



Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Civil

Laboratoire de Génie Sismique



Thèse de Doctorat en Sciences, Génie Civil

Présentée par :

DJABALI MOHABEDDINE Hafida

Magister en Génie Civil, diplômée de l'ENP

Intitulée

Investigation de l'Amplification de Site sous Ondes Sismiques SH Obliquement Incidentes

Soutenue publiquement le 29/11/2017, devant le jury composé de :

M. BOUADALLAH	Professeur, ENP	Président
M.K BERRAH	Professeur, ENP	Directeur de Thèse
B. TILIOUINE	Professeur, ENP	Co-Directeur de Thèse
F. KHARCHI	Professeur, USTHB/MESRS	Examinatrice
A.NECHNECH	Professeur, USTHB	Examineur
D. ZENDAGUI	Professeur, Aboubakeur Belkaid de Tlemcen (UABT)	Examineur
M. HAMMOUTENE	Professeur, ENP	Invité

ENP 2017



Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Civil

Laboratoire de Génie Sismique



Thèse de Doctorat en Sciences, Génie Civil

Présentée par :

DJABALI MOHABEDDINE Hafida

Magister en Génie Civil, diplômée de l'ENP

Intitulée

Investigation de l'Amplification de Site sous Ondes Sismiques SH Obliquement Incidentes

Soutenue publiquement le 29/11/2017, devant le jury composé de :

M. BOUADALLAH	Professeur, ENP	Président
M.K BERRAH	Professeur, ENP	Directeur de Thèse
B. TILIOUINE	Professeur, ENP	Co-Directeur de Thèse
F. KHARCHI	Professeur, USTHB/MESRS	Examinatrice
A.NECHNECH	Professeur, USTHB	Examineur
D. ZENDAGUI	Professeur, Aboubakeur Belkaid de Tlemcen (UABT)	Examineur
M. HAMMOUTENE	Professeur, ENP	Invité

ENP 2017

« Lis, au nom de ton Seigneur qui a créé »

Le sait coran, Verset 1, Al Alaq

Dédicaces

A la mémoire de mes parents

A toute ma famille d'avoir supporté mon humeur tout au long de ce travail.

A ma chère Djamila pour sa présence, son soutien moral depuis le collège à ce jour.

A tous ceux qui croient en moi.

Remerciements

Tout d'abord, je remercie **DIEU** le tout puissant, de m'avoir donné santé, courage et patience tout le long de l'élaboration de cette thèse.

La présente thèse de Doctorat en Sciences a été réalisée au Laboratoire de Génie Sismique et Dynamique des Structures de l'Ecole Nationale Polytechnique à El Harrach, Alger, Algérie.

Dans ce cadre, je voudrais tout d'abord exprimer mes plus vifs remerciements et ma profonde gratitude à mes Directeurs de thèse les Professeurs **M.K BERRA** et **B. TILIOUINE** pour avoir bien voulu me proposer le présent sujet de recherche et m'encadrer pleinement durant toute la préparation de cette thèse. Ils m'ont guidée avec rigueur et fermeté et soutenue.

Je voudrais aussi remercier le professeur **M. HAMMOUTENE** pour ses conseils et sa participation active à l'aboutissement de cette thèse.

Mes remerciements vont également au Professeur **A. BOUABDALLAH**, Directeur de Laboratoire LGSDS de l'ENP qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury de cette thèse.

Je tiens également à remercier les Professeurs, **F. KHARCHI** de l'USTHB, **A. NECHNECH** de l'USTHB, **D. ZENDAGUI** de (UABT) et **M. HAMMOUTENE** de l'ENP pour avoir accepté de faire partie du jury de thèse et d'en examiner tous les aspects scientifiques et techniques. Qu'ils trouvent ici, le témoignage de ma profonde reconnaissance.

Enfin, dans le souci de n'oublier personne, que tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, que ce soit par leurs amitiés, leurs conseils ou leur soutien moral, trouvent ici dans ces quelques lignes l'expression de ma profonde gratitude.

ملخص:

(المنتشر بشكل انحرافي في حركة عكسية من خلال نماذج من التربة لزج-مرنة 2D ملخص يعرض التضخيم الزلزالي للموقع في)
لحالتين من الدراسة. اولا النتائج من تطبيق مرشحات التي تكرر لتحليل مؤقت (في وقت منفصل) لتضخيم الموقع تحت سقوط
الموجة الغير شاقولية لنموذج التحليل لطبقات أرض الموقع للمركز الثقافي في الاصنام.

قد تم مقارنتها مع الحلول الدقيقة لهذا النهج في تردد منفصل. في المرحلة الثانية تم تحليل بالتفصيل التضخيم الزلزالي للنموذج
(الساقطة والمائلة، مع SH لزج-مرن لتربة متعددة الطبقات للموقع " 500 شقة سكنية " في منطقة الاصنام، تحت الموجات)
(Thomson-Haskell. الاخذ بالاعتبار كلا النوعين من التخميد الداخلي والاشعاعي)

نتائج تحليلات حساسية آلات قياس التسارع في محاولة لتقدير التضخيم الزلزالي للموقع لحركات الدخول تحت صخر الأساس و
النتوء الصخري متأثر بتغيرات زاوية السقوط و نسب معاوقة صخر- تربة .

كلمات المفتاحية:

(، مرشحات متكررة في المجال الزمني. SH) ، تربة متعددة الطبقات. انتشار مانل للموجات (2D التضخيم الزلزالي للموقع في)
نهج منفصل في التردد، زلزال الاصنام .

Abstract

2-D seismic site amplification of *obliquely* propagating anti-plane motions in viscoelastic soil models is presented for two case studies. First, results issued from the application of recursive filters for discrete-time analysis of site amplification under non-vertical wave incidence to the analytical soil layer model of El-Asnam Cultural Center site (North-Western Algeria), are compared to exact solutions from the discrete-frequency approach. In a second stage, seismic site amplification in a multilayer viscoelastic soil profile model of the "500 Residential Apartments" site in the El-Asnam region, under *obliquely* incident SH waves, is analyzed in detail, using the Thomson-Haskell technique modified to account for both internal and radiation forms of damping. Results of sensitivity analyses performed in an attempt to estimate seismic site amplification of soil surface acceleration time histories under bedrock and rock outcropping input motions, as affected by angle of incidence variations and rock to soil impedance ratios, are discussed.

Keywords: 2-D Seismic site amplification; Multilayer viscoelastic soils; Obliquely propagating SH waves; Time domain recursive filters; Discrete-frequency approach; Sensitivity analysis; El-Asnam Earthquake

Résumé

L'amplification sismique de site en 2-D se propageant obliquement en mouvements anti-plan à travers des modèles de sol viscoélastique est présentée pour deux études de cas, premièrement, les résultats issus de l'application de filtres récursifs pour l'analyse temporelle (en temps discret) de l'amplification du site sous incidence d'onde non-verticale du modèle analytique de couche de sol d'El-Asnam Centre Culturel (Nord-ouest de l'Algérie), sont comparés à des solutions exactes de l'approche fréquentielle discrète.

Dans une deuxième étape, l'amplification sismique de site d'un modèle viscoélastique du profil de sol multicouche : site "500 Appartements résidentiels " dans la région d'El-Asnam, sous des ondes incidentes SH obliques, est analysée en détail. En utilisant la technique Thomson-Haskell modifiée, tenant en compte, des deux types d'amortissement matériel et radiatif.

Les résultats discutés sont issus de l'analyse de sensibilité effectuée dans le but d'estimer l'amplification sismique de l'accélération de la surface du sol sous des données de mouvement du substratum rocheux et de l'affleurement rocheux, qui est affectée par les variations d'angle d'incidence et les rapports d'impédance roche- sol.

Mots-clés : amplification sismique de Site en 2 -D ; Sols multicouches viscoélastiques ; propagation des ondes SH Obliquement ; filtres récursifs dans le domaine temporel ; approche discrète en fréquence ; Analyse de sensibilité ; Tremblement de terre El – Asnam

Table des Matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction Générale	13
1. Problématique	13
2. Objectifs	14
3. Organisation de la thèse	15
Chapitre 1: Caractérisation du mouvement et réponse sismique d'un profil de sol	17
1.1 Introduction	17
1.2 Paramètres caractéristiques du mouvement sismique	17
1.2.1 Ondes de volume.....	18
1.2.2 Ondes de surface	18
1.2.3 Grandeurs Maximales : accélération, vitesse, déplacement.....	19
1.2.4 Durée.....	20
1.2.5 Facteurs liés à la source	21
1.2.6 Magnitude	21
1.2.7 Intensité.....	22
1.3 Description d'un état élasto-dynamique.....	22
1.4 Notations de Potentiels de déplacements	24
1.5 Onde monochromatique	25
1.5.1 Réflexion et réfraction des ondes à une interface	27
1.6 Propagation des ondes planes en milieu élastique semi infini	29
1.7 Fonction de transfert.....	30
1.7.3 Calcul du mouvement sismique du sol à partir d'une excitation générée au niveau du substratum rocheux.	31

1.7.4	Calcul du spectre de Fourier au niveau d'une couche donnée d'un profil de sol	31
1.7.5	Spectre de réponse	32
1.8	Définition du point de contrôle	32
1.8.1	Effets de site.....	33
1.9	Conclusion.....	33
Chapitre 2: Approche en temps discrets de l'amplification sismique de site dans les sols élastiques et viscoélastiques sous des ondes SH incidentes obliquement.....		35
2.1	Introduction	35
2.2	Approche temporelle discrète.....	35
2.3	Amplification sismique de site dans les sols élastiques et viscoélastiques	36
2.3.1	Amplification sismique de site dans les sols élastiques	36
2.3.2	Cas de substratum rocheux	37
2.3.3	Affleurement rocheux	39
2.4	Extension de l'amplification de site sismique dans des sols viscoélastiques.....	40
2.4.1	Q-amortissement	41
2.4.2	Cas du Substrat rocheux.....	42
2.4.3	Affleurement rocheux	43
2.5	Modèle linéaire équivalent	44
2.6	Propriétés équivalentes du sol	45
2.7	Résultats	47
2.7.1	Amortissement de rayonnement.....	47
2.7.2	Q amortissement	48
2.8	Effets de l'angle d'incidence sur les fonctions de transfert.....	52
2.9	Conclusion.....	53
Chapitre 3: Approche en fréquence discrète de l'amplification sismique de site dans des sols multicouches viscoélastiques		55
3.1	Introduction	55

3.2	Amplification de site dans des sols élastiques stratifiés sous des ondes SH non verticales	55
3.2.1	Présentation de la méthode de Thomson -Haskell	55
3.2.2	Formulation de la méthode de Thomson –Haskell	55
3.3	Cas du Substratum	58
3.4	Cas de l’affleurement rocheux	59
3.5	Amplification du site par rapport au substrat rocheux	60
3.6	Amplification de site par rapport à l'affleurement rocheux	61
3.7	Conclusion	62
Chapitre 4: Analyse de sensibilité de l'amplification sismique de site dans des sols multicouches viscoélastiques : Effets des angles sur les fonctions de transfert et les accélérogrammes		
		64
4.1	Introduction	64
4.2	Résultats et discussions	64
4.2.1	Effets sur les fonctions de transfert	64
4.2.2	Effets sur les rapports spectraux des pics fondamentaux d'amplification de site du substratum- affleurement rocheux	68
4.2.3	Effets de la propagation des ondes à travers les couches	69
4.3	Spécification des mouvements d’entrée	70
4.3.1	Mouvement de l’affleurement rocheux (in put) et mouvement au sol associé	71
4.3.2	Calcul des mouvements d'entrée du substratum et des mouvements de sol associé	72
4.4	Les résultats numériques et discussions	73
4.4.1	Cas de l’affleurement rocheux	74
4.4.2	Cas du substratum	74
4.5	Conclusion	77
Conclusion générale		78
Références		81

Liste des Tableaux

Tableau 4-1 : Propriétés des sols (site des 500 appartements résidentiels El-Asnam).	66
Tableau 4-2: Angles de propagation des ondes à travers les couches (site des 500 résidences El-Asnam).	67
Tableau 4-3 : Variations du décalage de fréquence par rapport à l'angle d'incidence des ondes ($V_N = V_r = 1100$ m / s, site des 500 résidences El-Asnam).	67
Tableau 4-4: Variations d'amplitude spectrale par rapport à l'angle d'incidence.....	68
Tableau 4-5: Rapport des pics spectraux $\frac{ H_B^Q ^2}{ H_A^Q ^2}$ ($V_N = V_r = 1100$ m/s, site des 500 appartements résidentiels El-Asnam).	69
Tableau 4-6: Rapport des pics spectraux $\frac{ H_B^Q ^2}{ H_A^Q ^2}$ ($V_N = V_r = 3000$ m/s, site des 500 appartements résidentiels El-Asnam).	70

Liste des Figures

Figure 1-1 : Epicentre et hypocentre (ou foyer).....	18
Figure 1-2 : Effet de la propagation des ondes P et S dans un milieu.	18
Figure 1-3: Composantes de l'action sismique.....	19
Figure 1-4 : Représentation des diagrammes d'enregistrement d'accélération, de vitesse et de déplacement en fonction du temps (séisme d'Olympia, Washington 1949, ComposanteS86w).	20
Figure 1-5 : Evaluation des séismes.....	21
Figure 1-6: Réflexion et réfraction à une interface.	27
Figure 1-7: Réflexion et transmission d'une onde au niveau d'une interface.	28
Figure 1-8: Représentation de la fonction de transfert.....	31
Figure 1-9: Définition du point de contrôle.	32
Figure 2-1 : Ondes obliques incidentes et réfléchies dans une couche de sol viscoélastique recouvrant le substrat rocheux.	37
Figure 2-2 : Les fonctions de transfert du site du Centre Culturel El-Asnam pour $\alpha_2 = \alpha_1 = 0^\circ$, en supposant des modèles de sol élastique ($\tau = 0.04s$) et viscoélastique ($r = 0,62$, $\tau = 0.04s$ et $Q = 12$), pour un socle rigide et l'affleurement rocheux.	44
Figure 2-3 : Fonctions de transfert $HAQf$ du site du Centre culturel El-Asnam en supposant un modèle de sol élastique ($r = 0.62$ et $\tau \cong 0.04$ s, $Q \rightarrow \infty$) pour différentes valeurs d'angle d'incidence α_2	47
Figure 2-4 : Fonctions de transfert $HAQf$ du site du centre culturel El-Asnam pour $\alpha_2 = 0^\circ$, en supposant 1) modèle de sol élastique ($r = 0,62$, $\tau = 0,04s$, $Q \rightarrow \infty$) et 2) trois modèles de sols viscoélastiques ($r = 0,62$ - $\tau = 0,04$ s - $Q = 50, 25, 10$)......	Error! Bookmark not defined.
Figure 2-5 : Amplifications du site du centre culturel El-Asnam en supposant un modèle de sol viscoélastique pour divers angles d'incidence de l'onde SH par rapport à (a) affleurement, ($V_2 = 900$	

m / s, $r = 0.62$ et $\tau = 0.04$ s et $Q = 12$), et b) la roche mère ($V_2 = 3000$ m / s, $r = 0,87$, $\tau = 0,04$ s et $Q = 12$).	50
Figure 2-6: Amplification du site du centre culturel El-Asnam en supposant des modèles de sols viscoélastiques ($\tau_e = \tau_e(\alpha^2)$; $Q = 12$) pour l'angle d'incidence $\alpha^2 = \pi/4$, par rapport à (a) affleurement, et (b) substrat rocheux.	51
Figure 3-1 : Représentation des vecteurs états S_n et S_{n+1} associés à $n^{\text{ième}}$ et $(n + 1)^{\text{ième}}$ couches du système de sol élastique à plusieurs couches.	56
Figure 3-2 : Ondes Incidentes et réfléchies dans un sol multicouche viscoélastique surplombant le substratum rocheux	61
Figure 4-1 : Amplification de site pour le sol multicouche viscoélastique : a) le substratum rocheux et b) l'affleurement rocheux pour divers angles d'incidence des ondes SH ($V_N=1100$ m/ s, 500 appartements résidentiels, ville d'El-Asnam).	65
Figure 4-2 : Localisation des sites des 500 appartements résidentiels et du centre culturel (ville d'El-Asnam).	65
Figure 4-3 : Profil longitudinal des sols de la ville d'El-Asnam le long de l'oued El-Cheliff [37].	66
Figure 4-4 : Amplification de site pour le multicouche viscoélastique : a) le substratum rocheux et b) l'affleurement rocheux pour divers angles d'incidence des ondes SH ($V_N = 3000$ m / s, 500 appartements résidentiels, El-Asnam).	70
Figure 4-5 : Histoire temporelle de l'accélération au niveau de la surface d'un sol multicouches viscoélastique : (a) affleurement rocheux et (b) substratum pour divers angles d'incidence des ondes SH ($V_2 = 1100$ m / s, site des 500 appartements résidentiels, ville El-Asnam).	76

Introduction Générale

1. Problématique

L'identification de zones de surface amplifiées, suite à un séisme, permet une réflexion s'intéressant à l'amélioration de la prévention des risques localisés du comportement de sols très particuliers. Elle justifie de nouvelles technologies par rapport aux normes utilisées. Et elle réduit les opérations de la vulnérabilité sur le bâti existant. En conséquence, il est d'une importance cruciale de pouvoir simuler au mieux le comportement du sol sous l'effet de tremblement de terre d'intensité majeure.

Le problème de l'amplification sismique de site a été largement étudié dans le passé et a fait l'objet de nombreuses recherches au cours des dernières années. L'amplification du site est importante dans l'évaluation des effets des conditions locales du sol sur les caractéristiques sismiques du mouvement dans les dépôts des couches sous-jacentes [1,2], dans la modélisation et la simulation du mouvement au sol [3,4] et dans la classification du site [5]. L'amplification locale des sols peut augmenter à plusieurs fois les données des mouvements de la roche et peut influencer la réponse structurelle du tremblement de terre [6,7], ainsi que l'étendue des dommages causés aux structures [8,9].

Diverses méthodes ont été utilisées pour estimer l'amplification sismique du site : un phénomène dont les causes et les effets ne sont pas toujours très bien compris [10]. Un examen des types et des mécanismes de génération de sites d'amplification et des modèles qui sont utilisés pour les caractériser à partir des enregistrements, peuvent être trouvés dans [11]. Des examens approfondis sur l'amplification du site sismique, y compris les modèles analytiques et empiriques, peuvent être trouvés dans la littérature spécialisée [12, 13,1].

