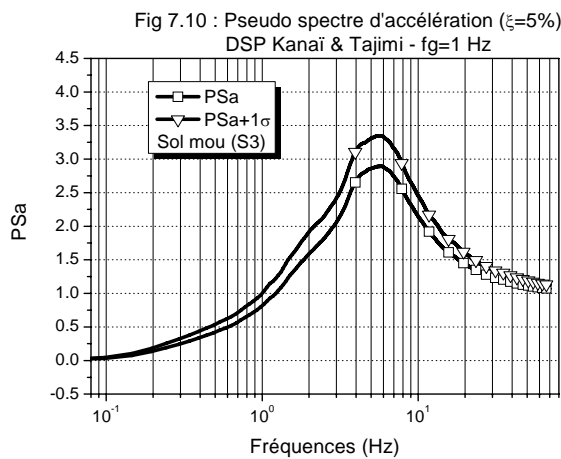
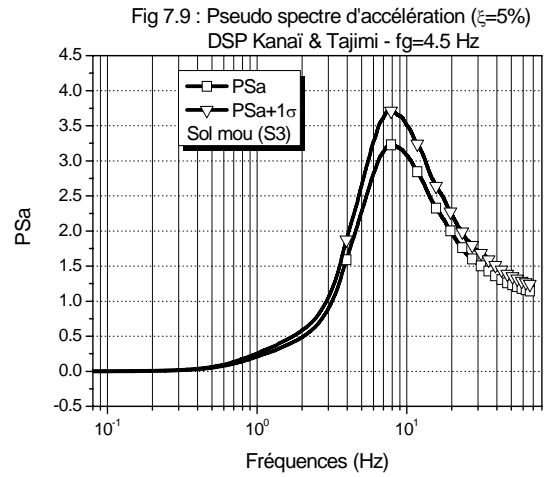
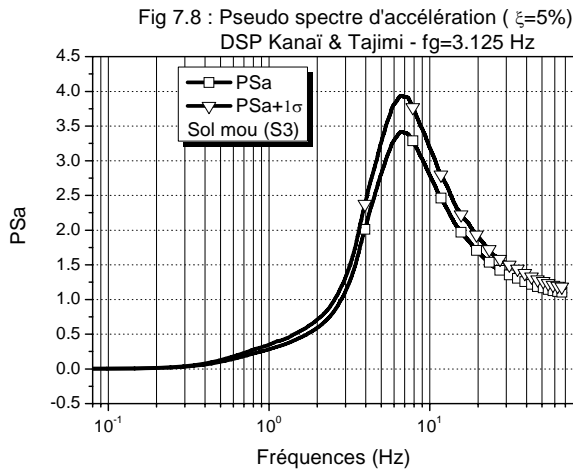


Fig 7.7 : Pseudo Spectre d'Accélération moyen
et enveloppe ($\xi=5\%$) - Sol ferme (S2)



Pour le sol S₂, le palier amplificateur se manifeste sur une plage de fréquences importante, allant de 2 à 20 Hz (figure 7.6). De plus, le spectre enveloppe présente un écart de 20% par rapport au maximum calculé pour le spectre moyen.

Sol mou (S₃) :



Le sol S₃ (figure 7.12), montre une palier amplificateur plus étroit par rapport au site S₂, du au filtrage des hautes fréquences.

Sol très mou (S₄) :

Fig 7.14 : Pseudo spectre d'accélération ($\xi=5\%$)
DSP Kanai & Tajimi - fg=1 Hz

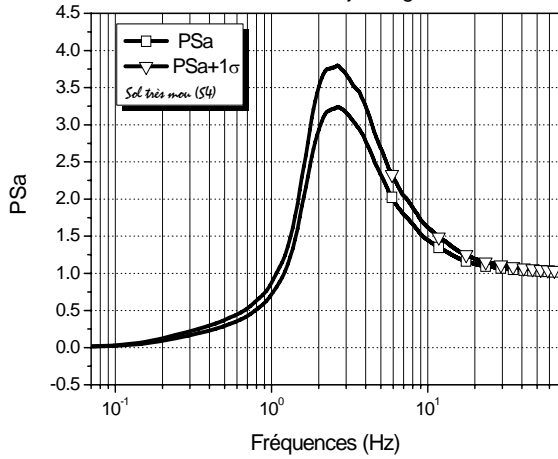


Fig 7.15 : Pseudo spectre d'accélération ($\xi=5\%$)
DSP Kanai & Tajimi - fg=3.125 Hz

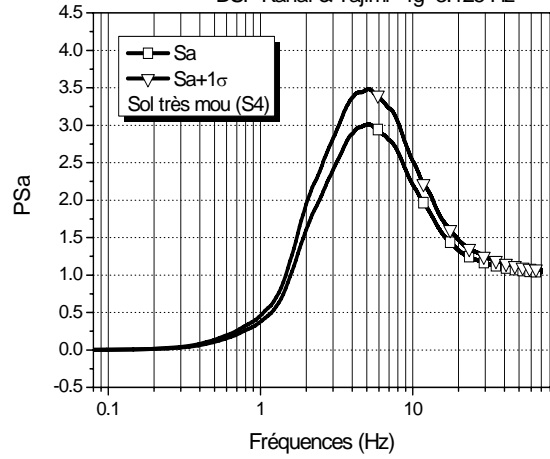


Fig 7.16 : Pseudo spectre d'accélération ($\xi=5\%$)
DSP Kanai & Tajimi - fg=4.5 Hz

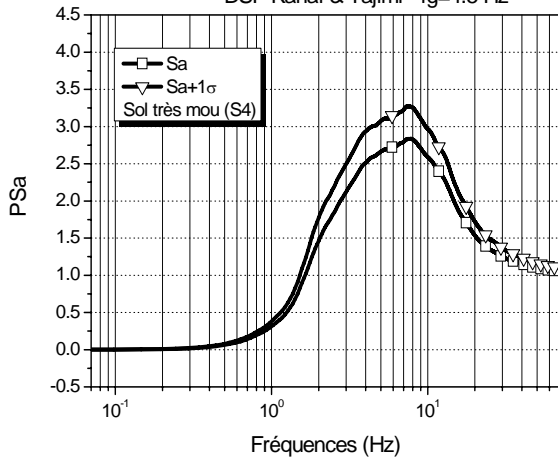


Fig 7.17 : Pseudo spectre d'accélération ($\xi=5\%$)
DSP réelle - fc=6.36 Hz

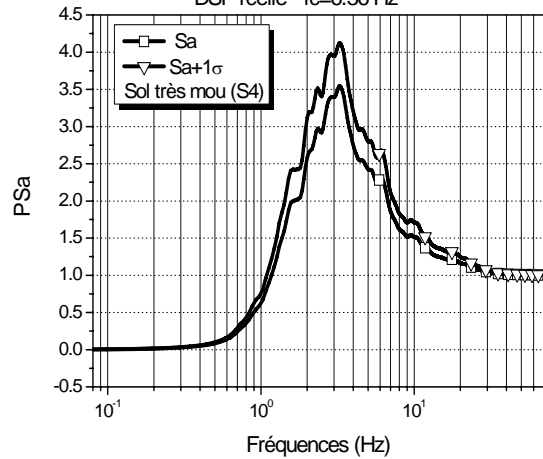


Fig : 7.18 Pseudo spectre d'accélération ($\xi=5\%$)
DSP réelle - fc=9.57 Hz

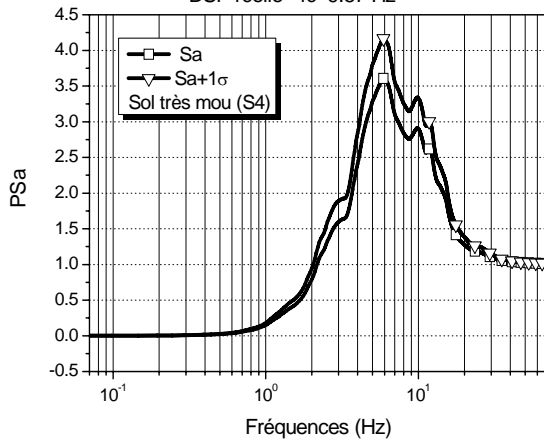
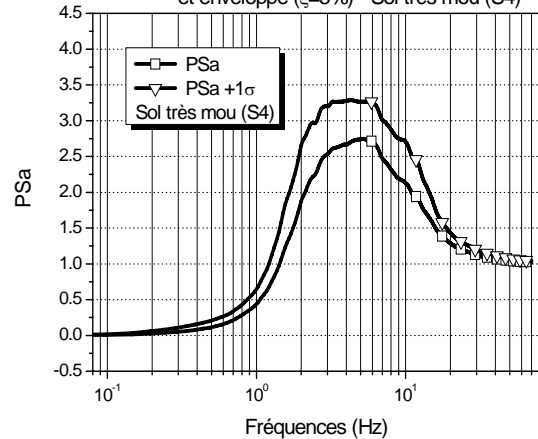
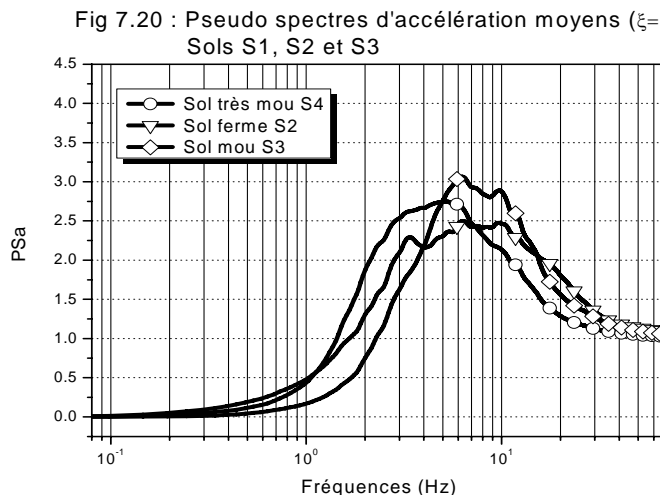


Fig 7.19 : Pseudo spectre d'accélération moyen
et enveloppe ($\xi=5\%$) - Sol très mou (S₄)



Pour le sol S₄, le palier d'amplification est plutôt riche en basses fréquences (figure 7.18). Pour ce site aussi, l'écart observé par rapport au spectre moyen est de l'ordre de 15% environ. Pour tous les spectres moyens calculés, les valeurs spectrales tendent vers la valeur unité au droit des fréquences supérieures. Les accélérogrammes utilisés étant normalisés à 1.



Les spectres représentés ci-dessus ont été élaborés à partir d'accélérogrammes normalisés à 1, c'est-à-dire, exempts d'effets d'amplification. L'intégration de ces effets se fait à travers la combinaison des spectres moyens aux coefficients de site déjà calculés. Les résultats représentent des spectres de réponse moyens en accélération, qui tiennent compte des caractéristiques particulières relatives à chaque site réglementaire, notamment, en terme de potentiel d'amplification et de gamme de fréquences correspondante. Les spectres obtenus pour chaque site sont présentés dans les figures 7.20 à 7.22.

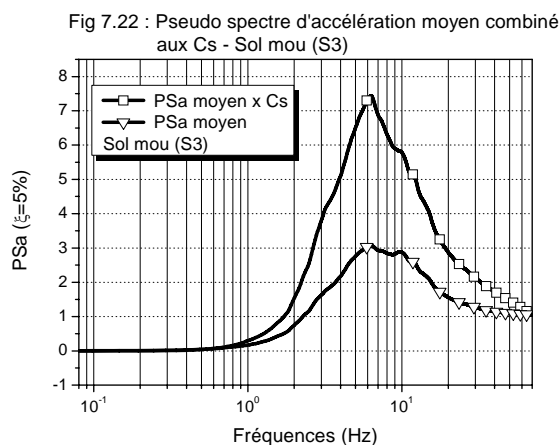
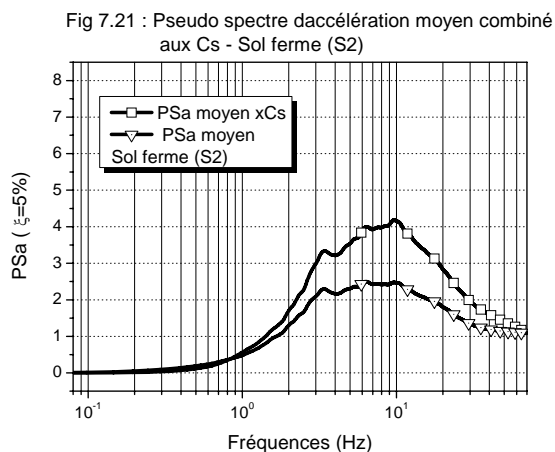


Fig 7.23 : Pseudo spectre d'accélération moyen combiné aux Cs - Sol très mou (S4)