Les procédures numériques comprennent essentiellement : des approches fréquentielles discrètes [14-20] et temporelle-discrète [21, 22]. L'amplification du sol peut être analysée essentiellement comme l'effet de la non-linéarité [23, 24] ou la linéarité de la réponse du sol [6, 12,24, 25]. Il devrait être noté que, même si les modèles linéaires viscoélastiques du sol peuvent dans certains cas spéciaux avoir une portée plutôt limitée d'application, ils fournissent des résultats acceptables à des fins d'Ingénierie Parasismique [27]. En outre, de nombreuses observations d'enquêtes post-sismiques sur des études de mouvements forts et des études des dommages y compris LomaPrieta1989 et le tremblement de terre de Northridge 1994 suggèrent que des conclusions

pratiques puissent être tirées des études linéaires pour des événements de haute intensité des sites qui ne sont pas trop proches de la faille [6,25,5].

Bien que les modèles de propagation d'ondes linéaires aient été largement utilisés dans l'Ingénierie sismologique. La plupart des applications pratiques ont été limitées essentiellement à l'analyse 1 – D des problèmes d'Ingénierie sismique géotechnique et sont basées sur la propagation verticale des ondes de cisaillement [28]. En outre, peu d'attention a été accordée, à une considération explicite des effets des angles d'incidence sur :

- 1) l'affleurement rocheux (données) et des mouvements du sol (résultats) ;
- 2) le substratum rocheux et les mouvements des sols associés.

2. Objectifs

Le travail de recherche s'inscrit précisément dans le cadre de cette problématique. La présente recherche vise ainsi deux objectifs principaux

L'objectif premier consiste à mieux cerner le phénomène d'amplification sismique de site sous incidence d'onde non verticale et de montrer l'importance de la prise en compte des effets des conditions locales du sol sur les caractéristiques sismiques du mouvement dans les dépôts des couches sous-jacentes. Le second objectif vise à estimer l'amplification sismique du site en surface du sol en termes d'histoire temporelle de l'accélération, comme affectée par des variations de l'angle d'incidence et les ratios d'impédance.

A cet effet, dans un premier volet :

Dans cette étude, l'amplification sismique du site en 2 - D se propageant obliquement en mouvements anti- plan dans des modèles de sol viscoélastiques est présentée pour deux profils de sites réels formulés sur la base des essais sur le terrain et des analyses en laboratoire. Les mouvements des ondes incidentes à l'interface sol - roche d'un demi-espace ont été estimés par une analyse de dé-convolution d'un accélérogramme de surface enregistré sur un site à proximité au cours de la plus forte réplique ($M_S=5.3$) car, l'événement principal du tremblement de terre du 10 Octobre 1980 El - Asnam a été non enregistré.

Introduction Générale

Des filtres récursifs pour l'analyse temporelle-discrète de l'amplification du site sous incidence d'onde non verticale, sont d'abord calculés et appliqués au modèle analytique de la couche du sol du site du Centre Culturel El-Asnam (Nord-ouest de l'Algérie). Les résultats sont ensuite comparés à ceux obtenus en utilisant l'approche fréquentielle-discrète.

Dans une deuxième étape, l'amplification sismique de site dans un modèle de profil de sol multicouche viscoélastique du site "500 Appartements résidentiels" dans la région d'El-Asnam, sous des ondes incidentes obliques, est analysée en détail, en utilisant la technique Thomson-Haskell modifiée pour prendre en compte les deux sources d'amortissement matériel et radiatif. L'accent est mis sur l'importance des effets de l'angle d'incidence sur l'amplification sismique du site pour les données des mouvements de la roche mère et de l'affleurement rocheux. Les résultats de l'analyse de sensibilité effectuée dans le but d'estimer l'amplification sismique du site en surface du sol en termes d'évolution de l'accélération en fonction du temps, comme affectée par des variations de l'angle d'incidence et les ratios d'impédance, sont discutés.

Diverses conclusions et recommandations sont formulées.

3. Organisation de la thèse

A la lumière de la problématique posée, la présente thèse est organisée :

La mise en évidence de la problématique posée et un état de l'art de l'analyse du phénomène est dressée en introduction

Le Chapitre 1 traite de la caractérisation du mouvement sismique et de la réponse sismique d'un profil de sol

Le chapitre 2 est consacré à l'approche en temps discrets de l'amplification sismique de site (ASS) dans les sols élastiques et viscoélastiques sous ondes SH incidentes obliquement.

Le chapitre 3 présente l'approche en fréquence discrète de l'ASS dans des sols multicouches viscoélastiques.

Le chapitre 4 Analyse de sensibilité de l'ASS d'un multicouche viscoélastique : Effets des angles sur les fonctions de transfert et sur les accélérogrammes.

Enfin une conclusion générale dressant les travaux menés. Suivi des références bibliographique.

Chapitre 1

Chapitre 1: Caractérisation du mouvement et réponse sismique d'un profil de sol

1.1 Introduction

Les tremblements de terre font partie des catastrophes naturels qui ont toujours exercé une grande influence sur l'humanité. Ils sont responsables de la destruction de villes voire des régions entières, la cause de la perte humaine en milliers de personnes et ont un impact néfaste sur l'économie pour les pays touchés. Le développement de ces régions à haut risque sismique est lié à la construction des structures à usage d'habitation, des ouvrages stratégiques tels que barrages, centrale électrique d'une part. Et à la modernisation de moyens de transport dont le siège est le sol Auto route, Tunnel d'autre part. Pour être en mesure de bâtir dans de telles régions, Il est nécessaire d'identifier ces zones et d'y construire en conséquence.

L'estimation de la réponse d'une couche de sol à une sollicitation sismique constitue l'un des problèmes fondamentaux du Génie Sismique. Il s'agit de déterminer les caractéristiques des mouvements en surface du sol. Cette évaluation est indispensable pour tous les problèmes ayant trait au comportement du sol de fondation.

Mathématiquement le problème à résoudre est celui de la propagation d'onde dans un milieu continu. La modélisation de la propagation des ondes dans les milieux élastiques complexes (tenant compte de la source, de l'hétérogénéité des sols, du comportement non linéaire des sols) peut faire appel à des techniques numériques très variées. Toutes ces techniques ayant pour point commun la description des corps considérés à l'aide de la théorie de l'élasticité, dont les fondements ont été établis par Cauchy et Poisson au début du XIX^{ème} siècle.

1.2 Paramètres caractéristiques du mouvement sismique

La variation des contraintes de cisaillement de l'état ultime à l'état final provoque la propagation d'énergie, libérée suite à un tremblement de terre, depuis la source (foyer) point où la rupture est initiée jusqu'à l'épicentre sur la surface terrestre. La distance verticale séparant ces deux points est appelée distance focale. Le transport d'énergie se fait sous forme de paquets d'ondes mécaniques élastiques à travers la structure sol. Les types d'ondes qui se propagent à travers le massif sont dits ondes de volume et ceux qui se propagent à la surface sont dits ondes de surface.

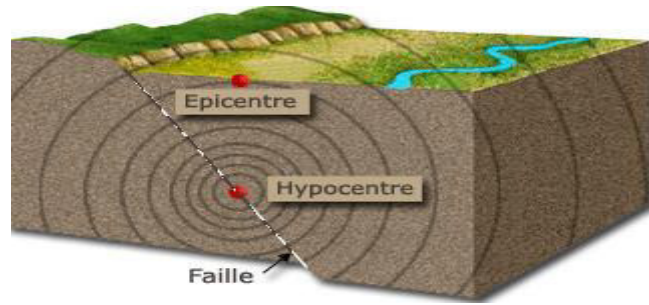


Figure 1-1 : Epicentre et hypocentre (ou foyer).

1.2.1 Ondes de volume

Dans le cas d'une source placée dans un milieu homogène infini, deux types d'ondes de volume existent, appelées ondes directes P et ondes directes S. Pour un récepteur placé en champ lointain, l'onde P (onde longitudinale) est à hautes fréquences et arrive la première. L'onde S (onde transversale) est à plus faibles fréquences mais possède de plus grandes amplitudes et arrive en second. Les ondes secondaires sont responsables pour la grande majorité des dommages aux structures. Leur vitesse de propagation est plus faible que celles des ondes primaires et excitent le sol bien après les ondes P.

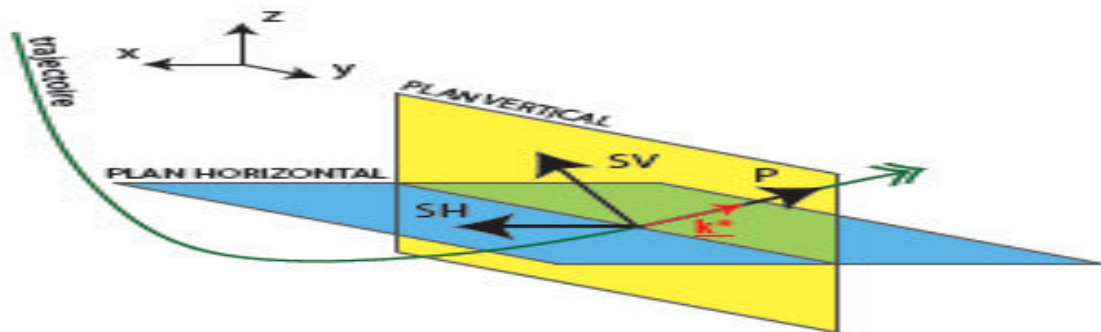


Figure 1-2 : Effet de la propagation des ondes P et S dans un milieu.

Ces deux types d'ondes sont différents dans le sens où le premier type engendre par un complexe phénomène de réfraction et de réflexion le deuxième type d'ondes.

1.2.2 Ondes de surface

Lorsqu'un domaine élastique homogène est limité par une surface libre (correspondant à une condition de traction nulle à la surface), il existe un type d'ondes particulier correspondant à des ondes se propageant le long de la surface du milieu, dans un voisinage de celle-ci, sans toutefois

pénétrer dans le milieu (onde évanescente avec la profondeur). Ces ondes sont appelées ondes de surface. Elles sont subdivisées en deux catégories, ondes de Love et ondes de Rayleigh

1.2.3 Grandeurs Maximales : accélération, vitesse, déplacement

Lorsque les ondes et l'énergie qu'elles transportent atteignent un site à la surface de la terre, elles engendrent des vibrations dans trois directions.

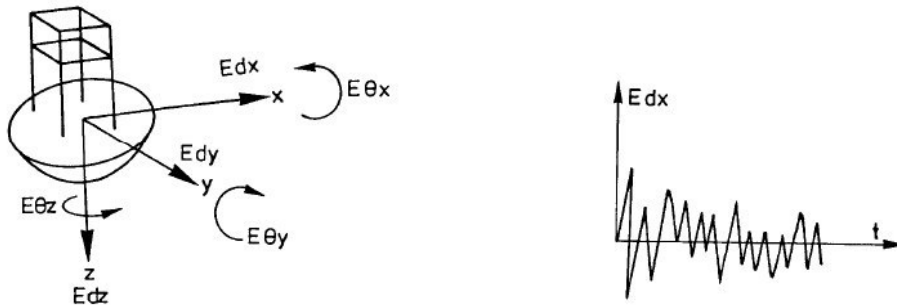


Figure 1-3: Composantes de l'action sismique.

L'importance relative des composantes du mouvement du sol en un point dépend de la position du point considéré par rapport au foyer du séisme. A l'aplomb de celui-ci la composante verticale est du même ordre que la composante horizontale. A plus grande distance, l'importance relative de la composante verticale diminue et vaut 50 à 70% de l'horizontale. Les composantes de rotation ont généralement des effets négligeables.

La caractérisation la plus explicite d'un tremblement de terre est constituée d'un ensemble d'enregistrements d'accélérogrammes dans la zone géographique considérée. Ils contiennent à la fois les aspects accélérations, durée et contenu fréquentiel. Les accélérogrammes constituent une donnée d'action directement utilisable par la dynamique des structures.

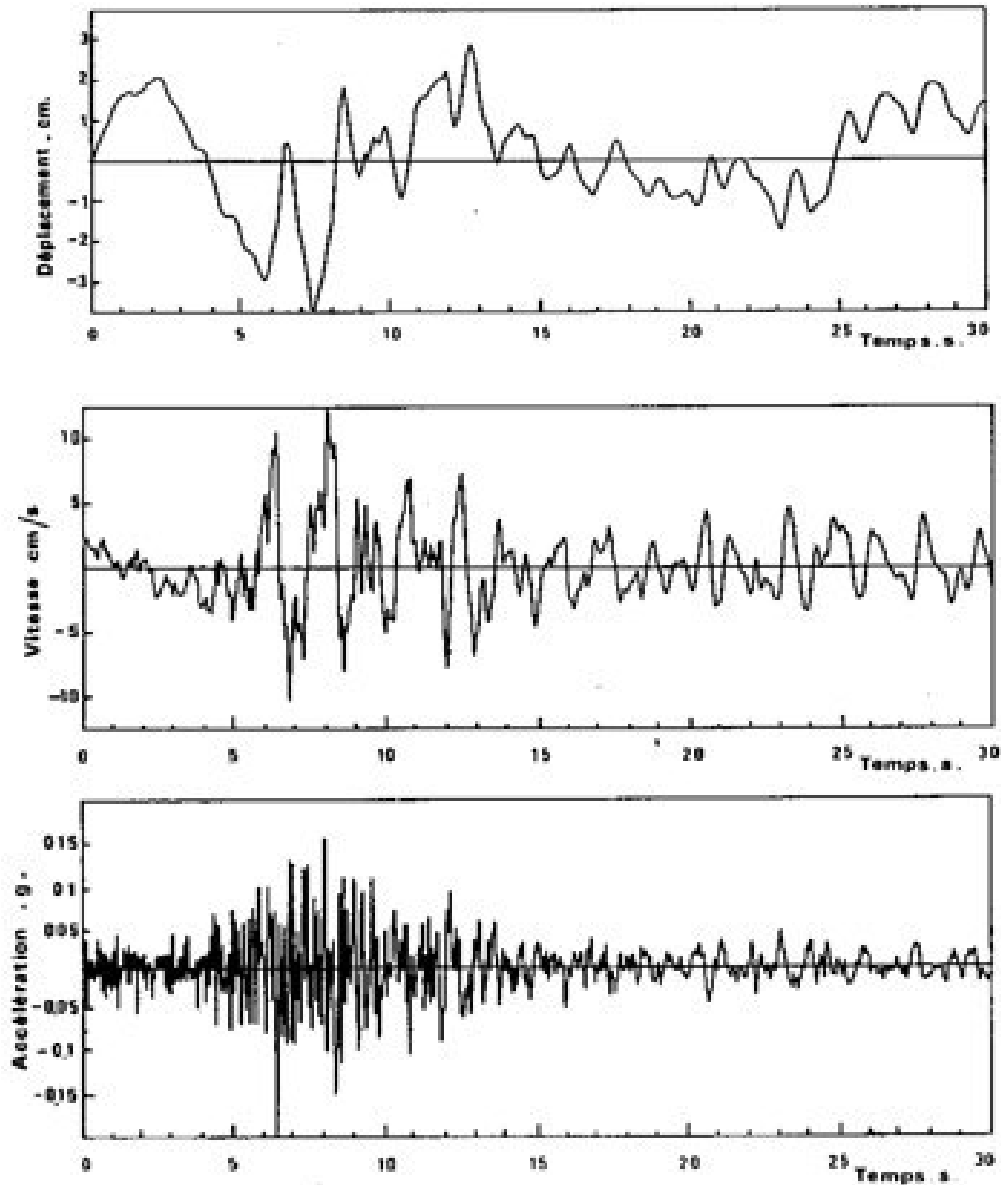


Figure 1-4 : Représentation des diagrammes d'enregistrement d'accélération, de vitesse et de déplacement en fonction du temps (séisme d'Olympia, Washington 1949, Composante S86w).

A partir de diagrammes tels que ceux de la figure 1-4, il est possible de connaître la valeur maximale, a , de l'accélération (exprimé en g), de la vitesse (cm) et, d , du déplacement (cm).

1.2.4 Durée

La **durée** du tremblement de terre est un paramètre significatif dans les processus de fissurations et dégradations progressives des éléments d'une construction. Elle est liée à la magnitude du séisme. Cette durée est aléatoire mais généralement très courte (l'ordre des secondes).

Chapitre 1 : Caractérisation du mouvement et réponse sismique d'un profil de sol

La détermination de ce paramètre dans la caractérisation d'un séisme est très délicate à partir de l'accélérogramme.

Certains sismologues ont proposé de le définir à partir du diagramme d'UHSID qui proposa une forme convenable pour quantifier la variation du niveau de vibration dans le temps.

Par définition ; si $a(t)$ est l'accélération fonction du temps, T la durée totale du séisme, la variation de l'intégrale : $\left[\int_0^T [a(t)]^2 dt \right]$ Représente l'énergie contenue dans l'accélérogramme.

On peut alors définir la durée significative du séisme comme le temps requis pour passer du niveau 5% au niveau 95% du tracé d'UHSID.

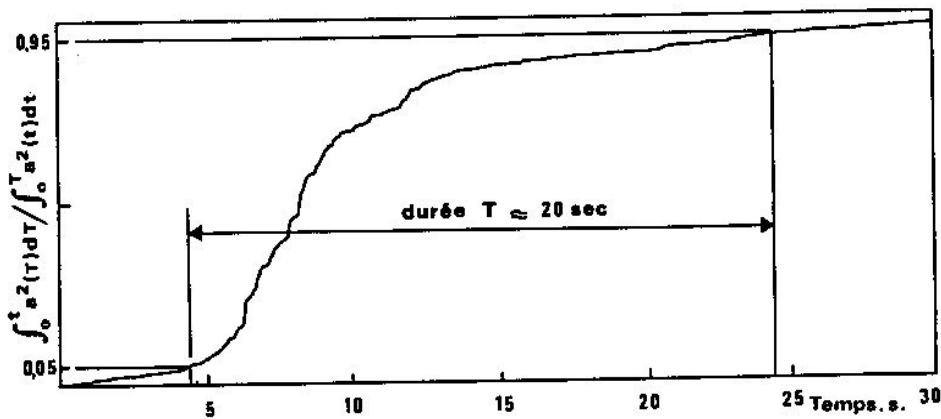


Figure 1-5 :Evaluation des séismes

1.2.5 Facteurs liés à la source

On peut caractériser la "taille" du tremblement de terre par différents paramètres.

Pour l'Ingénieur en Génie –Civil, la caractéristique essentielle est l'aptitude plus ou moins grande du séisme à provoquer en un point donné de la surface des actions mécaniques et des destructions. Pour représenter cette grandeur, on utilise des échelles macroscopiques désignées par : l'échelle des magnitudes et l'échelle des intensités.