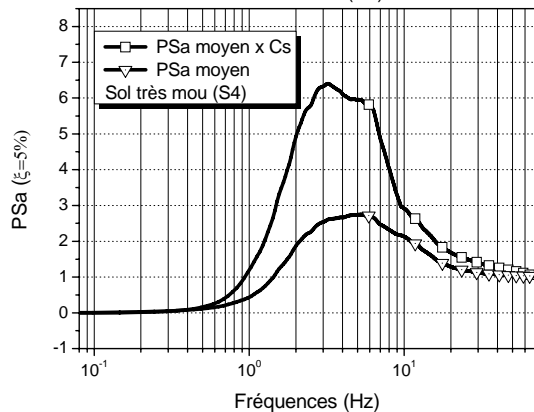
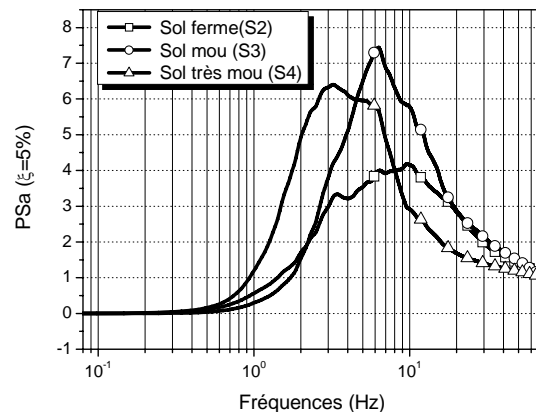


Fig 7.24 : Pseudo spectres d'accélération moyens combinés aux coefficients de site



Ainsi, le spectre moyen combiné au coefficient de site relatif au sol S_2 dénote un pouvoir amplificateur se manifestant à partir de 2 Hz jusqu'aux fréquences supérieures à 30 Hz, avec l'apparition d'une accélération spectrale maximale au droit de 10 Hz (figure 7.20). Le spectre montre aussi que le sol continue à produire une amplification non négligeable même pour des fréquences supérieures.

Le sol S_3 étudié fait montre, à travers son spectre d'accélération combiné au coefficient de site correspondant, d'un potentiel d'amplification sur une plage de fréquences plus rétrécie (figure 7.21), allant de 2 à 20 Hz. Evidemment, nous sommes passés à un sol avec des compétences mécaniques inférieures par rapport au sol S_2 . Cependant, le sol étudié présente un taux d'amplification très important d'une valeur de 7.5 à 6 Hz. Ceci reflète la valeur importante du coefficient de site calculé pour ce site, et met en évidence la non prise en compte de la non linéarité.

Un calcul non linéaire (ou linéaire équivalent) est susceptible, pour ce type de sol, de rabattre le niveau important d'amplification. Par ailleurs, même au-delà de 20 Hz, le sol continue à donner des valeurs d'accélération importantes.

Le sol S_4 étudié montre un pouvoir amplificateur sur un intervalle de fréquences plus étroit par rapport aux autres sites (figure 7.22). Ce pouvoir amplificateur apparaît à partir des fréquences supérieures à 1 Hz, et se maintient jusqu'à une fréquence de 10 Hz. La valeur spectrale maximale est donnée pour une fréquence de 3 Hz. On remarque bien un décalage vers les basses fréquences de la valeur spectrale maximale à chaque fois qu'on passe d'un site rigide à un autre moins rigide, en commençant par le site S_2 jusqu'au site S_4 .

7.4 Analyse comparative avec les spectres réglementaires du RPA99

7.4.1 Introduction

Depuis le séisme d'El Asnam (1980), de nombreux travaux de recherche ont été menés dans le but d'atténuer les effets de séismes sur les constructions. Les anciennes règles parasismiques algériennes connues sous le nom de RPA88, préconisent deux méthodes pour le calcul dynamique des structures : la méthode statique équivalente et la méthode dynamique approchée. Depuis 1999, des nouvelles règles parasismiques ont été élaborées sur le modèle américain, elles sont connues sous le nom de RPA99. Elles proposent une méthode dynamique modale spectrale, en plus de la méthode statique équivalente. Selon les RPA99, les sites sont classés en quatre catégories, en fonction des propriétés des sols qui les constituent. Chaque catégorie de site est caractérisée par deux périodes de vibration T_1 et T_2 . A chaque type de site est associé un spectre de réponse élastique calculé en fonction des caractéristiques du site considéré.

7.4.2 Spectres de réponse selon les RPA99 (ver 2003)

Les RPA99 proposent quatre catégories de sites en fonction des propriétés mécaniques des sols les constituant qui sont données comme suit :

- Site rocheux (S_1) caractérisé par une vitesse de propagation des ondes de cisaillement ≥ 800 m/s
- Site ferme (S_2) caractérisé par une vitesse de propagation des ondes de cisaillement ≥ 400 m/s à partir de 10 m de profondeur
- Site meuble (S_3) caractérisé par une vitesse de propagation des ondes de cisaillement ≥ 200 m/s à partir de 10 m de profondeur
- Site très meuble (S_4) caractérisé par une vitesse de propagation des ondes de cisaillement ≤ 200 m/s sur les premiers 20 m.

Les périodes caractéristiques T_1 et T_2 sont données dans le tableau 7.1.

Sites	S_1	S_2	S_3	S_4
T_1 (sec)	0.15	0.15	0.15	0.15
T_2 (Sec)	0.30	0.40	0.50	0.70

Tableau 7.1 : Périodes caractéristiques des sites du RPA99 (ver 2003)

Les RPA99 associent à chaque catégorie de site un spectre de réponse en accélération, en considérant les périodes caractéristiques du tableau 7.1. La forme du spectre élastique normalisé en accélération en fonction de la période T , se calcule à l'aide des relations suivantes :

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25A(1 + T/T_1(2.5\eta(Q/R) - 1)) & \text{pour } 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(1.25A)(Q/R) & \text{pour } T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A)(Q/R)(T_2/T)^{2/3} & \text{pour } T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta(1.25A)(T_2/3)^{2/3}(3/T)^{5/3}(Q/R) & \text{pour } T > 3.0s \end{cases} \quad (7.6)$$

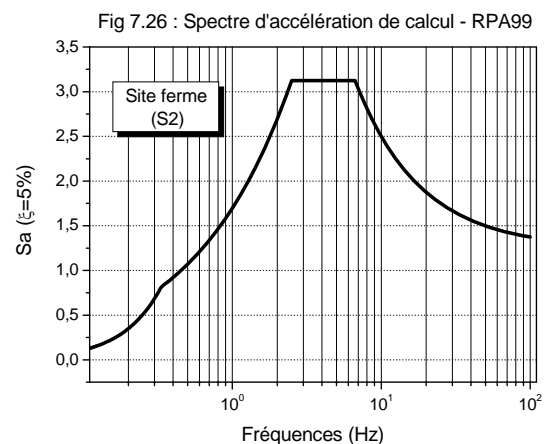
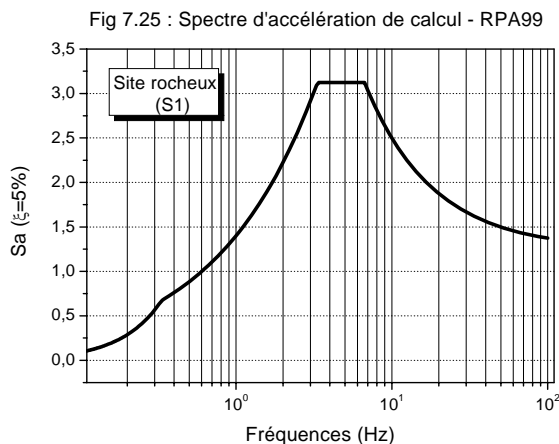
avec

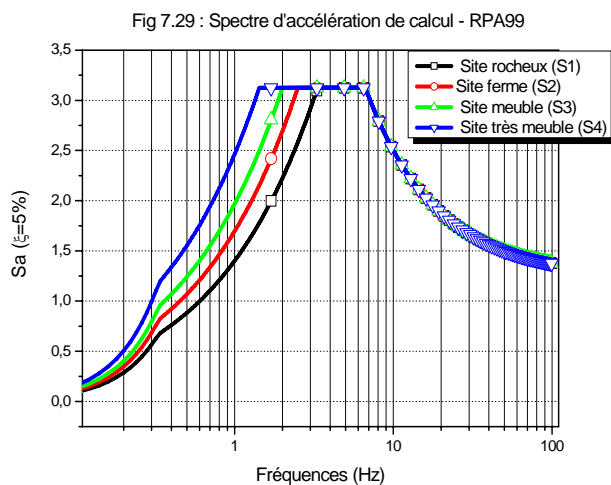
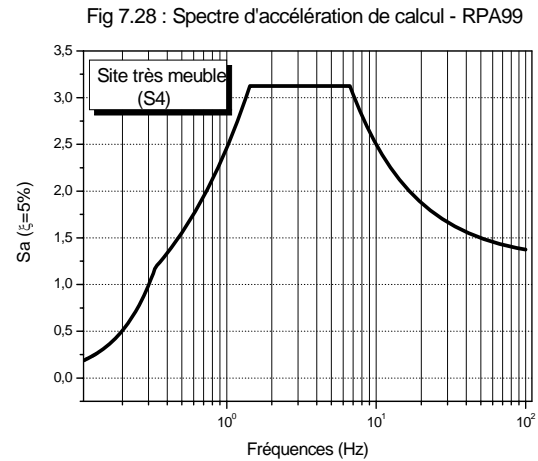
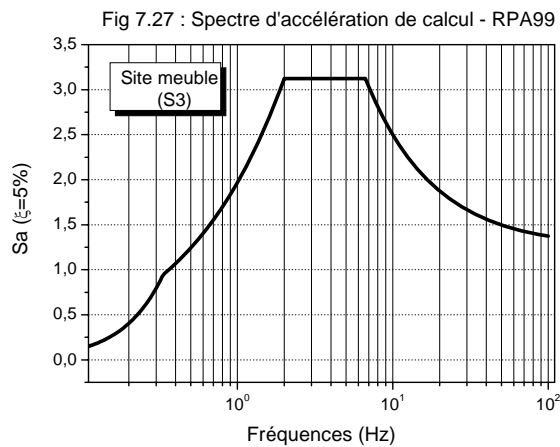
$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2 + \xi}} \geq 0.7 : \text{Coefficient correcteur d'amortissement si } (\xi \neq 5\%),$$

- A : coefficient d'accélération de zone,
- ξ : pourcentage d'amortissement critique,
- R : coefficient de comportement de la structure,
- Q : facteur de qualité.

La modification de l'action sismique est prise en compte par la forme du spectre de réponse. Il est indispensable alors, de connaître la nature du sol de fondation avant de choisir le spectre de réponse à utiliser dans les calculs.

Pour $A=1$, $Q=1$, $R=1$, le tracé des spectres de réponse pour les quatre catégories de sites est donné par la figure 7.24.





7.4.3 Synthèse

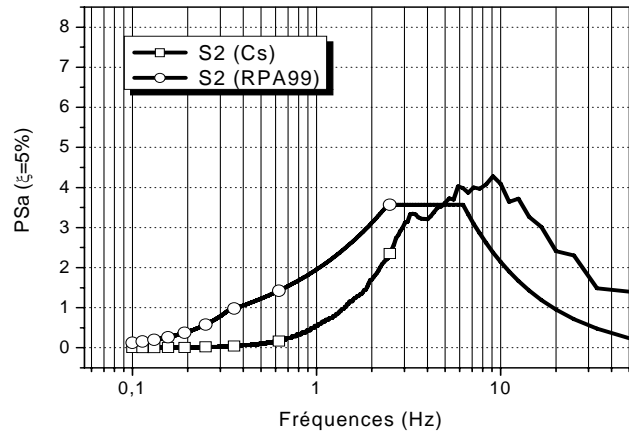
Les spectres de réponse du RPA99 comportent la même branche inclinée et le même palier horizontal dans la gamme des fréquences correspondant à l'intervalle T_1, T_2 , au droit du quel, les sols S_3 et S_4 étudiés exhibent des valeurs spectrales d'accélération très importantes (Figure 7.28).

L'observation des courbes comparatives représentant les pseudo spectres moyens calculés et ceux du RPA99, nous permet de déceler les remarques suivantes :

Site ferme S_2 :

Le spectre calculé montre que le sol étudié exhibe un pouvoir amplificateur sur une plage de fréquences relativement importante, quoiqu'un peu décalée vers les fréquences supérieures par rapport au spectre correspondant du RPA99 (figure 7.29). De plus, contrairement au spectre du RPA99, le sol étudié continue à produire un effet d'amplification non négligeable même pour des fréquences nettement supérieures.

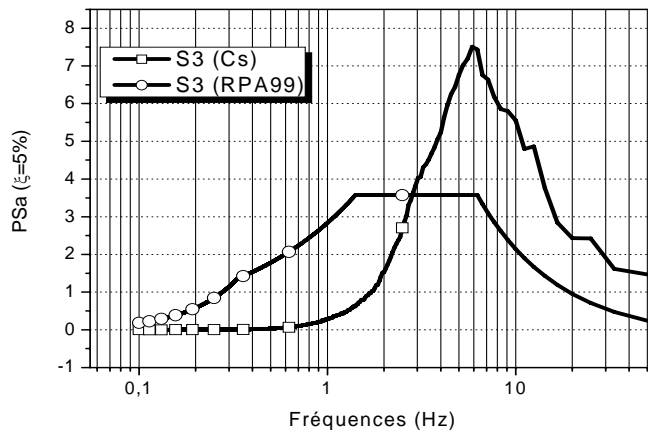
Fig 7.30 : Pseudo spectre d'accélération - Sol ferme (S2)



Site meuble_S3:

Le site S₃ étudié fait montre, à travers son spectre d'accélération, d'un potentiel d'amplification sur une plage de fréquences plus rétrécie (figure 7.30), car nous sommes passés à un sol moins consistant par rapport au sol2. Cependant, le sol étudié présente un taux d'amplification très important d'une valeur de 7.5 à 6 Hz. Ceci reflète les valeurs du coefficient de site calculé pour ce site. De plus, à partir de 3Hz, il continue à donner des valeurs d'accélération plus importantes même pour les fréquences supérieures.