1.2.6 Magnitude

La magnitude évalue l'énergie libérée au foyer du séisme. Elle dépend de la longueur de la faille activée et de l'importance du déplacement le long de la faille, on parle de l'échelle de Richter. Cette énergie est évaluée à partir des sismogrammes. Il s'agit d'une échelle logarithmique, c'est à dire

qu'un accroissement de magnitude de 1 correspond à une multiplication par 30 de l'énergie. On considère qu'à partir d'une magnitude de 5, le séisme est important.

1.2.7 Intensité

L'intensité I (échelle de MERCALLI) est une caractérisation non instrumentale de l'importance des effets matériels observés en surface et de la perception par la population. Cette description vaut pour une zone géographique donnée, mais est assez qualitative. L'intensité en un point dépend non seulement de la taille du séisme (magnitude) mais aussi de la distance au foyer, de la géologie locale et de la topographie.

1.3 Description d'un état élasto-dynamique

Dans le cadre de l'hypothèse des petits déplacements, on considère, un solide élastique, homogène et isotrope, occupant un domaine Ω , limité par sa surface Γ et repéré par un système de coordonnées (x, y, z) défini par la base vectorielle (i, j, k) . Le couple $S = [u, \sigma]$ est caractérisé par le champ de déplacement $u(x, t)$ et le tenseur de contraintes $\sigma(x, t)$ correspondant à une densité volumique de force $f(x, t)$ et une masse volumique ρ . Ce système est un état élasto-dynamique lorsqu'il vérifie le système d'équation gouvernant le mouvement.

Notations : ∇ est vecteur gradient défini par $\nabla = \frac{\partial}{\partial x_i} i_j$

∇^2 est l'opérateur de Laplace défini par $\nabla^2 = u_{i,jj} i_i$

• Dénote le produit scalaire

$\wedge = \times$ dénote le produit vectoriel

Divergence d'un vecteur $\vec{v} = \vec{\nabla} \cdot \vec{v}$ = le produit scalaire de l'opérateur nabla et du vecteur \vec{v}

Le déplacement des points d'une configuration initiale vers une configuration finale se fait en passant par des translations et des rotations du point considéré. En prenant l'hypothèse des petites

Chapitre 1 : Caractérisation du mouvement et réponse sismique d'un profil de sol

déformations d'un milieu continu, nous pouvons considérer que les relations de compatibilité (lois universelles –indépendantes) sont assurées. Donc les déplacements (u) et les déformations sont des fonctions de classe C^1 .

Suivant la deuxième loi de Newton, les équations d'équilibre dynamique s'écrivent :

$$\operatorname{div} \sigma + f = \rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \quad (1.1)$$

La loi de comportement élastique s'écrit :

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (1.2)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1.3)$$

En remplaçant (1.3) dans (1.2) et en portant ces nouvelles expressions dans (1.1) nous obtenons l'équation suivante :

$$\sigma_{ij,j} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = \rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \quad (1.4)$$

En notation vectorielle nous avons :

$$(\lambda + 2\mu) \nabla(\nabla \cdot u) - \mu(\nabla \times \nabla \times u) + f_i = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.5)$$

Cet état d'équilibre est complété par les conditions initiales :

$$u(x, 0) = u_0(x) ; \dot{u}(x) = v_0(x) \quad (1.6)$$

Et les conditions aux limites sur la surface Γ en exprimant le vecteur de traction $t^{(n)}(x, t)$ appliqué sur une facette de normale $n(x)$ en fonction du vecteur déplacement par la relation :

$$t^{(n)} = \lambda(\Delta \cdot u)n + 2\mu \frac{\partial u}{\partial n} + \mu n \wedge (\Delta \wedge u) \quad (1.7)$$

1.4 Notations de Potentiels de déplacements

La résolution de l'équation (1.5) est difficile dans la mesure où les trois déplacements sont couplés dans une même équation. On aura par conséquent à procéder par élimination ce qui nous amènera à une équation du 6^{ème} ordre. Une meilleure approche consiste à appliquer le concept de la décomposition vectorielle d'HELMOLTZ au champ inconnu et exprimer le champ u en termes de dérivées de potentiels scalaire ϕ et vectoriel ψ tel que :

Le champ u peut être interprété comme étant la somme d'un champ irrotationnel u_1 et d'un champ rotationnel u_2 .

On pose $u = u_1 + u_2$

Avec $u_1 = \text{grad}\phi = \nabla\phi$ telle que $\phi(x, y, z, t)$ = un potentiel scalaire et le mouvement est Ir rotationnel.

$u_2 = \text{rot}\psi = \nabla \times \psi$ telle que $\psi(x, y, z, t)$ est un potentiel vectoriel et le mouvement est rotationnel.

$$u = u_1 + u_2 = \nabla \cdot \phi + \nabla \times \psi \text{ et } \nabla \cdot \psi = 0 \quad (1.8)$$

$$\text{Avec } \nabla \times u_1 = 0 \text{ et } \nabla \times u_2 = 0 \quad (1.9)$$

$$\text{Posant } C_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \alpha \quad (1.10)$$

$$C_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \beta \quad (1.11)$$

Chapitre 1 : Caractérisation du mouvement et réponse sismique d'un profil de sol

Ainsi, si deux potentiels ϕ et ψ vérifient les équations d'ondes alors le champ u donné par la représentation (1.8) et vérifie l'équation de déplacement du mouvement (1.5). Inversement d'après le théorème de complétude, toute solution de l'équation (1.5) admet la représentation (1.8).

En remplaçant le vecteur déplacement u par sa valeur dans l'équation (1.5)

Nous aurons :

$$(\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla(u_1 + u_2)) - \mu(\nabla \times \nabla \times (u_1 + u_2)) + f_i = \rho \frac{\partial^2(u_1 + u_2)}{\partial t^2} \quad (1.12)$$

En négligeant les forces volumiques, vu qu'elles produisent un effet relativement insignifiant sur la propagation des ondes sismiques, nous aboutissons aux deux équations aux dérivées partielles du second ordre satisfaites par ϕ et ψ suivantes :

$$\begin{cases} \alpha^2 \nabla^2 \phi = \ddot{\phi} \Rightarrow \nabla^2 \phi - \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \\ \beta^2 \nabla^2 \psi = \ddot{\psi} \Rightarrow \nabla^2 \psi - \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \end{cases} \quad (1.13)$$

Ces équations ont des solutions différentes selon que qu'il s'agira d'un front d'ondes près ou loin de la source. En effet, pour des sites loin de la source du séisme la courbure du front d'onde par rapport à un point en surface est négligeable et peut être assimilé à un plan. Par contre, le front d'ondes incidentes au niveau d'un site proche de la source par rapport à un point en surface présente une courbure importante d'où la nécessité de le considérer sphériques

$$\text{Nous définissons la constante du matériau par : } R = \frac{c_p}{c_s} = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right) = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\mu}} \quad (1.14)$$

1.5 Onde monochromatique

Pour une onde monochromatique stationnaire, de pulsation ω , une solution générale du système d'équations (1.13) est donnée par :

$$\phi = A \exp\left[\frac{i\omega}{\alpha} (l_1 x + l_2 y + l_3 z - at)\right] = A \cdot f_p \quad (1.15)$$

Chapitre 1 : Caractérisation du mouvement et réponse sismique d'un profil de sol

$$\psi = B \exp[i\omega/\beta(m_x x + m_y y + m_z z - \beta t)] = B \cdot f_s \quad (1.16)$$

Nous remarquons que ces fonctions vérifient les équations d'ondes si

$$l_x^2 + l_y^2 + l_z^2 = 1 \text{ et } m_x^2 + m_y^2 + m_z^2 = 1$$

D'autre part, la divergence du potentiel vectoriel est nulle (équation 1.8). Il en découle :

$$m \cdot B = 0 \Rightarrow B \perp m \text{ et } \psi \perp m \quad (1.17)$$

Dans le cas où elles sont réelles, Les composantes l_x, l_y, l_z du vecteur l (ou m) représentent les cosinus directeurs de la direction de propagation des ondes. A un instant donné t_0, ϕ (ou ψ) est constant sur tout plan normal à l (ou m), d'équation :

$l_1 x_1 + l_2 x_2 + l_3 x_3 - at = Cste$ (ou $m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 - \beta t = Cste$). Tout type d'ondes qui présente une telle variation est dit ondes harmoniques. Globalement, le concept d'ondes planes fait référence à deux conditions essentielles :

- 1) Pour un temps donné, le mouvement des particules dû à cette propagation est constant au niveau de tout plan perpendiculaire à la direction de propagation.
- 2) Ce plan se propage dans la direction de propagation avec une vitesse C (ou α).

La combinaison des équations (1.8), (1.15) et (1.16) nous permet d'écrire :

$$u_1 = \left(\frac{i\omega A}{\alpha} f_p \right) l \quad (1.18)$$

$$u_2 = \left(\frac{i\omega}{\beta} f_s \right) m \times B \quad (1.19)$$

On appelle le rapport ω/C le nombre d'onde et ω la fréquence circulaire.

Le modèle de propagation des ondes élastiques a prouvé de façon mathématique, qu'un tremblement de terre produit deux types d'onde de volume [29].

1.5.1 Réflexion et réfraction des ondes à une interface

Si maintenant le domaine considéré n'est plus infini, mais borné, lorsque l'une ou l'autre de ces ondes rencontre une frontière du domaine, un couplage entre les modes P et S se produit à cette frontière, et il en résulte dans le cas général des ondes réfléchies des deux types (P et S) pour une onde incidente purement P ou purement S.

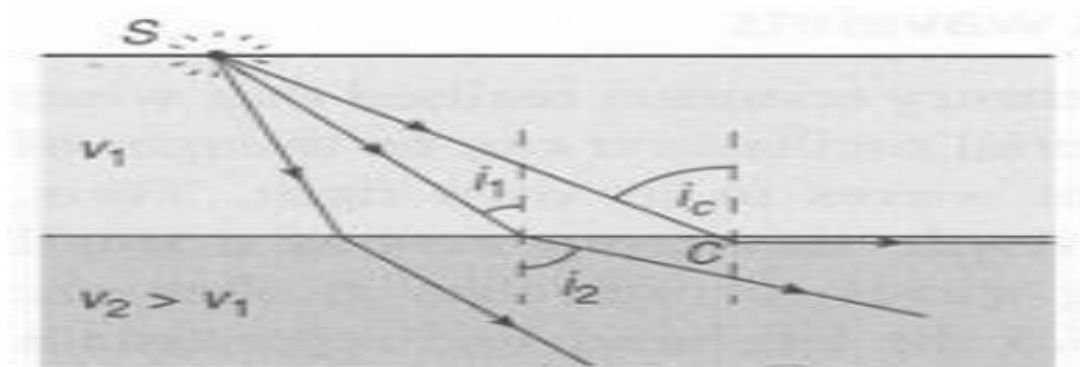


Figure 1-6: Réflexion et réfraction à une interface.

Le profil de sol est schématisé par une superposition de couche sédimentaire de propriétés différentes. On matérialise la séparation de deux milieux successifs par une surface fictive appelée interface, au niveau de laquelle on considère qu'il y a continuité des déplacements et des contraintes. La surface dont la position est variable avec le temps, qui est le lieu géométrique des points affectés à l'instant t , est appelée front d'onde

Les lois de SNELL-DESCARTES de réflexion donnent les relations angulaires entre rais incidents, réfléchis et transmis pour différents types d'ondes.

On considère deux milieux (1) et (2) caractérisés par leurs masses volumiques ρ_1 et ρ_2 et les vitesses des ondes V_1 et V_2 . Les ondes planes se propagent dans le plan Oxz . L'interface est le plan orthogonal à Oz (Figs. 1-6 et 1-7).

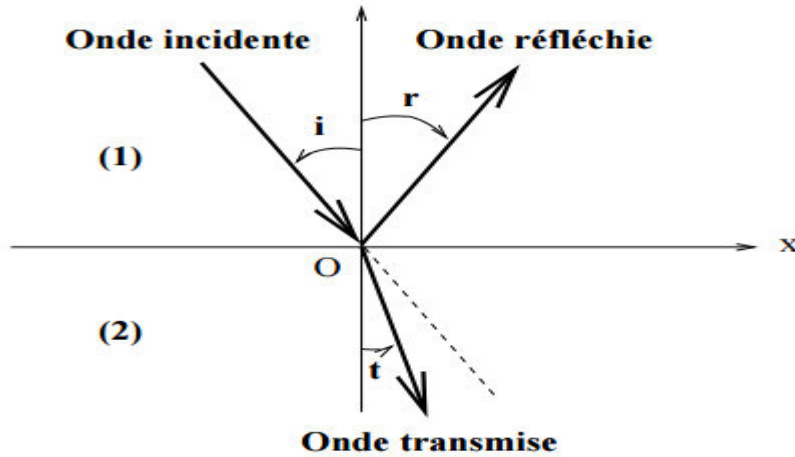


Figure 1-7: Réflexion et transmission d'une onde au niveau d'une interface.

On note i l'angle d'incidence, r l'angle de réflexion et t l'angle de transmission. D'après la première loi de Snell-Descartes, il existe une relation entre l'angle d'incidence et l'angle de réflexion :

$$i = r \quad (1.20)$$

D'après la deuxième loi de Snell-Descartes, il existe une relation entre l'angle d'incidence et l'angle de transmission :

$$\frac{\sin i}{v_1} = \frac{\sin t}{v_2} \quad (1.21)$$

La valeur de l'angle d'incidence détermine la façon dont les ondes vont se propager à l'interface des milieux. Ainsi, lorsque l'angle de transmission est de 90 degrés, on atteint l'angle critique note i_c :

$$i_c = \arcsin \left(\frac{v_1}{v_2} \right) \quad (1.23)$$

Toute onde dont l'angle d'incidence est supérieur à i_c n'est pas transmise, il y a réflexion totale.

Dans le cas où l'onde atteint l'interface exactement avec l'angle critique i_c , il y a création d'ondes

réfractées. L'onde ainsi produite va sortir avec un angle de 90° par rapport à la normale à l'interface. L'énergie voyage alors le long de l'interface avec la vitesse du milieu le plus rapide un certain temps à l'interface entre les deux milieux avant d'être réémise vers la surface. Enfin, si l'onde atteint l'interface avec un angle d'incidence inférieur à l'angle critique, il y a création à la fois d'une onde réfléchie et d'une onde transmise. Ces considérations sont valables dans le cas où $V_2 > V_1$ et sont représentées schématiquement sur la figure 1.7

On définit l'angle Critique de réfraction :

$$\frac{\sin i_c}{V_1} = \frac{\sin 90^\circ}{V_2} \quad (1.24)$$

$$V_2 > V_1$$

1.6 Propagation des ondes planes en milieu élastique semi infini

Le problème de propagation d'ondes sismiques depuis une source est un problème essentiellement tridimensionnel. En considérant la source comme constituée d'une ligne (faille) et en se plaçant à une certaine distance de celle-ci, le problème devient bidimensionnel, toutes les ondes se propagent parallèlement à un plan (x, z) et le mouvement résultant est indépendant de la coordonnée y.

La solution générale pour une onde stationnaire plane s'écrit alors ($l_y = 0$):

$$u_x = A_p f_p l_x + A_{sv} f_s l_z$$

$$u_y = A_{SH} f_s \quad (1.25)$$

$$u_z = A_p f_p l_z - A_{sv} f_s l_x$$

Si l_x et l_z sont réels, inférieurs à 1, ils représentent les cosinus directeurs ($l_x = \sin \alpha$, $l_z = \cos \alpha$) de la direction de propagation. Les expressions de f_p et f_s sont obtenues à partir des équations (1.15) et (1.16) avec $l_y = 0$. L'équation (1.22) montre que, dans le cas d'une onde plane, le déplacement

Chapitre 1 : Caractérisation du mouvement et réponse sismique d'un profil de sol

suivant y est découplé des déplacements suivant x et z. Il ne résulte que de la propagation d'ondes SH alors que les déplacements suivant x et z sont fonctions des ondes P et Sv.

Expressions des vecteurs de déplacement et de contrainte de l'onde SH :

$$\vec{u}^{SH} = \vec{\nabla} \times \vec{\psi} \text{ Avec } \vec{\psi} = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix} \text{ et } u_1^{SH} = u_3^{SH} = 0$$

$$\begin{cases} \vec{u}^{SH} = (0, u_2^{SH}, 0) = \left(0, \frac{\partial \psi_1}{\partial z} - \frac{\partial \psi_3}{\partial x}\right) \\ \vec{T}_{SH}(u, i_z) = (\sigma_{xz}, \sigma_{yz}, \sigma_{zz}) = \left(0, \mu \left(\frac{\partial u_2}{\partial z}\right), 0\right) = \left(0, \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} \psi - \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \psi\right), 0\right) \end{cases} \quad (1.26)$$

Expressions des vecteurs de déplacement et de contrainte de l'onde SV :

$$\begin{cases} \vec{u}^{SV} = \vec{u}_2 = \vec{\nabla} \times \vec{\psi} = (u_1^{SV}, 0, u_3^{SV}) = \left(-\frac{\partial \psi_2}{\partial z}, 0, \frac{\partial \psi_2}{\partial x}\right) \\ \vec{T}_{SV}(u, i_z) = (\sigma_{xz}, \sigma_{yz}, \sigma_{zz}) = \left(\mu \left(-\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}\right), 0, \mu \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z}\right) \end{cases} \quad (1.27)$$

$\Rightarrow \psi$ n'est fonction que ψ_2

Expressions des vecteurs de déplacement et de contrainte de l'onde P :

$$\text{Sachant que } \varnothing = \begin{bmatrix} \varnothing_1 \\ \varnothing_2 \\ \varnothing_3 \end{bmatrix} \text{ et } u_2^P = 0$$

$$\begin{cases} \vec{u}^P = \vec{\nabla} \varnothing = (u_1^P = \frac{\partial \varnothing}{\partial x}, 0, u_3^P = \frac{\partial \varnothing}{\partial z}) \\ \vec{T}_p(u, i_z) = (\sigma_{xz}, \sigma_{yz}, \sigma_{zz}) = \left(2\mu \frac{\partial^2 \varnothing}{\partial x \partial z}, 0, \lambda \vec{\nabla} \varnothing + 2\mu \frac{\partial^2 \varnothing}{\partial z^2}\right) \end{cases} \quad (1.28)$$

1.7 Fonction de transfert

La détermination de la fonction d'amplification ou fonction de transfert d'un profil de sol permet de mettre en évidence le comportement de ce dernier vis-à-vis d'une excitation sismique générée à sa base. La fonction d'amplification donne une présentation graphique des informations qualitatives

Chapitre 1 : Caractérisation du mouvement et réponse sismique d'un profil de sol

concernant l'effet du sol. A partir de cette courbe on peut déduire le contenu fréquentiel du sol. Par conséquent, les sites néfastes sur les ouvrages érigés à leurs surfaces.