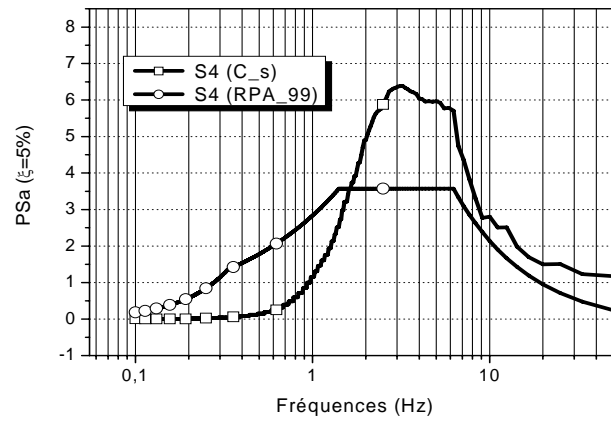
Fig 7.31 : Pseudo spectre d'accélération - Sol meuble (S3)



Site très meuble_S4 :

Le sol S₄ étudié montre un pouvoir amplificateur sur un intervalle de fréquences plus étroit par rapport aux autres sites (figure 7.31). Le spectre correspondant montre qu'à partir de 1.7 Hz environ, les valeurs de L'accélération spectrale deviennent plus importantes par rapport au spectre du RPA99.Ce résultat est à lier au coefficient de site calculé précédemment.

Fig 7.32 : Pseudo-spectre d'accélération - Sol très meuble (S4)



7.5 Comparaison avec les spectres de réponse de l'IBC_2003

L'IBC_2003 classe les sites en cinq catégories, deux types de rocher et trois types de sol de caractéristiques mécaniques décroissantes (voir tableau 2.1).

La détermination du spectre de réponse général de calcul à 5% d'amortissement passe par la connaissance de deux valeurs essentielles, à savoir, l'accélération spectrale à 5% d'amortissement pour les courtes périodes, S_s , et S_1 , qui est l'accélération spectrale à 5% d'amortissement relative à la période d'une seconde. Elles sont données en % de g dans les deux cartes d'aléa sismique propres à chaque type de périodes.

Les périodes caractéristiques relatives à chaque classe de site sont données par les relations suivantes :

$$T_0 = \frac{0.2 S_{D1}}{S_{DS}} \quad (7.7)$$

$$T_S = \frac{1 S_{D1}}{S_{DS}} \quad (7.8)$$

où

$$S_{D1} = \frac{2}{3} F_v S_1 \quad (7.9)$$

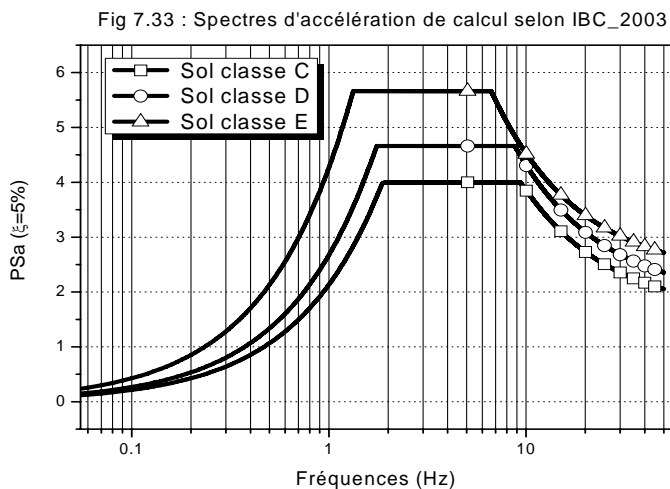
$$S_{DS} = \frac{2}{3} F_a S_s \quad (7.10)$$

Avec F_a et F_v sont, respectivement, les coefficients de sites relatifs aux courtes périodes et à la période d'une seconde (voir tableaux 2.8 et 2.9, chapitre 2).

Le spectre de calcul est donné par les relations suivantes :

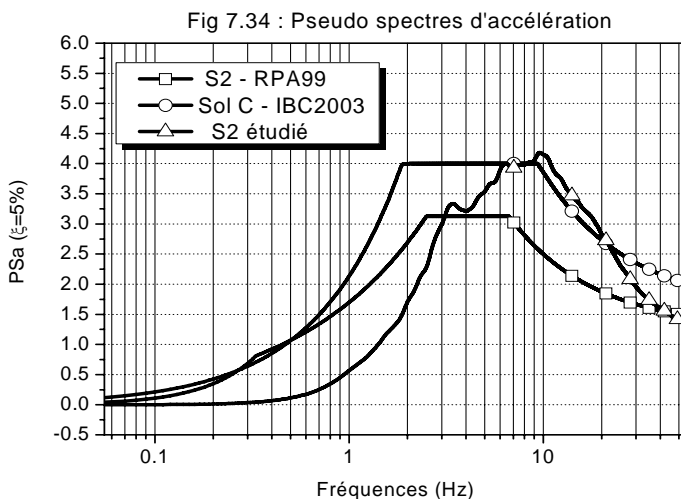
$$\begin{aligned} T \leq T_0 & \quad Sa = 0.6 \frac{S_{DS}}{T_0} T + 0.4 S_{DS} \\ T_0 \leq T \leq T_S & \quad Sa = S_{DS} \\ T > T_S & \quad Sa = S_{D1} (1/T) \end{aligned} \quad (7.11)$$

Les spectres de la figure 7.32 ont été tracés pour les classes de site C, D et E, en considérant les paramètres S_s et S_I comme ceux d'un même point géographique, dont les valeurs lues sur les deux cartes de zonage sont 50% de g et 20% de g , respectivement.

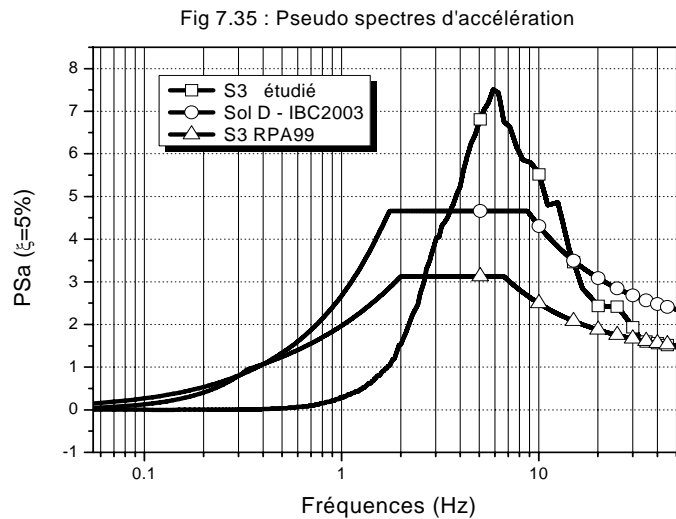


Un bref aperçu sur les spectres ainsi représentés montre que ceux-ci présentent des paliers horizontaux différents et croissants avec des plages de fréquences plus étendues par rapport aux spectres du RPA99. Par ailleurs, l'intégration des coefficients de sites dans les formules de calcul des spectres explique que ces derniers prennent bien en considération le potentiel amplificateur de chaque classe de site.