Il s'agit de déterminer les caractéristiques du mouvement sismique au voisinage de la surface libre qui sont nécessaires au dimensionnement des ouvrages de Génie Civil.

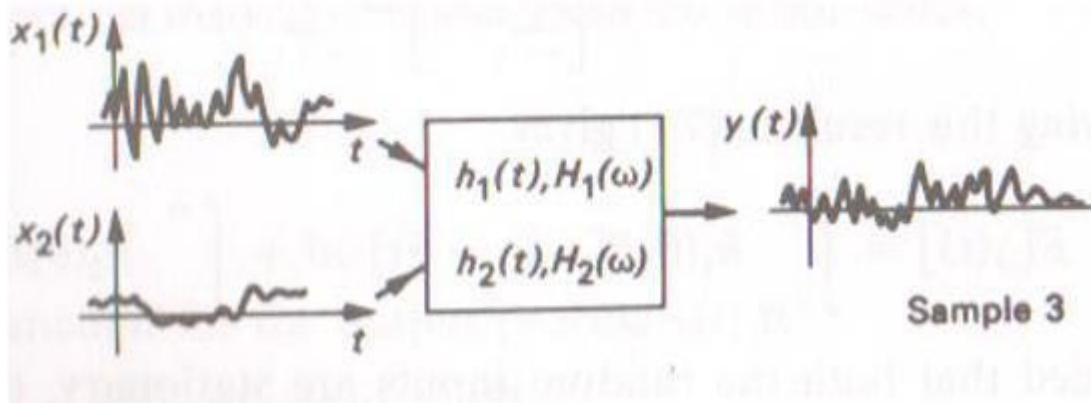


Figure 1-8: Représentation de la fonction de transfert.

1.7.3 Calcul du mouvement sismique du sol à partir d'une excitation générée au niveau du substratum rocheux.

L'excitation dépend essentiellement de la nature du sol. Celle-ci est en fait la réponse du sol en surface libre soumis à l'onde sismique générée au niveau du substratum rocheux. Elle peut être utilisée comme une excitation sismique agissant à la base d'un ouvrage.

1.7.4 Calcul du spectre de Fourier au niveau d'une couche donnée d'un profil de sol

L'accélérogramme est un enregistrement de l'accélération du mouvement du sol dans une direction donnée en fonction du temps, à partir duquel on ne peut déterminer que l'accélération maximale du sol ainsi que la durée du mouvement. Cependant, ces deux paramètres ne sont pas suffisants pour prédire le comportement sismique de l'ouvrage dont on connaît la fréquence de vibration.

De ce fait, une représentation du mouvement du sol en domaine fréquentiel est nécessaire pour la détermination de la fréquence prédominante de ce signal, ainsi que la gamme de fréquences pour laquelle les amplitudes des mouvements sont amplifiées.

Le spectre de Fourier d'une fonction $f(t)$ peut être déterminé au moyen de la transformée de Fourier donnée par la formule suivante :

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1-29)$$

Et son inverse par :

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (1-30)$$

On peut écrire (II- 26) sous la forme suivante :

$$F(\omega) = E(\omega) e^{-i\phi(\omega)t} = C(\omega) - iS(\omega) \quad (1-31)$$

$$\text{Avec } E(\omega) = \sqrt{(C(\omega))^2 + (S(\omega))^2} \quad (1-32)$$

$E(\omega)$: Représente l'amplitude de Fourier

1.7.5 Spectre de réponse

Le spectre de réponse permet de caractériser un séisme d'après la réponse maximale d'un oscillateur simple à un degré de liberté. Cet oscillateur est caractérisé par une période et un pourcentage d'amortissement critique.

1.8 Définition du point de contrôle

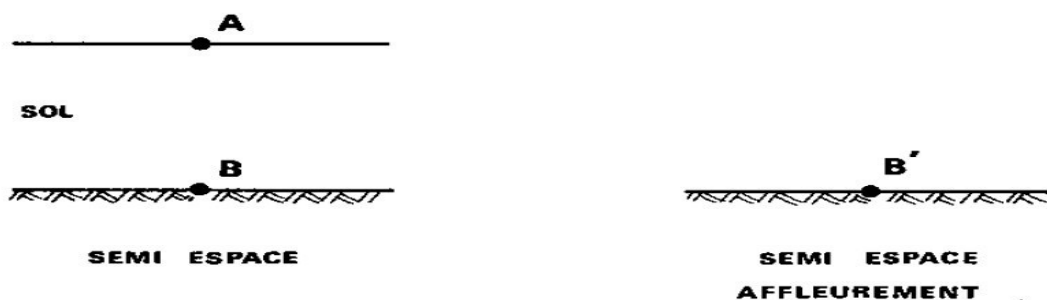


Figure 1-9: Définition du point de contrôle.

La réponse du profil de sol doit être évaluée à partir de la connaissance du mouvement sismique en un point de site. En ce point, généralement situé à la surface du sol ou à un affleurement rocheux, le mouvement a été soit enregistré dans le cas de calculs a posteriori, soit estimé (séisme de projet)

Chapitre 1 : Caractérisation du mouvement et réponse sismique d'un profil de sol

dans la majeure partie des cas. Rappelons que le mouvement, qu'il soit défini en A ou B', doit être compatible avec les caractéristiques des sols sous-jacents : mouvement de sol pour le point A, mouvement de rocher pour le point B'.

1.8.1 Effets de site.

L'expérience montre que la distribution des accélérations dans une région n'est pas uniforme. Les couches de sols situées au-dessus du bedrock subissent leur propre excitation par le séisme et jouent un rôle de « filtre » pour les ondes transmises. Ce filtre est généralement un amplificateur. On note aussi que, toutes fréquences confondues, les zones d'irrégularité géométrique de la surface du sol sont le siège d'amplification des mouvements du sol.

1.9 Conclusion

Quelques notions de sismologie fondamentales pour la caractérisation du mouvement sismique ont été présentées dans ce chapitre. Ces notions sont les outils de base pour établir les fondements mathématiques des formalismes de propagation des ondes. Les équations d'équilibre définies pour un état élastodynamique et le recours à la décomposition vectorielle d'Helmholtz nous ont permis de découpler le mouvement par le biais des potentiels scalaires et vectoriels. La propagation des ondes sismiques dans le sol en fonction des caractéristiques dynamiques de l'input nous permet de comprendre les modifications apportées aux mouvements du sol dues à ses propriétés [29]. Parmi, ces dernières on observe le phénomène d'amplification de site qui sera traité dans le chapitre 2.

Chapitre2

Chapitre 2: Approche en temps discrets de l'amplification sismique de site(ASS) dans les sols élastiques et viscoélastiques sous des ondes SH incidentes obliquement

2.1 Introduction

Certaines secousses telluriques, par les vibrations qu'elles provoquent, entraînent des phénomènes d'amplification du mouvement sismique allant jusqu'à multiplier la vibration en surface par plusieurs fois la vibration du substrat rocheux. La description et l'étude du comportement du sol face à des sollicitations dynamiques est une étape importante dans la compréhension de l'effet de site.

Dans ce chapitre, nous allons examiner la propagation verticale de l'onde SH dans des sols élastiques et viscoélastiques sur le substratum rocheux et à l'affleurement rocheux. Et la méthode sera étendue à l'amplification sismique de site sous incidence d'ondes SH non verticale. Ceci peut être réalisé pour n'importe quel angle d'incidence en redéfinissant simplement les propriétés de dépôt du sol.

2.2 Approche temporelle discrète

L'approche temporelle discrète est plus naturelle, car tous les enregistrements bruts sont en temps discret. De plus, la technique du temps discret offre une meilleure compréhension physique du problème. Elle se traduit par des modèles analytiques commodes pour l'amplification du site. Ces modèles présentent des avantages importants :

Ils utilisent les paramètres physiques du site, y compris l'amortissement dû à un frottement solide (c'est-à-dire une atténuation Q) ;

Les amplitudes ainsi que les caractéristiques de phase du site sont comptabilisées dans les modèles ;

Les modèles peuvent intégrer plusieurs réflexions d'ondes dans la couche ;

Et donnent lieu à des filtres récursifs du domaine temporel simple pour simuler des mouvements au sol.

Chapitre 2: Approche en temps discrets de l'amplification sismique de site (ASS) dans les sols élastiques et viscoélastiques sous ondes SH incidentes obliquement.

Pour une seule couche de sol sur un substrat rocheux soumis à des ondes de propagation verticale, le modèle est exact et n'utilise que trois paramètres.

Les modèles de temps discrets fournissent également des outils pour :

- 1) Utiliser des techniques de vibration aléatoire,
- 2) Etudier la sensibilité des spectres de réponse aux paramètres physiques de site ;
- 3) Identifier les paramètres physiques du site à partir des mouvements enregistrés.

2.3 Amplification sismique de site dans les sols élastiques et viscoélastiques

L'amplification sismique de site est étudiée par l'approche temporelle-discrète. En prenant en compte la propagation de l'onde SH incidente verticale ($\alpha_2=\alpha_1=0^\circ$) à travers des modèles de sol

- 1) Élastique et
- 2) Viscoélastique.

Ces dépôts de sol recouvrent un substratum rocheux. Deux cas sont considérés le substratum rocheux et l'affleurement rocheux.

2.3.1 Amplification sismique de site dans les sols élastiques

La description du comportement du sol est donnée par la théorie de l'élasticité. Dans ce cas, de tels matériaux considérés homogènes élastiques et linéaires, les ondes de contraintes de cisaillement se déplacent indéfiniment sans changement d'amplitude.

Nous décrirons les équations en deux étapes : d'abord en ne supposant qu'aucun amortissement dans le sol, y compris l'amortissement en raison de la friction interne (Q-damping).

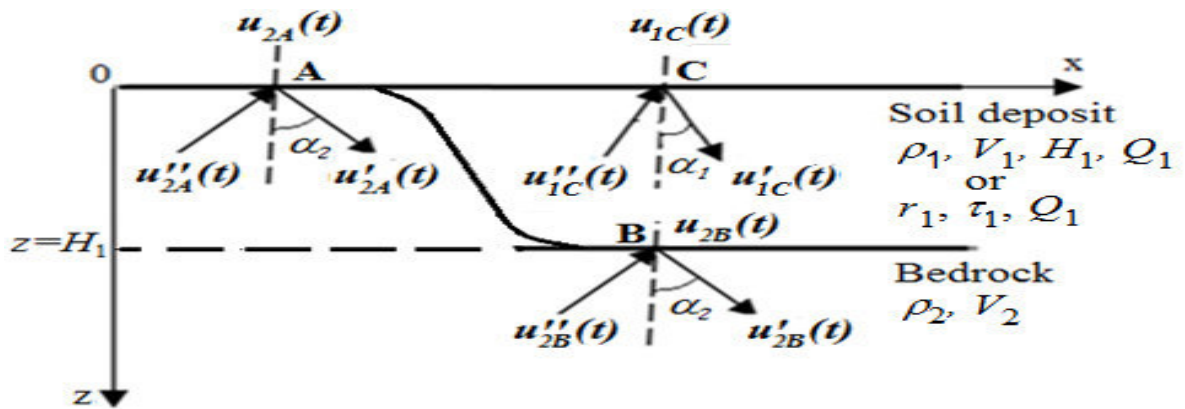


Figure 2-1 : Ondes obliques incidentes et réfléchies dans une couche de sol viscoélastique recouvrant le substrat rocheux.

La figure 2.1 ci-dessus, montre une couche de sol recouvrant le substratum rocheux sur le côté droit et un affleurement rocheux sur le côté gauche. A droite, les ondes SH obliques, partant de l'interface du substratum rocheux, vers le haut sont filtrées par les couches du sol, en transformant le mouvement du substratum rocheux $u_{2b}(t)$ en vibration de surface $u_{1c}(t)$.

A gauche, les ondes SH obliques ascendantes, se propageant de la source sismique, et atteignent la surface de l'affleurement comme $u_{2A}(t)$ sont modifiées uniquement par la réflexion de la surface libre. Les notations double prime (‘’) et une seule prime (‘) sont respectivement associées aux ondes incidentes et aux ondes réfléchies. L'interface du substratum-sol est localisée à $z = H_1$. Les indices 1 et 2 des angles d'incidence α_1 et α_2 se réfèrent à la couche du sol et à la roche, respectivement.

2.3.2 Cas de substratum rocheux

En appliquant les règles de transmission et de réflexion de la propagation verticale des ondes [30] pour le dépôt du sol de la figure 3.1, on peut alors montrer [31] que le mouvement du substratum rocheux U_{2B} (peut être lié à la vibration de surface U_{1C} à travers le filtre récursif suivant le domaine temporel.

$$u_{1c}(t) + u_{1c}(t - 2\tau) = 2u_{2B}(t - \tau) \quad (2.1)$$

Chapitre 2: Approche en temps discrets de l'amplification sismique de site (ASS) dans les sols élastiques et viscoélastiques sous ondes SH incidentes obliquement.

Dans laquelle $\tau = \frac{H_1}{V_1}$, est le temps de propagation des ondes unidirectionnelles dans le sol.

L'équation (2.1) utilise un seul paramètre, τ , et est exacte pour une couche de sol élastique, homogène reposant sur un socle rigide soumis à des ondes SH se propageant verticalement.

En prenant les transformées de Fourier des deux côtés de l'équation (2.1), et en désignant la transformée de Fourier de $U_{1C}(t)$ et $U_{2B}(t)$ par $U_{1C}(f)$ et $U_{2B}(f)$ respectivement, on obtient la fonction de transfert du socle :

$$H_B(f) = \frac{U_{1C}(f)}{U_{2B}(f)} = \frac{2e^{-i2\pi f\tau}}{1 + e^{-i4\pi f\tau}} \quad (2.2)$$

Dont l'amplitude est la suivante :

$$|H_B(f)| = \frac{1}{|\cos(2\pi f\tau)|} \quad (2.3)$$

Conduisant à des fréquences de résonance $f_k = k/4\tau = kV_1/4H_1$ où $k = 1, 3, 5, \dots$

Il est important de noter que la fonction de transfert $H_B(f)$ ne dépend pas des propriétés du substratum rocheux sous-jacent. Il correspond à l'hypothèse d'un substrat rocheux infiniment rigide où le déplacement est imposé (effet de table vibrante). Cette fonction devient infinie pour les fréquences de résonance f_k , comme cela est illustré par les lignes fines tracées sur la Fig. 2 en supposant un comportement élastique pour le modèle de couche de sol du site du Centre culturel d'El -Asnam. Les caractéristiques du modèle du profil de sol, formulées sur la base des essais sur le terrain et des analyses en laboratoire, sont : $\rho_1 = 1,65 \text{ g / cm}^3$, $V_1 = 300 \text{ m/s}$ et $H_1 = 11 \text{ m}$ pour le dépôt du sol, et $\rho_2 = 2.4 \text{ g / cm}^3$, $V_2 = 900 \text{ m / s}$ pour la roche sous-jacente, conduisant à $\tau \cong 0.04 \text{ s}$ dans la couche de sol.

2.3.3 Affleurement rocheux

On peut facilement montrer que le filtre récursif pour calculer les mouvements de surface du sol $u_{1c}(t)$ à partir des mouvements de surface de l'affleurement rocheux $Uu_{2A}(t)$ s'écrit :

$$u_{1c}(t) = -ru_{1c}(t - 2\tau) + (1 + r)u_{2A}(t - (\tau - \tau_R)) \quad (2.4)$$

Eq. (2.4) utilise seulement deux paramètres, r et τ_R :

Où $r = \frac{\rho_2 V_2 \cos \alpha_2 - \rho_1 V_1 \cos \alpha_{12}}{\rho_2 V_2 \cos \alpha_2 + \rho_1 V_1 \cos \alpha_1} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1}$ (Puisque $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$), est le coefficient de réflexion

des ondes ascendantes dans la couche et $\tau_R = \frac{H_1}{V_2}$ est le temps de déplacement unidirectionnel des

ondes de cisaillement ascendantes dans la roche de $z = H_1$ à $z = 0$. La fonction de transfert $H_A(f)$ du dépôt de sol peut être obtenue en prenant les transformées de Fourier des deux côtés de l'équation (2.4) :

$$H_A(f) = \frac{U_{1c}(f)}{U_{2A}(f)} = \frac{(1+r)e^{-i2\pi f(\tau-\tau_R)}}{1+re^{-i4\pi f\tau}} \quad (2.5)$$

Où $U_{1c}(f)$ et $U_{2A}(f)$ sont les transformées de Fourier de $U_{1c}(t)$ et $U_{2A}(t)$ respectivement. Il est à noter que le filtre récursif (Eq. 2.4) et la forme complexe de la fonction de transfert de site par rapport au cas de l'affleurement (Eq. 2.5) diffèrent des équations correspondantes dans la référence [22] par le terme τ_R associé au retard de phase dû à la propagation dans la roche. Cela peut être important lors de l'estimation des mouvements sismiques à la surface des dépôts de sols profonds qui recouvrent des sols mous.

L'amplitude de $H_A(f)$ calculée à partir de l'équation (2.5) écrit :

Chapitre 2: Approche en temps discrets de l'amplification sismique de site (ASS) dans les sols élastiques et viscoélastiques sous ondes SH incidentes obliquement.

$$|H_A(f)| = \frac{1+r}{|1+2r\cos(4\pi f\tau)+r^2|^{\frac{1}{2}}} \quad (2.6)$$

Tel qu'obtenu dans la même référence. En outre, on peut montrer que :

- $|H_A(f)|$ a ses pics aux mêmes fréquences que $|H_B(f)|$ cependant, contrairement à $H_B(f)$, les pics de la fonction de transfert $H_A(f)$ par rapport à l'affleurement sont maintenant finis à amplitude constante.

- l'amplification maximale peut être écrite comme :

$$|H_A(f)|_{max} = \frac{1+r}{1-r} = \frac{\rho_2 V_2}{\rho_1 V_1} = \frac{1}{R} \quad (2.7)$$

Où R représente le rapport d'admittance du sol (c'est-à-dire l'inverse du rapport d'impédance entre la roche et le sol).

- à partir des équations (2.4) et (2.6), un paramètre supplémentaire, le coefficient de réflexion r, est nécessaire pour calculer la fonction de transfert par rapport au cas de l'affleurement. Les paramètres τ et r sont liés aux emplacements et aux amplitudes des pics spectraux respectivement.

2.4 Extension de l'amplification de site sismique dans des sols viscoélastiques

La description du comportement du sol est donnée par la théorie de la viscoélasticité. Les amplitudes des ondes s'atténuent par la distance dans les matériaux réels, tels que ceux qui composent la terre, Cette atténuation peut être rapportée à deux sources, dont l'une concerne les matériaux à travers lesquels les ondes se déplacent et l'autre réside dans la géométrie du problème de propagation de l'onde.