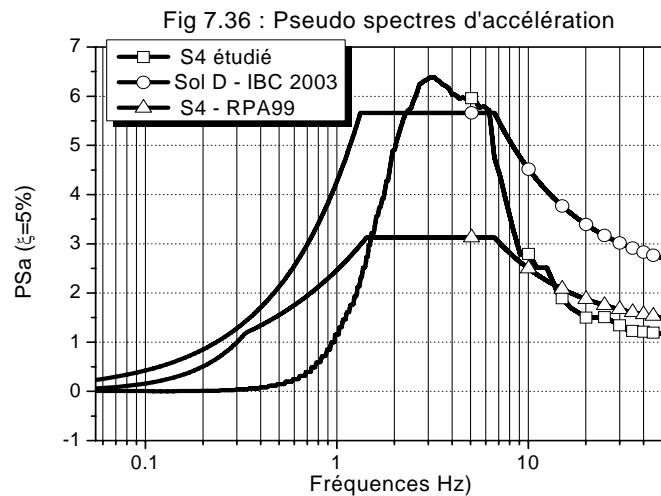
Pour le sol ferme S_2 (figure 7.33), on remarque qu'à partir de 6 Hz, le spectre calculé cadre bien avec celui de l'IBC_2003 en terme de niveau maximal d'amplification. Pour les basses fréquences ($f < 6\text{Hz}$), l'écart constaté peut être du à l'effet de moyenne faite sur les cinq champs sismiques incidents.



Le sol S₃ (étudié) présente un niveau d'amplification maximal nettement supérieur à celui de l'IBC_2003 (figure 7.34). Ceci est dû au fait que pour ce cas précis, le coefficient de site calculé est dépendant beaucoup plus du contenu fréquentiel du champ sismique incident que du potentiel d'amplification du site lui-même. Cet écart peut être expliqué aussi par la non prise en compte du comportement non linéaire du site qui a pour conséquence d'atténuer considérablement cette amplification.



Pour le sol S₄ (étudié), le spectre calculé a un niveau d'amplification maximal comparable à celui de l'IBC_2003 (figure 7.35) à partir de $f = 2$ Hz. Pour les fréquences inférieures, la remarque faite pour le site S₂ est valable.



7.6 Conclusion

De ce qui précède, il a été clairement observé à travers les trois spectres des sols étudiés, que l'action sismique est considérablement modifiée par la nature du site dans la gamme des hautes fréquences, en particulier, pour le sol S_2 . Choisir le spectre de réponse correspondant en fonction du site dans le calcul des structures rigides, par exemple, pourrait ne pas adapter du tout

celui-ci à la nature du sol. De plus, contrairement à l'IBC_2003, la période caractéristique T_I associée aux différentes catégories de sites est la même.

Par ailleurs, les spectres de réponse élastiques des règles parasismiques Algériennes RPA99 font ressortir des coefficients de site pour des fréquences très basses pour le site S_4 ($f < 1.4$ Hz) à basses pour S_3 ($f < 2$ Hz) et S_2 ($f < 2.5$ Hz). Dans tous les cas, à partir de 3 Hz environ, C_S est égale à 1 pour l'ensemble des sites, ce qui est en désaccord avec les spectres étudiés ou ceux de l'IBC_2003.

CHAPITRE 8

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

8. CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

L'étude que nous avons menée, dans le cadre de ce mémoire de magistère, s'achève avec la concrétisation de trois objectifs essentiels.

Premièrement, nous avons proposé une alternative pour la caractérisation des sites réglementaires (S_2 , S_3 , S_4) à travers la proposition de fonction de transfert moyenne pour chaque site, moyennant une approche de simulation numérique combinée à une analyse statistique.

La démarche consiste à simuler, pour chaque site, un échantillon de profils de sols dans le respect des exigences réglementaires en matière de limitations imposées aux profils de vitesse, puis faire un calcul déterministe de la fonction de transfert moyenne et effectuer des statistiques sur les résultats obtenus, en vue de déterminer les grandeurs moyennes y afférentes.

Actuellement, la caractérisation des sites réglementaires du RPA99 est faite d'une façon indirecte via des spectres de réponse, puisque ces derniers reproduisent les réponses maximales des structures modélisables par des oscillateurs simples. Il faut savoir que la fonction de transfert permet de caractériser directement et entièrement le profil de sol, vu qu'elle nous indique ses fréquences de vibration et son potentiel d'amplification, ce que le spectre de réponse est incapable de fournir. De ce fait, en plus de caractériser le sol, elle permet de choisir le spectre adéquat pour le calcul, et encore mieux, permet d'orienter le type de structure à bâtir.

Les fonctions de transfert moyennes obtenues pour chacun des sites réglementaires montrent aussi bien les niveaux d'amplification que les plages de fréquences où ces amplifications se manifestent. Il ressort que les sols très mous amplifient plus, dans les basses fréquences, que les sols mous et que les sols fermes montrent une amplification faible, dans une gamme de fréquences large, mais non négligeable.

Les résultats obtenus sont d'une grande importance puisque cela donne une dimension nouvelle aux résultats des prospections géophysiques. Ces dernières permettent, en fait, de calculer les fonctions de transfert des sites qu'elle prospectent et peuvent, désormais, classer les sols objet d'étude en comparant leur résultat avec les fonctions de transfert obtenues à partir des sites réglementaires S_1 , S_2 , S_3 et S_4 .

Deuxièmement, nous avons développé une méthode basée sur un concept stochastique pour l'estimation des coefficients de sites qui représentent des paramètres très importants pour quantifier les effets de site.

Pour cela, nous avons simulé plusieurs champs sismiques incidents que nous avons utilisés comme input sismique pour solliciter les différents sites étudiés. Ces champs sismiques sont définis à l'aide de densités spectrales de puissance expérimentales pour certaines plages de fréquences, et complétés, pour les autres plages de fréquences, par un modèle analytique de DSP (modèle de Kanai et Tajimi). L'estimation statistique des coefficients de sites est faite via une analyse sismique linéaire qui consiste en la convolution des fonctions de transfert moyennes calculées précédemment avec des DSP modélisant les champs sismiques incidents.