Les ondes sismiques s'atténuent en se propageant dans les Couches de sol, en raison de l'amortissement dans le sol.

Dans des matériaux réels, une partie de l'énergie élastique de l'onde itinérante est toujours convertie en chaleur.

Chapitre 2: Approche en temps discrets de l'amplification sismique de site (ASS) dans les sols élastiques et viscoélastiques sous ondes SH incidentes obliquement.

La conversion s'accompagne d'une diminution de l'amplitude de l'onde. L'amortissement visqueux, en vertu de sa commodité mathématique, est souvent utilisé pour représenter cette dissipation de l'énergie élastique.

Aux fins de la propagation des ondes viscoélastiques, les sols sont généralement modélisés comme Kelvin-Voigt (i.e., Matériaux dont la résistance à la déformation par cisaillement est la somme d'une partie élastique et visqueuse).

2.4.1 Q-amortissement

L'atténuation est définie par le paramètre Q , connu sous le nom de facteur de qualité [32]. Q est une mesure de perte d'énergie par cycle pendant une déformation sinusoïdale (O'Connell et Budiansky 1978). Pour intégrer Q dans la propagation des ondes, la partie complexe de la vitesse est choisie de

telle sorte que $\frac{1}{Q} = \frac{2w}{v_s}$. Le rapport $1/Q$ est appelé Constante de dissipation, et représente

l'amortissement dans le sol. Avec cette définition – et notant que pour un mouvement unidirectionnel, dans une couche d'épaisseur h , $\frac{z}{v_s} = \frac{h}{v_s} = \tau$

Lors du passage d'une onde de cisaillement harmonique se propageant verticalement ($\alpha_2 = 0$), Le cycle fermé résultant de cette courbe, appelé boucle d'hystérésis, est caractérisé par le module de cisaillement μ et le facteur de qualité Q [32] :

$$Q = 1/(2\beta) \tag{2.8}$$

Qui mesure la perte d'énergie par cycle due au frottement du solide (β étant le ratio d'amortissement).

Dans cette formulation, un amortissement interne (appelé aussi amortissement matériel) est introduit en remplaçant le module de cisaillement réel μ_1 par sa contrepartie complexe μ_1^Q tel que [33] :

Chapitre 2: Approche en temps discrets de l'amplification sismique de site (ASS) dans les sols élastiques et viscoélastiques sous ondes SH incidentes obliquement.

$$\mu_1^Q = \mu_1(1 + 2i\beta) \quad (2.9)$$

En conséquence, la vitesse de l'onde SH V_1 est aussi remplacée par sa contrepartie complexe V_1^Q :

$$V_1^Q = \sqrt{\frac{\mu_1^Q}{\rho}} = V_1(1 + i\beta) \quad (2.10)$$

Cette représentation équivalente du comportement dissipatif des solides de Kelvin - Voigt est une simplification de la situation réelle, mais elle fournit un moyen simple et efficace de simuler la perte d'énergie due à la dissipation interne.

2.4.2 Cas du Substrat rocheux

En utilisant la vitesse d'onde de cisaillement complexe (Eq.2.10), on peut déterminer un nouveau temps complexe de propagation d'onde $\tau^Q = H_1/V_1^Q$ pour des valeurs réelles de Q (par exemple $Q >$

10), ceci peut être approximé par :

$$\tau^Q = \frac{2Q}{2Q+i} \tau \cong \left(1 - \frac{i}{2Q}\right) \tau \quad (2.11)$$

On peut donc évaluer la fonction de transfert viscoélastique $H_B^Q(f)$ des mouvements rocheux verticalement incidents en remplaçant τ^Q par τ dans l'équation (2.2), puis en utilisant l'approximation (2.11) comme suit :

$$H_B^Q(f) = \frac{2 e^{-i2\pi f \left(1 - \frac{i}{2Q}\right) \tau}}{1 + e^{-i4\pi f \left(1 - \frac{i}{2Q}\right) \tau}} \quad (2.12)$$

Dont l'amplitude est donnée par :

Chapitre 2: Approche en temps discrets de l'amplification sismique de site (ASS) dans les sols élastiques et viscoélastiques sous ondes SH incidentes obliquement.

$$|H_B^Q(f)| = \frac{2 \varepsilon^{-\pi f \frac{\tau}{Q}}}{\left| 1 + 2 \cos(4\pi f \tau) \varepsilon^{-2\pi f \frac{\tau}{Q} + \varepsilon^{-4\pi f \frac{\tau}{Q}}} \right|^{1/2}} \quad (2.13)$$

Contrairement à la fonction de transfert élastique (Eq.2.3) qui devient infini pour les fréquences de résonance f_R , on voit à partir de la Fig.3.2, que la fonction de transfert viscoélastique (ligne pleine en gras) a maintenant des valeurs finies, mais en raison de l'amortissement dans le sol, les amplitudes de pic décroissent avec la fréquence croissante.

2.4.3 Affleurement rocheux

D'après Safak [22], on peut montrer que pour $|r| \leq 1$ et des valeurs réalistes de Q (par exemple $Q > 10$), en supposant que $1/4Q \approx 0$, l'amplitude de la fonction de transfert, y compris l'amortissement dû au frottement du solide, peut être écrite comme :

$$|H_A^Q(f)| = \frac{(1+r) \varepsilon^{-\pi f \frac{\tau}{Q}}}{\left| 1 + 2r \cos(4\pi f \tau) \varepsilon^{-2\pi f \frac{\tau}{Q} + r^2 \varepsilon^{-4\pi f \frac{\tau}{Q}}} \right|^{1/2}} \quad (2.14)$$

De nouveau, on observe à partir de la Fig. 2 (ligne en pointillés gras), en raison de l'amortissement, les amplitudes de pic (calculées pour $\alpha_2 = 0$) diminuent maintenant avec la croissance de la fréquence mais avec des valeurs de pic beaucoup plus petites que dans le cas de la roche mère.

Il est très important de noter que l'équation (2.14) se réduit à l'équation (2.13) pour $r \rightarrow 1$ (c'est-à-dire pour le cas de roche rigide). Dans ce cas, le contraste entre les caractéristiques du substratum sous-jacent et la couche du sol devient très important et l'onde réfléchie descendante de la couche de sol est moins absorbée par le substratum sous-jacent ; Finalement, elle est totalement réfléchie sur l'interface sol-roche et son énergie itinérante est piégée dans la couche de sol (comme c'est le cas par exemple dans un essai de table vibrante). Ceci contribue clairement à augmenter la réponse dans la couche de sol.

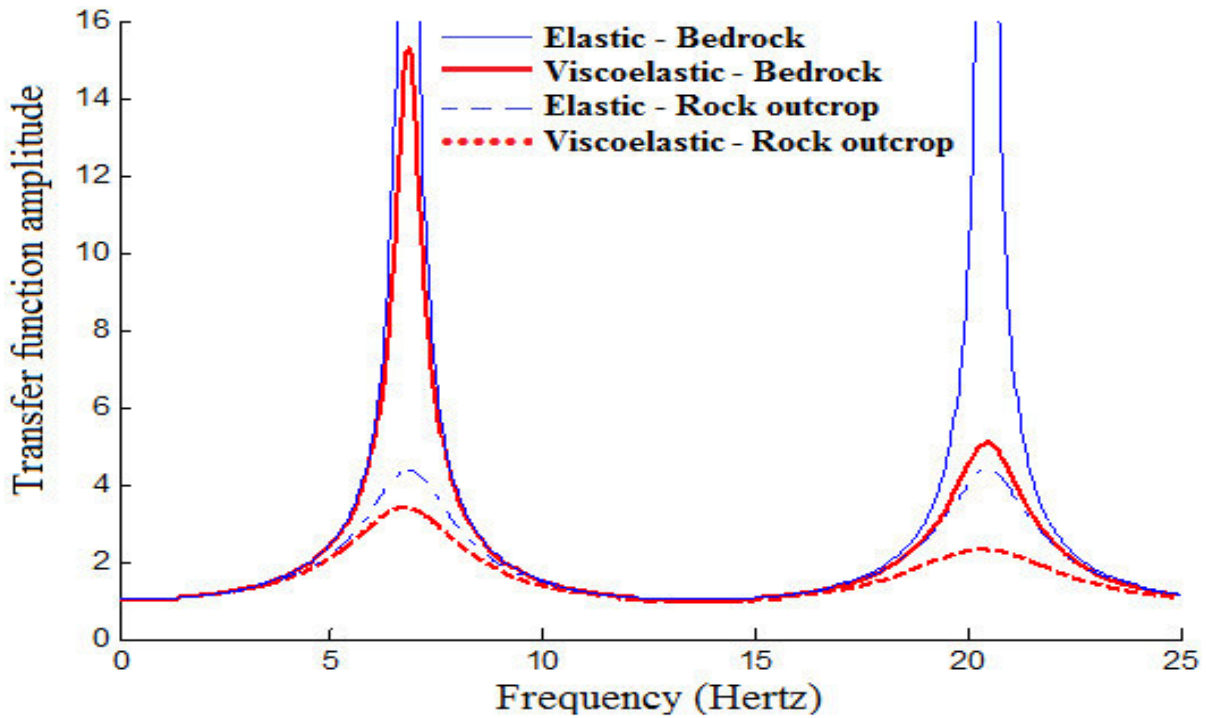


Figure 2-2 : Les fonctions de transfert du site du Centre Culturel El-Asnam pour $\alpha_2 = \alpha_1 = 0^\circ$, en supposant des modèles de sol élastique ($\tau = 0.04s$) et viscoélastique ($r = 0,62$, $\tau = 0.04s$ et $Q = 12$), pour un socle rigide et l'affleurement rocheux.

2.5 Modèle linéaire équivalent

Le modèle linéaire équivalent est basé sur le modèle rhéologique viscoélastique de Kelvin-Voigt. Le comportement viscoélastique linéaire est intermédiaire entre le comportement d'un solide élastique parfait et celui d'un liquide visqueux newtonien.

La loi de comportement la plus simple pour un sol sous sollicitation dynamique est le comportement viscoélastique linéaire. Les matériaux qui sont gouvernés par cette loi montrent des déformations directement proportionnelles à la contrainte appliquée (à la contrainte en cisaillement dans le cas de propagation unidimensionnelle des ondes de cisaillement).

Les modèles ainsi construits constituent un moyen commode et très utilisé pour représenter les différents comportements viscoélastiques linéaires du matériau.

Chapitre 2: Approche en temps discrets de l'amplification sismique de site (ASS) dans les sols élastiques et viscoélastiques sous ondes SH incidentes obliquement.

L'équivalence est fonction des caractéristiques du matériau suivant :

- Module de cisaillement
- Pourcentage d'amortissement critique β
- Pulsation propre
- Sollicitation harmonique

Ces modèles sont simples, ils ne nécessitent, pour des sollicitations unidirectionnelles que la valeur de deux paramètres :

- Le module de cisaillement G
- Le coefficient de perte η avec :

$$\eta = 2\beta \quad (2.15)$$

2.6 Propriétés équivalentes du sol

On peut, montrer que la solution du problème de propagation de l'onde SH 2-D avec une incidence non verticale est identique à la solution 1-D (Kausel et Roesset) [34] en remplaçant dans la couche de sol les propriétés réelles par les propriétés du sol équivalent définies ci-dessous :

$$V_{e1} = \frac{V_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 \sin^2 \alpha_2}} \quad (2.16)$$

$$\rho_{e1} = \rho_1 \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 \sin^2 \alpha_2\right) \quad (2.17)$$

Où V_{e1} et ρ_{e1} sont respectivement la vitesse équivalente des ondes et la masse volumique de la couche de sol, associées au modèle 1-D alors que V_1 et ρ_1 sont celles associées au modèle 2-D. On voit d'après les équations (2-16) et (2-17) que le module de cisaillement est constant par rapport à

Chapitre 2: Approche en temps discrets de l'amplification sismique de site (ASS) dans les sols élastiques et viscoélastiques sous ondes SH incidentes obliquement.

α_2 (c'est-à-dire $\mu_{e1} = \mu_1$). Il convient de noter que, bien que cette méthode soit simple, elle est exacte.

➤ Dans le cas d'un substratum rocheux rigide, $V_1 \ll V_2$ de sorte que $V_{e1} \cong V_1$, et aucun changement spectral ne soit pratiquement observé.

➤ Dans le cas de l'affleurement rocheux (ou substrat souple), $\frac{V_1}{V_2} < 1$ de sorte que

$\rho_{e1} \leq \rho_1$. Il s'ensuit que les pics d'amplification pour une incidence non verticale montre un déplacement vers les fréquences supérieures de l'ordre de $\frac{V_{e1}}{V_1}$.

En outre, on peut aisément montrer que l'amortissement efficace du rayonnement peut être exprimé comme suit :

$$\beta_e = \frac{1}{2} R_e = \frac{1}{2} \frac{R}{\cos \alpha_2} \quad (2.18)$$

Où R est le rapport d'admittance (c'est-à-dire l'inverse du rapport d'impédance roche-sol). L'équation (2.18) montre clairement que l'amortissement augmente avec l'augmentation des angles d'incidence. Les pics d'amplification par rapport à l'affleurement rocheux doivent alors diminuer approximativement d'un facteur de $\cos \alpha_2$.

Il convient également de souligner que, dans le cas des sols viscoélastiques, l'équation (2.18) doit être utilisée avec les expressions correspondantes des vitesses complexes des ondes de cisaillement

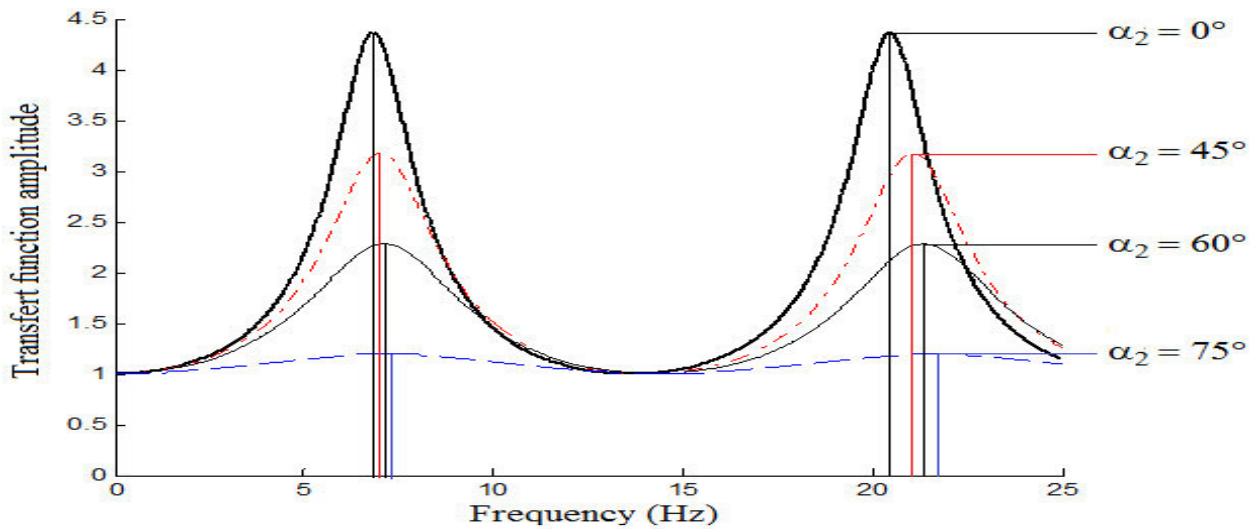


Figure 2-3 : Fonctions de transfert $H_A^Q(f)$ du site du Centre culturel El-Asnam en supposant un modèle de sol élastique ($r = 0.62$ et $\tau \cong 0.04$ s, $Q \rightarrow \infty$) pour différentes valeurs d'angle d'incidence α_2 .

2.7 Résultats

2.7.1 Amortissement de rayonnement

Pour donner un exemple illustrant ces points, les fonctions de transfert du sol de site du Centre culturel El-Asnam en ce qui concerne l'affleurement rocheux sont représentées sur la Fig 2-3 pour une valeur fixe de Q amortissement ($\beta = 0$, cas élastique) et cinq valeurs différentes de l'angle d'incidence $\alpha_2 = 0^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ et 90° .

Il est à noter que les pics d'amplitude diminuent avec un angle d'incidence croissant (c'est-à-dire avec des valeurs croissantes d'amortissement des rayonnements).

On note que les pics d'amplification maximum sont obtenus pour l'incidence verticale

$$(\alpha_2 = 0^\circ, \beta \rightarrow R/2).$$

Chapitre 2: Approche en temps discrets de l'amplification sismique de site (ASS) dans les sols élastiques et viscoélastiques sous ondes SH incidentes obliquement.

Au contraire les pics d'amplification calculés pour $\alpha_2 = 90^\circ$ sont complètement amortis, puisque dans ce cas, $\beta_\varepsilon \rightarrow \infty$.

Il est également important de noter que les pics d'amplification pour l'incidence non verticale montrent un déplacement vers les fréquences plus élevées. Ce décalage est plus prononcé pour les pics d'ordre supérieur. Cet amortissement est essentiellement différent de l'amortissement matériel rencontré dans l'étude du comportement du sol qui est lié au matériau, contrairement à l'amortissement des rayonnements résultant de la propagation de l'onde descendante vers l'infini

2.7.2 Q amortissement

Pour illustrer plus en détail les effets de l'amortissement Q, les fonctions de transfert du sol calculées pour une valeur fixe de l'angle d'incidence ($\alpha_2 = 0^\circ$) sont représentées graphiquement sur la Figure 2-4 pour quatre valeurs différentes du facteur de qualité Q correspondant respectivement aux valeurs d'amortissement $\beta = 0$ (élasticité), 0,01, 0,02 et 0,05.

On voit que les pics d'amplitude diminuent avec une fréquence croissante pour une valeur constante de Q. En fait, on peut montrer que les amplitudes de la fonction de transfert décroissent exponentiellement en raison de l'amortissement. Notez également que les pics d'amplitude, pour une fréquence fixe, diminuent avec des valeurs décroissantes de Q.

Chapitre 2: Approche en temps discrets de l'amplification sismique de site (ASS) dans les sols élastiques et viscoélastiques sous ondes SH incidentes obliquement.

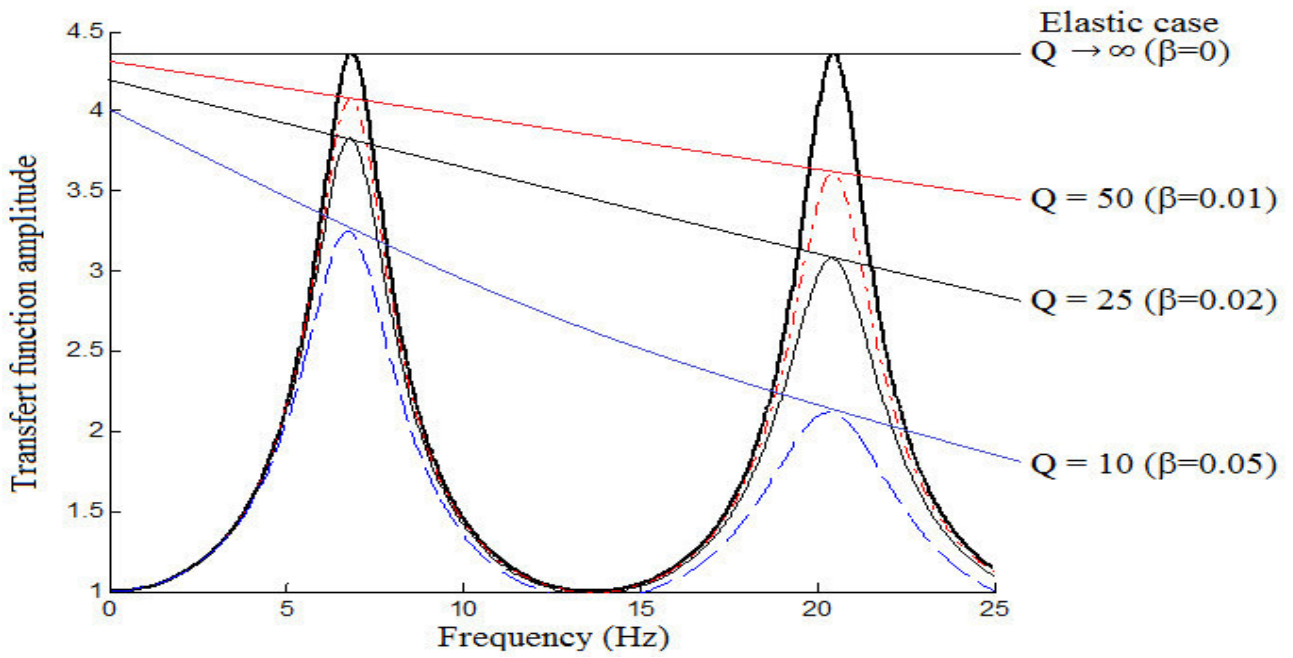


Figure 2-4: Fonctions de transfert $H_A^Q(f)$ du site du centre culturel El-Asnam pour $\alpha_2 = 0^\circ$, en supposant 1) modèle de sol élastique ($r = 0,62$, $\tau = 0,04s$, $Q \rightarrow \infty$) et 2) trois modèles de sols viscoélastiques ($r = 0,62$ - $\tau = 0,04$ s - $Q = 50, 25, 10$).

Chapitre 2: Approche en temps discrets de l'amplification sismique de site (ASS) dans les sols élastiques et viscoélastiques sous ondes SH incidentes obliquement.

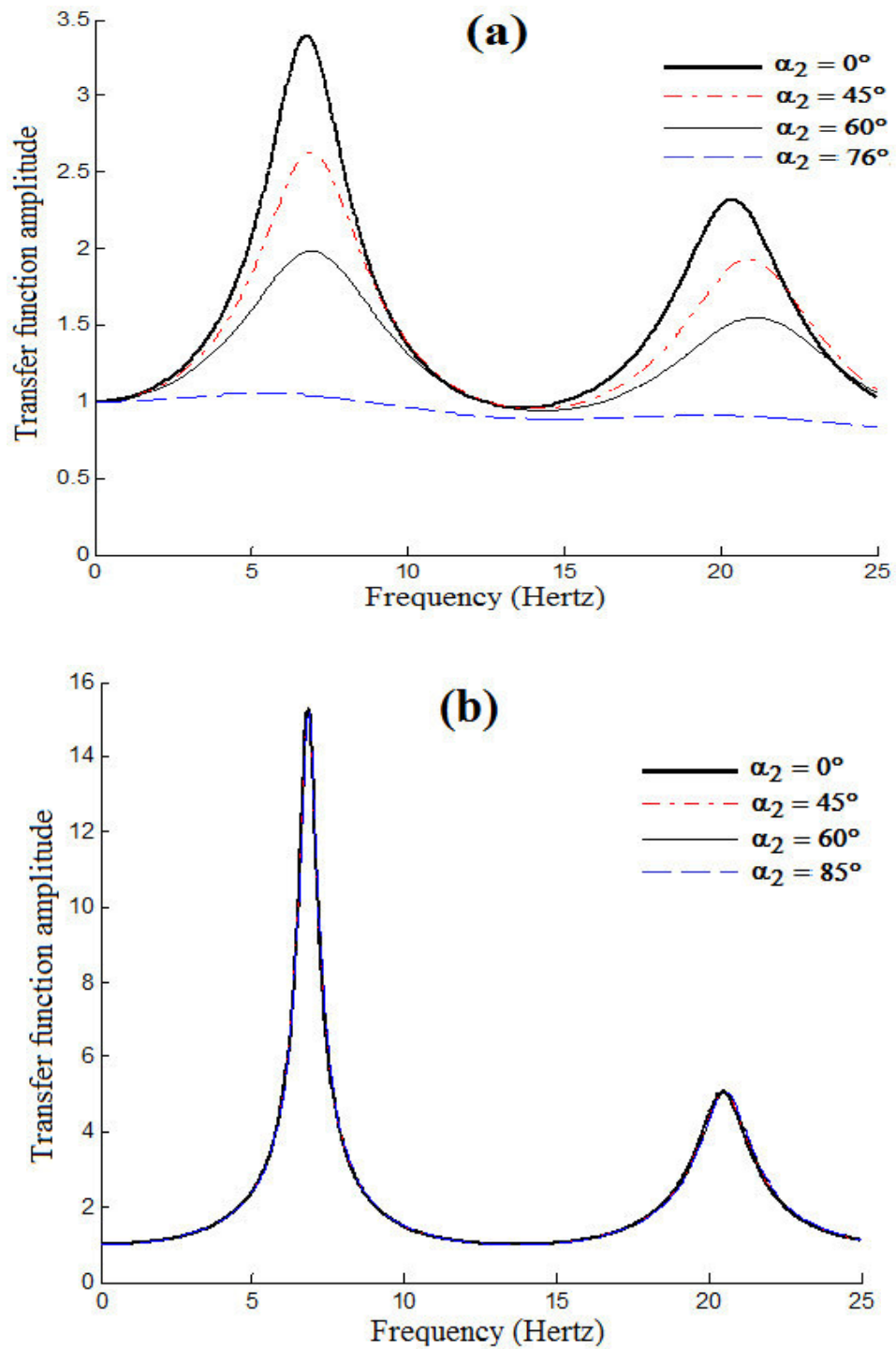


Figure 2-5 : Amplifications du site du centre culturel El-Asnam en supposant un modèle de sol viscoélastique pour divers angles d'incidence de l'onde SH par rapport à (a) affleurement, ($V_2 = 900$ m / s, $r = 0.62$ et $\tau = 0.04$ s et $Q = 12$), et b) la roche mère ($V_2 = 3000$ m / s, $r = 0,87$, $\tau = 0,04$ s et $Q = 12$).

This study $\alpha_2 = 45^\circ$

●●●● Thomson-Haskell method $\alpha_2 = 45^\circ$

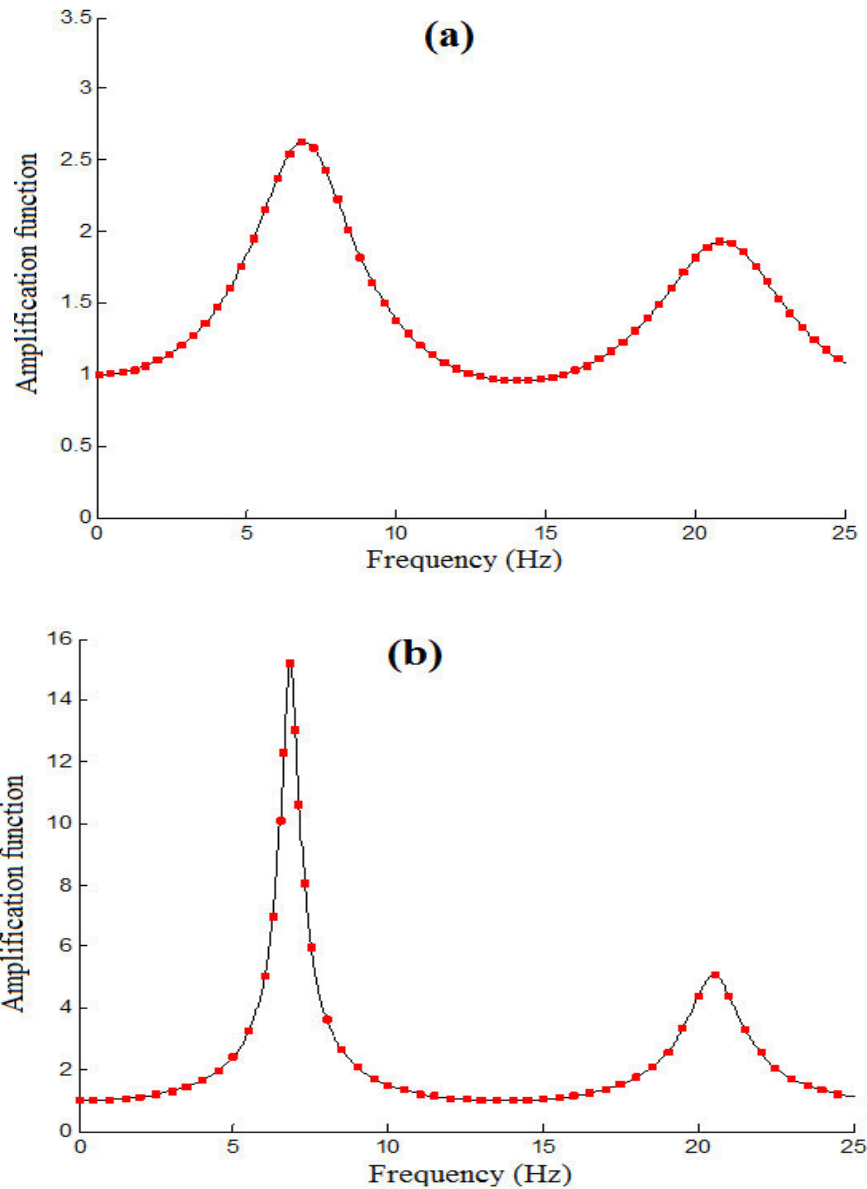


Figure 2-6: Amplification du site du centre culturel El-Asnam en supposant des modèles de sols viscoélastiques ($\tau_e = \tau_e(\alpha_2)$; $Q = 12$) pour l'angle d'incidence $\alpha_2 = \pi/4$, par rapport à (a) affleurement, et (b) substrat rocheux.

2.8 Effets de l'angle d'incidence sur les fonctions de transfert

Pour illustrer davantage les points développés ci-dessus, la figure 2-5 montre les fonctions d'amplification du site du profil de sol du Centre culturel évaluées pour un facteur de qualité estimé égal à 12 et pour deux valeurs de vitesse d'onde de cisaillement dans la roche: $V_2 = 900 \text{ m/s}$ (roche molle) et $V_2 = 300 \text{ m/s}$ (roche dure).

Les fonctions d'amplification de site sont calculées pour $\alpha_2 = 0,45^\circ, 60^\circ$ jusqu'à $\alpha_{2cr} = 76^\circ$ dans le premier cas et jusqu'à $\alpha_{2cr} = 85^\circ$ pour le second cas. La valeur d'angle critique α_{cr} est définie comme l'angle au-delà duquel l'amplitude du pic dominant (c'est-à-dire le premier résonant) de la fonction de transfert est inférieure à 1. Il s'ensuit qu'aucune amplification ne se produit pour des valeurs de $\alpha_2 > \alpha_{cr}$. Il est à noter que :

- En raison de l'augmentation de l'amortissement de rayonnement efficace avec un angle d'incidence croissant l'équation (2-16), les pics d'amplification par rapport à l'affleurement rocheux (figure 2-5a) diminuent approximativement d'un facteur $\cos \alpha_2$.
- La dépendance des fonctions d'amplification de l'angle d'incidence est reflétée par un changement d'axe de fréquence.
- Pour les mêmes raisons, les pics des fonctions de transfert par rapport au substratum rocheux (figure 2-5b) ne changeraient essentiellement pas ($\beta_s \rightarrow 0$), mais se déplacent simplement. En raison de la grande différence de propriétés entre le sol et la roche sous-jacente, le changement de fréquence des pics est très faible (effet de groupement).

On peut donc conclure que l'effet de l'angle d'incidence sur l'amplification par rapport au substratum rocheux est négligeable alors que l'effet sur l'amplification par rapport à l'affleurement peut être important. En outre, et pour des raisons de vérification de précision, les figures (2-6a) et (2-6b) montrent les amplitudes de la fonction de transfert par rapport à l'affleurement rocheux et au substratum rocheux, toutes deux calculées pour $\alpha_2 = \pi/4$, en supposant le modèle de sol

Chapitre 2: Approche en temps discrets de l'amplification sismique de site (ASS) dans les sols élastiques et viscoélastiques sous ondes SH incidentes obliquement.

viscoélastique. Sur ces figures sont également superposées en pointillés les fonctions de transfert correspondantes évaluées, pour le même angle d'incidence, en utilisant la technique exacte de Thomson-Haskell[35]. On voit que les résultats sont en parfait accord.

2.9 Conclusion

On observe que l'effet de l'angle d'incidence sur l'amplification par rapport au substrat rocheux est négligeable alors que l'effet sur l'amplification par rapport à l'affleurement peut être important.

On distingue, que les amplitudes de la fonction de transfert par rapport à l'affleurement rocheux et au substratum rocheux, toutes deux calculées pour $\alpha_2 = \pi/4$, en supposant le modèle de sol viscoélastique et les fonctions de transfert correspondantes évaluées, pour le même angle d'incidence, en utilisant la technique exacte de Thomson-Haskell [35] sont en parfait accord.

Cependant, il convient de souligner que la mise en œuvre de l'approche par temps discret pour les sites de sols multicouches est assez compliquée et laborieuse. Les équations récursives à temps discret sont d'intérêt historique [23]; Cependant, ils sont de valeur limitée dans des arrangements réalistes tels que des sites multicouches. Pour des études d'amplification du site sismique dans un sol multicouche sous des ondes incidentes obliques, diverses procédures numériques [17,18, 19, 21] peuvent être utilisés. Dans ce qui suit, la méthode largement utilisée Thomson-Haskell [35] sera le choix préféré.

Chapitre3

Chapitre 3: Approche en fréquence discrète de l'ASS dans des sols multicouches viscoélastiques

3.1 Introduction

La formulation analytique de l'amplification de site bidimensionnelle des ondes sismiques de cisaillement à propagation non verticale est présentée dans ce chapitre pour le cas de dépôts de sol multicouche élastique horizontal. Ensuite, des modifications appropriées dans la formulation vont être apportées pour tenir compte des propriétés viscoélastiques du sol. L'amplification de site incluant l'amortissement Q dû au frottement solide et l'amortissement radiatif efficace dû à la variation de l'angle d'incidence de l'onde sont considérés. On examine les cas du substratum rocheux et de l'affleurement rocheux.

3.2 Amplification de site dans des sols élastiques stratifiés sous des ondes SH non verticales

3.2.1 Présentation de la méthode de Thomson -Haskell

Les excitations sismiques sont une source d'ondes qui se propagent dans le sol. En conséquence, à la structure complexe du milieu, la propagation d'ondes est accompagnée par des phénomènes de réflexion, de réfraction, de diffraction et de dispersion qui sont difficiles à quantifier. En général, la complexité de ces phénomènes est telle qu'on est amené à examiner individuellement chaque cas et un recours à des méthodes numériques est souvent nécessaire.

Le phénomène de propagation d'ondes sismiques dans un sol stratifié reposant sur un substratum est analysé en utilisant la matrice de transfert dans le domaine des fréquences- nombre d'ondes.

Il s'agit d'une méthode matricielle qui introduit un vecteur d'état S ayant pour composantes toutes les quantités scalaires qui figurent dans les conditions de continuité : composantes de déplacement, composantes de contraintes qui s'exercent sur la frontière plane d'une couche de rang n .

3.2.2 Formulation de la méthode de Thomson -Haskell

Considérons le système stratifié illustré par la figure (3.1) et pour lequel, des ondes incidentes se propagent dans le demi-espace. Les interfaces entre couches sont imposées par les discontinuités matérielles du système étudié.

Soit S_n le vecteur d'état correspondant à la couche de rang n . En passant du sommet (de côté $z = z_{n-1}$) de cette couche au sommet (de côté $z = z_n$) de la couche sous-jacente de rang $n+1$, on obtient pour les vecteurs S_n et S_{n+1} une relation linéaire définie par la matrice de transfert G_n

$$S_{n+1}(z_n) = G_n S_n(z_{n-1}) \quad (3.1)$$

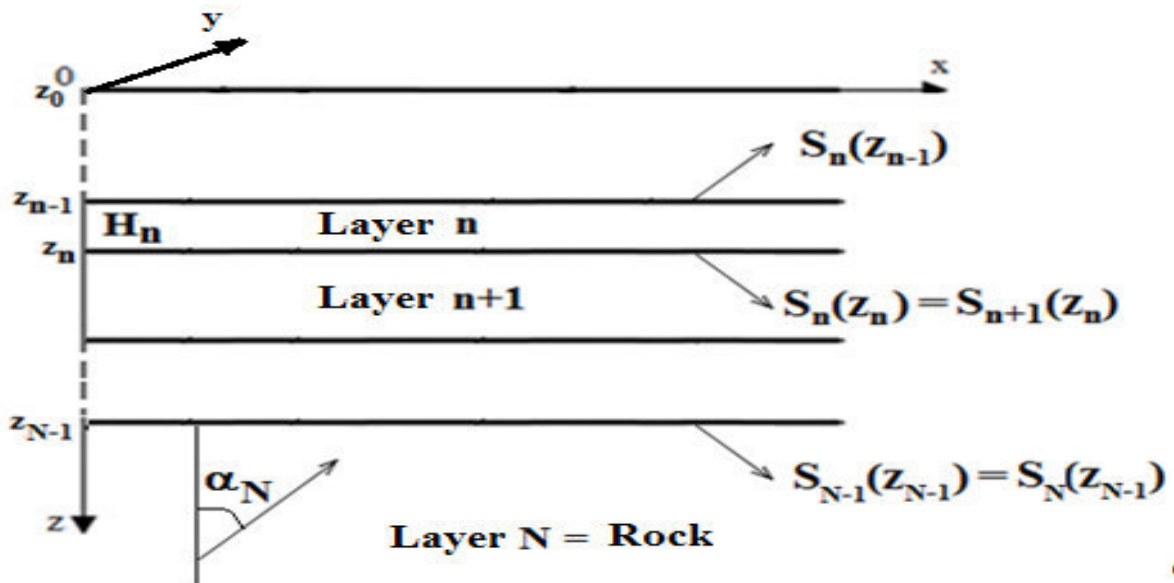


Figure 3-1 : Représentation des vecteurs états S_n et S_{n+1} associés au $n^{\text{ième}}$ et $(n + 1)^{\text{ième}}$ couches du système de sol élastique à plusieurs couches.