Cette méthode constitue une approche complémentaire efficace pour la quantification des effets de site, qui s'ajoute aux méthodes expérimentales. De plus, outre le fait qu'elle ne considère que le cas linéaire, elle instaure une bonne méthodologie et incite à des investigations plus poussées quant à l'estimation des effets de site et leur prise en compte dans les codes parasismiques réglementaires.

Troisièmement, nous avons calculé, sur la base des résultats obtenus, les spectres de réponse moyens et enveloppes en accélération pour chaque site, qui ont permis, en les comparant aux spectres algériens et américains, de déceler des écarts tant sur le plan niveau d'amplification que celui de l'intervalle de fréquences. Ceci constitue une préoccupation par rapport à la prise en compte efficace des effets de site.

Finalement, nous proposons, à titre de recommandations pour cette étude, des investigations et recherches complémentaires tels que la prise en compte de la non linéarité et l'enrichissement des champs sismiques incident et leur diversification, notamment en matière d'apports expérimentaux. La simulation statistique des profils de sols peut être améliorée à travers le développement de codes de calcul pour une simulation très conséquente en terme de nombre et de type de profils.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aki, K., and Irikura, K., : *Characterization and mapping of earthquake shaking for seismic zonation*. Proceeding of the 4th International Conference on seismic zonation. August 25-29, Stanford, California, 1 (1991) 61-110.
- Andrade, J.E., and Borja, R., : *Quantifying sensitivity of local site response models to statistical variations in soil properties*. Acta Geotechnica (2006) 1:3-14.
- Andrews, D.J., : *Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size, in Earthquake Source Mechanics*. Geophysical Monograph 37 (1986) v. 6 259-267.
- Bard, P.Y., and Bouchon, M., : *The two dimensional resonance of sediment filled valleys*. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 75, n°2, pp.519-541, 1985.
- Bard, P.Y., : *Microtremor measurements : A tool for site effect estimation? Proceeding of the second international symposium of the effects of surface geology on seismic motion*. Yokohama, Japan. 3 (1998) 1251-1279.
- Bard, P.Y., Kristek, J., Moczo, P., and Riepl-Thomas J., : *Finite-difference modelling of site-effects in the Grenoble basin*. In Abstract of the IUGG 99, Birmingham, England, July (1999) 26-30.
- Benkaci, N., : *Quantification des effets de site suite au séisme de Boumerdes à partir d'enregistrements sismométriques, accélérométriques et de bruit de fond*. Mémoire de magister, USTHB 2007.
- Bonnefoy-Claudet, S., : *Nature du bruit de fond sismique : implications pour les études des effets de site*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble-France, 2004.
- Bonnet M., : *Boundary integral equation methods for solids and fluids*. Wiley & Sons Ed., ISBN 0 471 97184 7, 1999.
- Borcherdt, R.D., and Gibbs, J.F., : *Effect of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake*. Bull. Seism. Soc. Am., **66**, 467-500, 1970.
- Bouchon M., and Aki K., : *Discrete wavenumber representation of seismic source wavefields*. Bull. Seism. Soc. Am. 67, pp.259-271, 1977.
- Bouckovalas, G.D., Kouretzis, G.P., : *Stiff soil amplification effects in the 7 september 1999 Athens (Greece) earthquake*. Soil Dyn & Earthquake Eng 21 (2001) 671-687.
- Campillo, M., : *Sismogrammes synthétiques dans les milieux élastiques hétérogènes : développement méthodologique et applications*. Thèse de l'Université de Grenoble, 1986.
- Carniel, R., Barraza, F., and Pascolo, P., : *Improvement of Nakamura technique by singular spectrum analysis*. Soil Dyn & Earthquake Eng 26 (2006) 55-63.
- Chávez-García, F.J., and Bard P.Y., : *Surface ground motion modifications by the presence of a thin resistant layer. Applications to Mexico City*. In Proceeding of the 9th European Conf. Earthq. Eng., Moscow, 4B, 37-46, 1990.

- Chavez-Garcia, F. J., Sanchez, L. R., and Hatzfeld, D., : *Topographic site effects and HVSR. A comparison between observation and theory*. Bull. Seism. Soc. Am., 86, 1559-1573, 1996.
- Chávez-García, F.J., Catillo, J., and Stephenson, W.R., : *3D site-effects : a thorough analysis of a high-quality dataset*. Bull. Seism. Soc. Am. Vol.92, n°5, pp. 1941-1951, 2002.
- Clouteau, D., and Aubry, D., : *Modification of ground motion in dense urban areas*. J. Comput. Acoust., 6, 1659-1675, 2001.
- Crandall, S.H., and Mark, W.D., : *Random vibration in mechanical systems*. New York Academic Presse Inc, 1963, (266p).
- Dangla, P., : *Couplage éléments finis / équation intégrales en élastodynamique et interaction sol / structure*. Rapport des laboratoires, série MA-4, ISSN 0755-2300, 1990.
- Dobry, R., Oweis, I., and Urzua, A., : *Simplified procedures for estimating the fundamental period of a soil profile*. Bull. of the Seism. Soc. of Am. 66, pp.1293-1321, 1976.
- Eurocode8 : *Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes*. Parties : 1-1, 5. version 1998.
- Govindaraju, L., Ramana, G.V., HanumanthaRao, C., Sitharam, T.G., : *Site-specific ground response analysis*. Current science, Vol. 87, N° 10, 25 nov 2004.
- Gupta, I.D., and Trifunac, M.D., : *Defining equivalent stationary PSDF to account for non stationarity of earthquake ground motion*. Soil Dyn & Earthquake Eng 17 (1998) 89-99.
- Idriss, I.M., and Sun, J.I., : *User's manual for SHAKE91*. Center for Geotechnical Modeling , University of California, Davis.
- International Building Code (IBC), 2000, 2003 versions.
- Kanai, K., and Tanaka, T., : *Measurements of microtremor*. Bull. Earthq. Res. Inst.,Tokyo Univ., **Vol. 30**, 199-209,1954.
- Lam, N.T.K., Chandler, A.M., Wilson, J.L., and Hutchinson, G.L., : *Response spectrum predictions for potential near-field and far-field earthquake affecting Hong Kong: rock sites*. Soil Dyn & Earthquake Eng 22 (2002) 47-72.
- Langston, C.A., : *Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic P and S waves*. J. Geophys. Res., 84, 4749 – 4762, 1979.
- Laouami, N., and Nour, A., (2000), : *Analyse bibliographique des méthodes analytiques, numériques et expérimentales pour la description et l'estimation des effets de site*. Rapport interne, Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (C.G.S.), Hussein Dey, Alger.
- Laouami, N., Slimani, A., Bouhadad, Y., Chatelain, J,L and Nour, A, : *Evidence for fault-related directionality and localized site effects from strong motion recordings of the 2003 Boumerdes (Algeria) earthquake : Consequences on damage distribution and the Algerian seismic code*. Soil Dyn & Earthquake Eng, Vol. 26 (2006a) 991-1003.
- Laouami, N., Beneldjouzi, M., Slimani., A and Bahar, R., : *Quantification des coefficients de site via des simulations numériques et confrontation avec les règles parasismiques alériennes*. AFPS, 7ème Colloque National, Paris 2007 (accepté pour communication).

- Lermo J., Rodriguez, M., And Singh, S.K., : *Natural periods of sites in the valley of Mexico from microtremor measurements and strong motion data*. Earthq. Spectra, **Vol. 44**, 805 – 814, 1988.
- Lermo, J., and Chavez-Garcia, F. J., : *Site effect evaluation at Mexico city: Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records*. Soil Dyn and Earthquake Eng, **13-6** (1994) 413-423,.
- Malischewski, P., Sherbaum, F., : *Love's formula and H/V ratio (ellipticity) of Rayleigh waves*. Waves Motion, 40-1, 57-67, (2004).
- Makra, K., Chavez-Garcia, F.J., Raptakis, D., and Pitilakis, K., : *Parametric analysis of the seismic response of a 2D sedimentary valley : implication for code implementation of complex site effects*. Soil Dyn & Earthquake Eng 25 (2005) 303-315.
- Mark, W.D., : *Spectral analysis of the convolution and filtering of non-stationary stochastic processes*. Journal of Sound & Vibrations (1971) 11 (1), 19-63.
- Nakamura, Y., : *Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications*. 12th World Comity of Earthquake Engineering, Auckland., New Zeland (2000).
- New Land, D.E., : *Introduction to random vibration and spectral analysis*. Longman, London, 1986
- Nogoshi, M., and Igarashi, T., : *On the amplitude characteristics of microtremor (part 2) (in Japanese with English abstract)*. Journal of Seismological Society of Japan, **24**, 26-40, 1971.
- Nour, A., : *Investigation stochastique sur les milieux hétérogènes par la méthode des elements finis*. Thèse de Doctorat d'Etat (2004), USTHB, Alger¹.
- Paolucci, R., : *Shear resonance frequencies of alluvial valleys by Rayleigh's method*. Earthquake Spectra, 15, pp. 503-521, 1999.
- Paskalov, A., and Reese, S., : *Deteministic and probabilistic floor response spectra*. Soil Dyn & Earthquake Eng 23 (2003) 605-618.
- Pecker, A., : *Dynamique des sols*. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 1984 (264 p).
- Pires, J.A., : *Stochastic seismic response analysis of soft soil sites*. Nuclear Engineering and Design 160 (1996) 363-377.
- Pitilakis, K.D., Raptakis, D.G., and Makra, K.A., : *Site effects : recent considerations and design provisions*. 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Lisbonne, 1999.
- Preumont, A., : *Vibrations aléatoires et analyse spectrale*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, (1990), 315p.
- Priestley, M.B., : *Power spectral analysis of non stationary random process*. Journal of Sound & Vibrations (1967) (I), 86-97.
- Règlement Prasismique Algérien (RPA99) version 2003 – CGS.

- Riepl, J., Bard, P.Y., Hatzfeld, D., Papaioannou, C., and Nechtschein, S., : *Detailed Evaluation of Site Response Estimation Methods Across and Along the Sedimentary Valley of Volvi (EURO-SEISTEST)*, Bull. Seism. Soc. Am., 88, 488-502, 1998.
- Rofooei, F.R., Mobarake, A., Ahmadi, G., : *Generation of artificial earthquake records with nonstationary Kanai-Tajimi model*. Engineering Structures 23 (2001) 827-837.
- Safak, E., : *Discrete-time analysis of seismic site amplification*. Journal of engineering mechanics. July 1985/801.
- Safak, E., : *Local site effect and dynamic soil behaviour*. Soil Dyn & Earthquake Eng 21 (2001) 453-458.
- Schnabel, P.B., Lysmer, J., and Seed, H.B., : *SHAKE – a computer program for earthquake response analyses of horizontally layered sites*. Report N° EERC 72-12, University of California, Berkley.
- Seekins, L. C., Wennerberg, L., Margheriti, L., and Liu, H.P., : *Site amplification at five locations in San Francisco, California : A comparison of S waves, Coda and microtremors*. Bull. Seism. Soc. Am., 86, 627-635, 1996.
- Semblat J.F., Duval, A.M., and Dangla P., : *Numerical analysis of seismic wave amplification in Nice (France) and comparisons with experiments*. Soil Dyn and Earthquake Eng, 19 (5) (2000) 347-362,
- Semblat, J.F., Paolucci, R., and Chabert, R., : *Fundamental frequencies of alluvial basins : estimation by various modal methods*. 10th Int. Conf. on Soil Dyn and Earthquake Eng., Philadelphia, 2001a.
- Semblat, J.F., Paolucci, R., and Chabert, R., : *Resonance of alluvial basins: analysis by a simplified modal method* (in French). XV^{ème} Congrès Français de Mécanique, Nancy, France, 3-7 septembre 2001b.
- Semblat, J.F., Duval, A.M., and Dangla, P., : *Seismic site effect in a deep alluvial basin, numerical analysis by the boundary element method*. Computers & Geotechnics 29 (2002) 573-585.
- Seo K., Haile, M., Kurita K., Yamazaki K., and Nakamura, A., : *Study of site effects in Kobe area using microtremors*. Xth World Conf. Earthq. Eng., Acapulco, Elsevier Science ltd, 1996.
- Sokolov, V., Loh, C.H., and Wen, K.L., : *Site-dependent design input ground motion estimations for the Taipei area : a probabilistic approach*. Probabilistic Engineering Mechanics 16 (2001) 177-191.
- Takewaki, I., : *Resonance and critically measure of ground motions via probabilistic critical excitation method*. Soil Dyn & Earthquake Eng 21 (2001) 645-659.
- Trifunac, M.D., and Novicova, E.I., : *State of the art review on strong motion duration*. 10th World Conference on Earthquake Engineering, Vienne, Austria (1994) 131-139.
- Uniforme Building Code (UBC), 1994 & 1997 versions.
- Xiao, H.H., Dangla, P., Semblat, J.F., Kham, M., : *Modelling seismic wave propagation in the frequency domain with analytically regularized boundary integral equations*. 5th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Paris, France, 4-6 September 2002.

Zembaty, Z., and Rutenberg, A., : *Spatial response spectra and site amplification effects.* Engineering Structures 24 (2002) 1485-1496.

Zhao, J.X., : *Estimating modal parameters for a simple soft-soil site having a linear distribution of shear wave velocity.* Earthq. Eng. & Struct. Dyn. 25, pp. 163-178, 1996.