La propagation des mouvements anti-plans dans la $n^{\text{ième}}$ couche d'un sol stratifié horizontalement dans des conditions de déformation plane, se caractérise par l'équation d'onde (avec $u_n \equiv u_{ny}$)

$$\frac{\partial^2 u_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_n}{\partial z^2} = \frac{1}{v_n^2} \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} \quad (3.2)$$

En sachant que le champ de déplacement total à l'intérieur de la couche d'épaisseur $H_n = Z_n - Z_{n-1}$ est la superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchie.

Les solutions de cette équation pour le mouvement harmonique en régime stationnaire représentent des ondes SH harmoniques planes et sont de la forme :

$$u_n = [A_n'' \exp(-ip_n z) + A_n' \exp(ip_n z)] \exp(-ik_n x) \exp(i\omega t) \quad (3.3)$$

Où $P_n = \frac{2\pi f \cos \alpha_n}{v_n}$, $K_n = \frac{2\pi f \sin \alpha_n}{v_n}$ sont les nombres d'onde et A_n' et A_n'' représentent les amplitudes des ondes incidente et réfléchie respectives.

Puisque le facteur exponentiel ($k_n x$) est le même dans toutes les couches en raison de la loi de Snell (et donc on peut le faire sortir), il en résulte que le terme entre parenthèses dans ($p_n z$) est

identique à la solution du problème de propagation de l'onde bidimensionnelle avec une incidence non verticale, ce qui peut être systématiquement réalisé en utilisant l'approche de matrice de transfert telle que résumée ci-dessous et où le facteur $\exp(-i\omega t)$ est omis pour des raisons de commodité.

En utilisant la solution entre parenthèses dans l'équation (3.3), il peut être démontré que les états vecteurs S_n et S_{n+1} associé à la $n^{\text{ième}}$ et $(n+1)^{\text{ième}}$ couches du système de sol élastique multicouche (voir Figure 3.1) peuvent être facilement associés par l'équation (3.1).

Où

$$S_n(Z_{n-1}) = \begin{pmatrix} u_n \\ \mu_n \frac{\partial u_n}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_n' + u_n'' \\ \mu_n p_n (u_n' - u_n'') \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Est le vecteur des déplacements et contraintes à la $n^{\text{ième}}$ interfaces, appelée le ‘vecteur d’état’

et G_n est une matrice de transfert fonction uniquement des propriétés élastiques et géométriques de la $n^{\text{ième}}$ couche à l’étude, la fréquence d’excitation ω et le paramètre directionnel α_n de l’onde

incidente. La matrice de transfert G_n est exprimée comme suit :

$$G_n = \begin{bmatrix} \cos (P_n H_n) & i(\mu_n P_n)^{-1} \sin (P_n H_n) \\ i\mu_n P_n \sin (P_n H_n) & \cos (P_n H_n) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Où H_n est la hauteur de la $n^{\text{ième}}$ couche et Δx_n la distance relative parcourue par l’onde entre le haut et le bas de la $n^{\text{ième}}$ couche.

Dans le cas d’un système de sol multicouche avec N-1 couches au-dessus d’un point de contrôle (substrat rocheux ou affleurement rocheux), il résulte de l’équation (3.4) :

$$S_N(z_{N-1}) = G_{N-1} G_{N-2} \dots \dots \dots G_2 G_1 \begin{pmatrix} u_{1c}(z_0) \\ 0 \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} u_{1c}(z_0) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Où

$$T = G_{N-1} G_{N-2} \dots \dots \dots G_2 G_1 = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} e^{-ik_n \sum_{n=1}^{N-1} \Delta x_n} \quad (3.7)$$

3.2.3 Cas du Substratum

Le mouvement du substratum rocheux est défini comme étant le mouvement

$$u_{NB}(z_N) = u'_{NB}(z_N) + u''_{NB}(z_N) \text{ à l'interface sol-rocher } (z = z_N).$$

Pour obtenir la relation entre les mouvements du substratum rocheux et les mouvements à la surface du sol ($z = z_0$), Equations (3. 6) et (3. 7) peuvent être utilisées, ce qui conduit à :

$$u_{NB}(z_N) = T_{11} u_{11}(z_0) \quad (3.8)$$

(En supposant qu'il n'y ait pas d'amortissement dans le sol). En prenant la transformée de Fourier des deux côtés de l'équation (3.8) et désignant les transformées de Fourier $u_{1C}(z_0)$ et $u_{NB}(z_N)$ en $U_{1C}(f)$ et $U_{NB}(f)$ respectivement, conduit à la fonction de transfert du sol $H_B(f)$ par rapport au

substratum :

$$H_B(f) = \frac{U_{1C}(f)}{U_{NB}(f)} = \frac{1}{T_{11}} e^{-ik_n \sum_{n=1}^{N-1} \Delta x_n} \quad (3.9)$$

$H_B(f)$ est la fonction de transfert qui relie dans le domaine fréquentiel, les mouvements de surface du sol multicouche aux mouvements à l'interface entre le dépôt de sol multicouche et le substrat rocheux (en supposant pas d'amortissement dans le sol).

3.2.4 Cas de l'affleurement rocheux

Sur la base des équations (3.6) et (3.7) et après quelques calculs, la relation entre les transformées de Fourier $U_{1C}(f)$ et $U_{NA}(f)$ du déplacement en champ libre $u_{1C}(z_0)$ et le

déplacement à l'affleurement rocheux respectivement, peut être écrite comme :

$$H_A(f) = \frac{U_{1C}(f)}{U_{NA}(f)} = \frac{1}{T_{11} - T_{21} \frac{1}{\mu_N P_N}} e^{-ik_n \sum_{n=1}^{N-1} \Delta x_n} \quad (3.10)$$

$H_A(f)$ est la fonction de transfert qui relie dans le domaine de fréquence, les mouvements de surface du sol multicouche aux mouvements à la surface de l'affleurement rocheux (en supposant pas d'amortissement dans le sol).

3.3 Amplification de site dans des sols viscoélastiques stratifiés sous des ondes SH non verticales

Afin de clarifier les notations des paramètres du modèle et des données (input motion) - résultats (output motion) des mouvements, considérons un dépôt de sol à couches multiples, avec $(N - 1)$ couches infinies dans la direction horizontale, recouvrant le substrat rocheux sur le côté droit et l’affleurement rocheux du côté gauche, schématisé sur la Fig. 3-2.

Les paramètres ρ_n, V_n, Q_n et H_n ($n = 1, 2, \dots, (N-1)$) représentent respectivement la masse volumique, la vitesse des ondes de cisaillement, le facteur de qualité (cf. paragraphe 2.7.2) et la hauteur de la $n^{\text{ième}}$ couche délimitée par des interfaces horizontales au niveau supérieur z_{n-1} et le niveau inférieur z_n .

Sur le côté droit, les ondes SH montantes obliquement de l’interface sol-rocher avec un angle d’incidence α_N , sont filtrés par le sol multicouche, transformant le mouvement du substratum rocheux $u_{NB}(z_N, f)$ en vibration horizontale de surface $u_{1C}^Q(z_0, f)$.

Sur le côté gauche, les ondes SH se propagent en oblique à partir de la source sismique et atteignent la surface de l’affleurement comme $u_{NA}(z_0, f)$ comme, qui n’est modifiée que par la réflexion de la surface libre.

Les notations double prime (‘’) et simple prime (‘) sont respectivement associés aux ondes incidentes et aux ondes réfléchies. L’interface du substratum rocheux est située à la profondeur $z_{N-1} = \sum_{n=1}^{N-1} H_n$. Les indices 1 et N des angles d’incidence se réfèrent respectivement à la couche de sol et à la roche.

3.3.1 Amplification du site par rapport au substrat rocheux

En remplaçant les équations (3.1) à (3.9), le module de cisaillement réel μ_n et la vitesse des ondes SH de chaque couche par leurs équivalents complexes μ_n^Q (équation (2.9).) et V_s^Q (équation

(2.10).), respectivement, conduit à la fonction de transfert du sol $H_B^Q(f)$ par rapport à la base, avec un amortissement:

$$H_B^Q(f) = \frac{U_{2C}^Q(z_0, f)}{U_{NB}(z_{N-1}, f)} = \frac{1}{T_{11}^Q} e^{-ik_n^Q \sum_{n=2}^{N-1} \Delta x_n} \quad (3.11)$$

Où $k_n^Q = \frac{\omega \sin \alpha_n}{V_n^Q}$ désigne le nombre d'onde complexe associé à la $n^{\text{ième}}$ couche dans la direction x , Δx_n la distance du déplacement relatif de l'onde entre le haut et le bas de la $n^{\text{ième}}$ couche, et $H_B^Q(f)$ est la fonction de transfert du substratum comprenant l'amortissement Q , ce qui permet d'estimer les mouvements du sol en surface à partir des mouvements à l'interface dépôt multicouche - substrat rocheux.

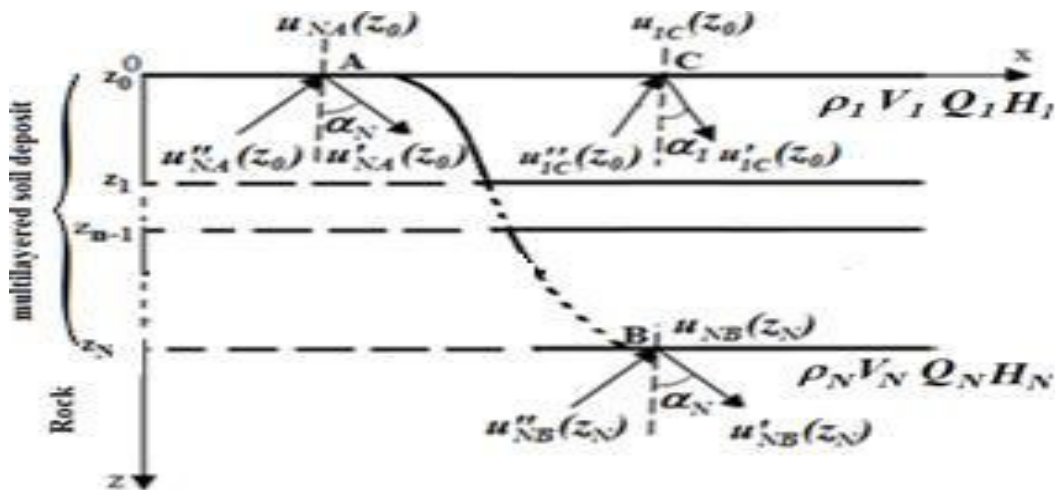


Figure 3-2 : Ondes Incidentes et réfléchies dans un sol multicouche viscoélastique surplombant le substratum rocheux

3.3.2 Amplification de site par rapport à l'affleurement rocheux

Considérant l'équation (3.10) et les considérations ci-dessus, l'amplitude de la fonction de transfert viscoélastique, y compris l'amortissement Q , s'écrit :

$$H_A^Q(f) = \frac{u_{1c}^Q(f)}{u_{NA}(z_{N-1}, f)} = \frac{1}{T_{11}^Q - T_{21}^Q \frac{1}{\mu_N p_N}} e^{-ik_n^Q \sum_{n=1}^{N-1} \Delta x_n} \quad (3.12)$$

Où $p_N = \frac{2\pi f \cos \alpha_N}{V_N}$ et μ_N désignent le nombre d'onde et le module de cisaillement respectivement,

associés à l'affleurement rocheux élastique dans la direction z et $H_A^Q(f)$ est la fonction de transfert qui permet d'estimer les mouvements du sol viscoélastique en surface des mouvements élastiques de l'affleurement rocheux.

3.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de déterminer une formulation analytique bidimensionnelle des fonctions de transfert pour deux de cas de figures : roche mère –surface libre et affleurement rocheux–affleurement d'un dépôt de sol multicouches viscoélastiques. Après la détermination de ces fonctions, nous passons à l'analyse des effets des angles d'incidence sur les fonctions d'amplification de site, les rapports spectraux des pics et sur les accélérogrammes de surface.

Chapitre4

Chapitre 4: Analyse de sensibilité de l'ASS dans des sols multicouches viscoélastiques : Effets des angles sur les fonctions de transfert et les accélérogrammes

4.1 Introduction

Dans la section précédente, on a présenté une formulation analytique bidimensionnelle de l'amplification de site dans des sols multicouches viscoélastiques sous des ondes de cisaillement incidentes obliques, par rapport au substratum et à l'affleurement rocheux. Dans cette section, les effets des angles d'incidence seront analysés, d'abord sur les fonctions de transfert, les rapports spectraux des pics correspondants et sur les accélérogrammes de surface. Par ailleurs, la propagation des ondes sous incidence non verticale à travers les couches constitutives du profil de sol sera étudiée.

Pour illustrer les effets de l'angle d'incidence sur l'amplification sismique de site pour les dépôts de sols multicouches viscoélastiques, considérons maintenant le modèle de profil de sol à cinq couches du site résidentiel de 500 logements (El-Asnam, nord-ouest de l'Algérie) dont les propriétés sont indiquées la Figure 6.2 et rapportées dans le tableau 6.1 ci - dessous [36]. Ces propriétés du sol sont basées sur les données géotechniques du site recueillies après la survenue de la plus forte réplique ($M_s = 5.3$) du choc principal non enregistré du tremblement de terre d'El - Asnam de 1980.

Dans le but d'étudier les effets de l'angle d'incidence sur l'évolution de l'accélération, nous devons d'abord spécifier les données du mouvement en tant que mouvement d'affleurement par rapport au mouvement sur rocher ; Une question qui a longtemps été source de confusion pour les Ingénieurs structurels et géotechniciens.

4.2 Résultats et discussions

4.2.1 Effets sur les fonctions de transfert

Les figures 4.1a et 4.1b montrent les fonctions d'amplification évaluées par rapport au substratum et à l'affleurement rocheux pour le modèle de cinq couches de sol en fonction de l'angle d'incidence de l'onde SH allant de 0° à α_{cr} . Où α_{cr} désigne la limite supérieure de l'angle d'incidence pour lequel la première amplitude de pic dominant est égale à 1.

Chapitre 4 : Analyse de sensibilité de l'ASS d'un multicouche viscoélastique : Effets des angles sur les fonctions de transfert et les accélérogrammes.

La valeur critique de l'angle d'incidence α peut donc être systématiquement déterminée comme la solution d'un problème d'optimisation non linéaire de deux variables f et α variant respectivement dans les gammes [0-25 Hz] et [0° - 90°]. On observe que :

Les pics d'amplification pour l'incidence non verticale montrent de grands déplacements vers les fréquences supérieures dues aux effets cumulatifs des décalages de fréquence des couches constitutives des dépôts de sol (tableau 4.3). On notera que le décalage de fréquence est beaucoup plus prononcé pour les pics d'ordre supérieur de la fonction de transfert que pour le premier pic dominant.

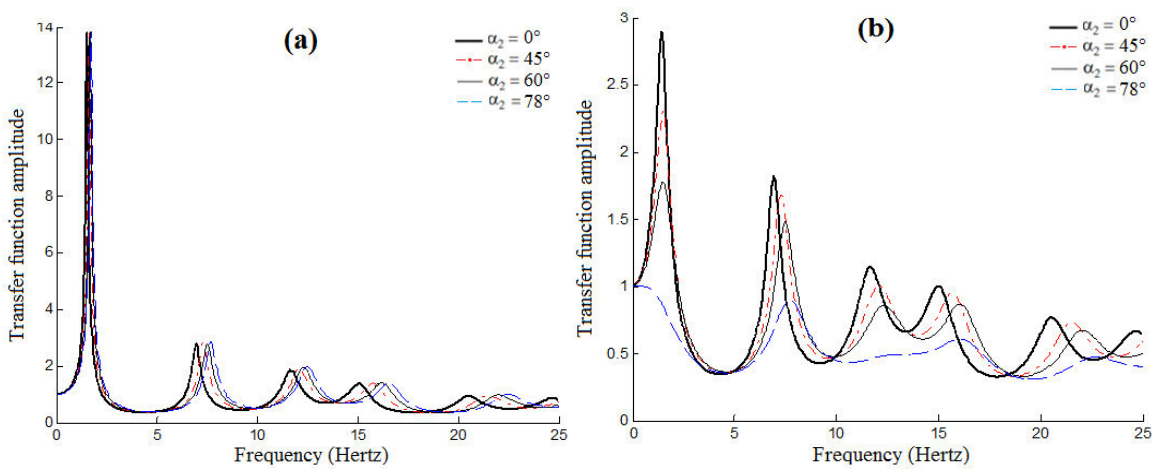


Figure 4-1 : Amplification de site pour le sol multicouche viscoélastique : a) le substratum rocheux et b) l'affleurement rocheux pour divers angles d'incidence des ondes SH ($V_N=1100\text{m/s}$, 500 appartements résidentiels, ville d'El-Asnam).



Figure 4-2 : Localisation des sites des 500 appartements résidentiels et du centre culturel (ville d'El-Asnam).

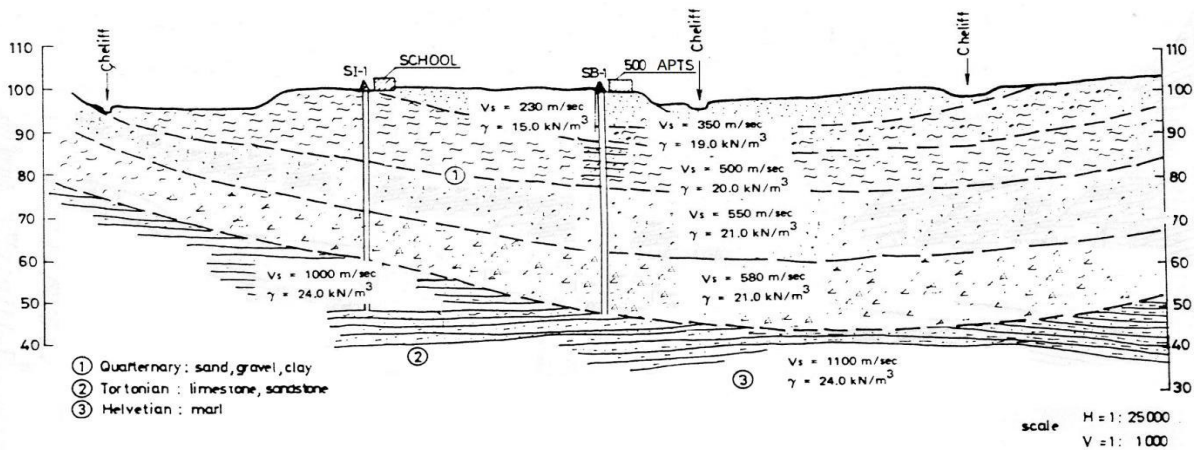


Figure 4-3 : Profil longitudinal des sols de la ville d'El-Asnam le long de l'oued El-Cheliff[37].

Dans le cas du substratum, les pics d'amplification sont presque indépendants de l'angle d'incidence, comme illustré sur la Figure 4.1a et le Tableau 4.4, en raison d'une petite quantité d'énergie dans le dépôt de sol vibrant qui rayonne vers le bas dans la roche sous-jacente. Au contraire, dans le cas d'affleurement rocheux, les pics d'amplification diminuent fortement avec l'augmentation de l'angle d'incidence (voir la figure 4.1b et le tableau 4.4) en raison essentiellement d'un amortissement de radiatif plus important.

Il est important de noter à partir de la Figure. 4-4 que pour un grand contraste d'impédance entre les couches de sol et la roche sous - jacente (par exemple, $V_N = 3000$ m / s), le décalage de fréquence devient très faible (effet de regroupement) tant pour le cas du substratum rocheux que pour l'affleurement rocheux (quoi que dans une moindre mesure).

Tableau4-1 : Propriétés des sols (site des 500 appartements résidentiels El-Asnam).

Epaisseur (m)	Densité de Masse (g/cm ³)	OndeSHvitesse(m/s)	Facteur de Qualité
8.5	1.5	230	12
3.0	1.9	350	14
11	2.0	500	15
15	2.1	550	16
10	2.1	580	17
—	2.4	1100	—

Chapitre 4 : Analyse de sensibilité de l'ASS d'un multicouche viscoélastique : Effets des angles sur les fonctions de transfert et les accélérogrammes.

Tableau4-2: Angles de propagation des ondes à travers les couches (site des 500 résidences El-Asnam).

$V_6 = V_r = 1100 \text{ m/s}$					
$\alpha_6 = \alpha_r$	α_5	α_4	α_3	α_2	α_1
0°	0°	0°	0°	0°	0°
45°	21°89	20°70	18°74	13°00	8°50
60°	27°17	25°65	23°18	15°99	10°43
78°	31°04	29°27	26°39	18°13	11°80

Tableau4-3 : Variations du décalage de fréquence par rapport à l'angle d'incidence des ondes ($V_N = V_r = 1100 \text{ m/s}$, site des 500 résidences El-Asnam).

	Fréquences de résonance pour			
	$\alpha_N = 0$	$\alpha_N = 45^\circ$	$\alpha_N = 60^\circ$	$\alpha_N = \alpha_{cr} = 78^\circ$
Cas du Substratum				
f_1	1.46	0.09	0.14	0.19
f_2	6.95	0.34	0.56	0.70
f_3	11.68	0.41	0.63	0.82
f_4	15.07	0.70	1.12	1.46
f_5	20.47	1.04	1.58	2.00
Cas de l'affleurement rocheux				
f_1	1.46	0.05	0.07	—
f_2	6.95	0.79	1.01	1.21
f_3	11.68	0.42	1.05	1.32
f_4	15.00	0.78	1.07	1.12
f_5	20.56	0.98	1.54	2.18

Chapitre 4 : Analyse de sensibilité de l'ASS d'un multicouche viscoélastique : Effets des angles sur les fonctions de transfert et les accélérogrammes.

Tableau4-4: Variations d'amplitude spectrale par rapport à l'angle d'incidence

($V_N = V_r = 1100$ m/s, El-Asnam 500 Site d'appartements résidentiels).

	Amplitudes spectrales pour $\alpha_N = 0^\circ$	Amplitudes spectrales pour :		
		$\alpha_N = 45^\circ$	$\alpha_N = 45^\circ$	$\alpha_N = \alpha_{cr} = 78^\circ$
Cas du Substratum				
$ H_B^Q _{max}^1$	13.76	13.75	13.91	13.86
$ H_B^Q _{max}^2$	2.58	2.70	2.78	2.84
$ H_B^Q _{max}^3$	1.85	1.91	1.94	1.96
$ H_B^Q _{max}^4$	1.37	1.39	1.40	1.41
$ H_B^Q _{max}^5$	0.91	0.96	0.98	1.00
Cas de l'affleurement rocheux				
$ H_A^Q _{max}^1$	2.89	2.29	1.77	—
$ H_A^Q _{max}^2$	1.81	1.67	1.47	0.92
$ H_A^Q _{max}^3$	1.14	1.00	0.80	0.50
$ H_A^Q _{max}^4$	1.00	0.94	0.86	0.61
$ H_A^Q _{max}^5$	0.76	0.73	0.67	0.48

4.2.2 Effets sur les rapports spectraux des pics fondamentaux d'amplification de site du substratum- affleurement rocheux

Les tableaux 4.5 et 4.6 montrent les rapports spectraux des pics fondamentaux d'amplification de site de l'affleurement rocheux- substratum calculés pour le site étudié avec deux vitesses d'ondes de cisaillement différentes : $V_N = 1100$ m / s (vitesse réelle) et $V_N = 3000$ m / s (hypothétique). On notera que les rapports de pics d'amplification pour le substrat rocheux par rapport au cas de l'affleurement rocheux montrent une augmentation substantielle de la plage [4,76 - 13,86] pour

Chapitre 4 : Analyse de sensibilité de l'ASS d'un multicouche viscoélastique : Effets des angles sur les fonctions de transfert et les accélérogrammes.

$\alpha_N \in [0^\circ - \alpha_{cr} = 78^\circ]$, pour la vitesse réelle de cisaillement de la roche $V_N = 1100 \text{ m / s}$ et dans la plage [2.49 - 13.76] pour $\alpha_N \in [0^\circ - \alpha_{cr} = 85^\circ]$, pour la vitesse d'onde de cisaillement hypothétique $V_N = 3000 \text{ m / s}$.

4.2.3 Effets de la propagation des ondes à travers les couches

Une autre caractéristique intéressante des effets de variation de l'angle d'incidence peut être observée à partir du tableau 4.2 qui montre l'angle d'incidence des ondes dans les différentes couches calculées en utilisant la loi de Snell pour différents angles d'incidence dans le rocher. Il est intéressant de noter que, même pour le cas extrême de la limite supérieure de l'angle d'incidence, l'angle d'incidence dans la couche supérieure est d'environ 11° (à savoir presque une incidence verticale au niveau de la surface ce qui est une conclusion intéressante du point de vue de la conception des fondations).

Dans ce qui suit, on examinera les effets de l'angle d'incidence sur l'évolution de l'accélération des mouvements sismiques d'entrée (pour les deux cas substratum et affleurement rocheux) et les mouvements du sol en surface. Les résultats numériques seront discutés dans le cadre des « 500 Appartements résidentiels », modèle de profil de site viscoélastique multicouche, en considérant les mêmes valeurs de l'angle d'incidence $0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{cr} = 78^\circ$ comme indiqué précédemment et la vitesse d'onde de cisaillement réelle $V_N = 1100 \text{ m / s}$ pour les deux mouvements sismiques d'entrée, afin d'améliorer les effets radiatifs de l'amortissement.

Tableau4-5: Rapport des pics spectraux $\frac{|H_B^Q|_{max}^1}{|H_A^Q|_{max}^1}$ ($V_N = V_r = 1100 \text{ m/s}$, site des 500 appartements résidentiels El-Asnam).

	0°	45°	60°	78°
$ H_B^Q _{max}^1$	13.76	13.75	13.91	13.86
$ H_A^Q _{max}^1$	2.89	2.29	1.77	1.00
$\frac{ H_B^Q _{max}^1}{ H_A^Q _{max}^1}$	4.76	6.00	7.85	13.86

Chapitre 4 : Analyse de sensibilité de l'ASS d'un multicouche viscoélastique : Effets des angles sur les fonctions de transfert et les accélérogrammes.

Tableau 4-6: Rapport des pics spectraux $\frac{|H_B^Q|_{\eta}^1}{|H_A^Q|_{\eta}^1}$ ($V_N = V_T = 3000$ m/s, site des 500 appartements résidentiels El-Asnam).

α_N	0°	45°	60°	85°
$ H_B^Q _{max}^1$	13.77	13.83	13.67	13.76
$ H_A^Q _{max}^1$	5.76	4.66	3.68	1.00
$\frac{ H_B^Q _{max}^1}{ H_A^Q _{max}^1}$	2.49	3.03	3.70	13.76

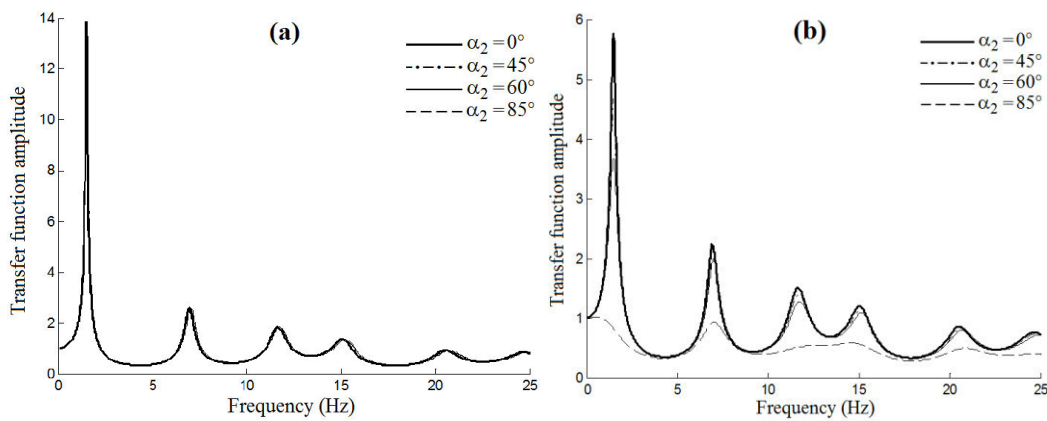


Figure 4-4 : Amplification de site pour le multicouche viscoélastique : a) le substratum rocheux et b) l'affleurement rocheux pour divers angles d'incidence des ondes SH ($V_N = 3000$ m / s, 500 appartements résidentiels, El-Asnam).

4.3 Spécification des mouvements d'entrée

Etant donné qu'aucun accéléromètre de surface n'a été enregistré au site «500 appartements résidentiels » dans la région d'El-Asnam (voir les figures 4.2 et 4.3), les données du mouvement de l'affleurement rocheux (avec $PGA = 68,67$ cm / s²) représenté sur la figure 4.5a, a été appliqué directement à la base du profil de sol étudié sans modification. Ces données de mouvement ont été obtenus à partir d'un accéléromètre de surface enregistré sur le site de Sogedia pendant la plus forte réplique ($M_S = 5.3$) du choc principal non enregistré du séisme d'El - Asnam du 10 octobre 1980 (nord - ouest de l'Algérie).

Chapitre 4 : Analyse de sensibilité de l'ASS d'un multicouche viscoélastique : Effets des angles sur les fonctions de transfert et les accélérogrammes.

L'amplitude de l'onde incidente de fréquence f sur l'affleurement rocheux $u''_{NA}(f)$ est identique à celle de l'onde incidente du substratum $u''_{NB}(f)$ et est égale à la moitié de l'amplitude du mouvement de l'affleurement rocheux $u_{NA}(f)$. L'amplitude de l'onde calculée $u_{NB}(f)$ du mouvement d'entrée du substrat rocheux sera égale à la somme de deux composantes : l'onde incidente ascendante $u''_{NB}(f)$ et l'onde réfléchie descendante $u'_{NB}(f)$ est égale à l'onde incidente ascendante multipliée par le coefficient de réflexion $\mathcal{R}_B^0(f)$ (voir équation (4.1) ci-dessous).

4.3.1 Mouvement de l'affleurement rocheux (in put) et mouvement au sol associé

Le mouvement ascendant du substratum $u''_{NA}(z_{N-1}, f)$ traversant l'affleurement rocheux (côté gauche de la figure (4-5) sort à la surface, donnant lieu au mouvement $u_{NA}(z_0, f) = 2u''_{NA}(z_0, f)$, est influencé par l'amplification à la surface libre par un facteur 2.

Le mouvement d'entrée $u''_{NA}(z_{N-1}, f)$ est également affecté par le retard de phase en raison du temps de propagation $\tau_R = \sum_{n=1}^{N-1} h_n / V_N * \cos \alpha_N$ conduisant à :

$$u''_{NA}(z_{N-1}, f) = u''_{NA}(z_0, f) e^{+i2\pi f \tau_R} \quad (4.1)$$

Ainsi, le mouvement d'entrée respectif $u_{NA}(z_{N-1}, f)$ au niveau de l'interface sol-rocher (correspondant à la profondeur Z_{N-1}) est donné par :

$$u_{NA}(z_{N-1}, f) = 2 u''_{NA}(z_0, f) e^{+i2\pi f \tau_R} \quad (4.2)$$

La valeur du coefficient de réflexion $\mathcal{R}_A(f)$ dans ce cas est égale à 1 indépendamment de la valeur de f et de l'angle d'incidence à la surface libre de l'affleurement rocheux.

De l'équation (5.10) du chapitre 5, la fonction de transfert $H_A^Q(f)$ par rapport au cas d'affleurement rocheux peut être exprimée comme suit :

$$H_A^Q(f) = \frac{u_{1c}^Q(z_0, f)}{u_{NA}(z_{N-1}, f)} = \frac{u_{1c}^Q(z_0, f)}{2u_{NA}''(z_0, f)e^{+i2\pi f\tau_R}} = \frac{\mu_N p_N}{\mu_N p_N T_{11}^Q - T_{21}^Q} \quad (4.3)$$

Il en résulte que le mouvement du sol à la surface libre peut être calculé à partir de :

$$u_{1c}^Q(z_0, f) = H_A^Q(f) u_{NA}(z_{N-1}, f) = \frac{\mu_N p_N}{\mu_N p_N T_{11}^Q - T_{21}^Q} [2u_{NA}''(z_0, f)e^{+i2\pi f\tau_R}] \quad (4.4)$$

4.3.2 Calcul des mouvements d'entrée du substratum et des mouvements du sol associés

En remplaçant l'équation (3.4) dans l'équation (3.6) cela conduit à :

$$\begin{cases} u'_{NB}(f) + u''_{NB}(f) \\ u'_{NB}(f) - u''_{NB}(f) \end{cases} = \begin{cases} T_{11}^Q u_{1c}^Q(z_0, f) \\ T_{11}^Q u_{1c}^Q(z_0, f) / \mu_N p_N(f) \end{cases} \quad (4.5)$$

Où p_N et μ_N tels que définis précédemment, T_{11}^Q et T_{21}^Q sont les composants de la matrice de transfert viscoélastique qui relie le mouvement à la surface libre du dépôt de sol au mouvement à l'interface sol-rock. Ainsi, le coefficient de réflexion $\mathfrak{R}_B^Q(f)$ de l'onde à l'interface sol-rocher est inférieur à 1, peut être exprimé comme :

$$\mathfrak{R}_B^Q(f) = \frac{u'_{NB}(f)}{u''_{NB}(f)} = \frac{\mu_N p_N T_{11}^Q + T_{21}^Q}{\mu_N p_N T_{11}^Q - T_{21}^Q} \quad (4.6)$$

Le mouvement au niveau du substratum rocheux est alors donné par :

$$u_{NB}(f) = u''_{NB}(f) + u'_{NB}(f) = 2 u''_{NB}(f) \frac{\mu_N p_N T_{11}^Q}{\mu_N p_N T_{11}^Q - T_{21}^Q} \quad (4.7)$$

Et donc la fonction de transfert $H_B^Q(f)$ par rapport au substratum :

Chapitre 4 : Analyse de sensibilité de l'ASS d'un multicouche viscoélastique : Effets des angles sur les fonctions de transfert et les accélérogrammes.

$$H_B^Q(f) = \frac{u_{1C}^Q(z_0, f)}{u_{NB}(f)} = \frac{u_{1C}^Q(z_0, f)}{u'_{NB}(f) + u''_{NB}(f)} = \frac{1}{T_{11}^Q} \quad (4.8)$$

De l'équation (4.6), on voit que le mouvement à la surface libre du dépôt de sol peut être calculé à partir de :

$$u_{1C}^Q(z_0, f) = H_B^Q(f) u_{NB}(z_{N-1}, f) = \frac{1}{T_{11}^Q} \left[2 u''_{NB}(z_{N-1}, f) \frac{\mu_{NP} \rho_N T_{11}^Q}{\mu_{NP} \rho_N T_{11}^Q - T_{22}^Q} \right] \quad (4.9)$$

Où :

$$u_{1C}^Q(z_0, f) = H_B^Q(f) u_{NB}(z_{N-1}, f) = \frac{1}{T_{11}^Q} \left[2 u''_{NB}(z_{N-1}, f) \frac{\mu_{NP} \rho_N T_{11}^Q}{\mu_{NP} \rho_N T_{11}^Q - T_{22}^Q} \right] \quad (4.10)$$

Montre clairement que les mouvements de surface du sol dans les deux cas du substratum rocheux et affleurements sont identiques quel que soit l'angle d'incidence, comme illustré sur les figures. (4-5a et 4-5b).

4.4 Les résultats numériques et discussions

Dans le but d'étudier les effets de l'angle d'incidence sur les mouvements de tremblement de terre, la transformation de Fourier $U_S^Q(f)$ de l'évolution de l'accélération du site $u_S^Q(t)$ à la surface du sol est d'abord liée à la transformée de Fourier $U_r(f)$ du mouvement d'entrée du substratum rocheux (ou affleurement rocher) comme suit :

$$U_S^Q(f) = U_r(f) H^Q(f) \quad (4.11)$$

Où $H^Q(f)$ représente la fonction de transfert du site viscoélastique (pour le substratum rocheux) ou (pour les affleurements rocheux) donnée respectivement par les équations (3.11) et (3.12) selon que la spécification du mouvement d'entrée par rapport au substratum rocheux ou l'affleurement rocheux.

L'évolution en fonction du temps $u_s^Q(t)$ est alors carrément obtenue en calculant la transformée de Fourier inverse de $U_s^Q(f)$. Comme mentionné précédemment, l'évolution de l'accélération est calculée, pour le modèle de profil de sol viscoélastique disponible à l'interface du dépôt rocher-sol pour les mouvements d'entrée et au niveau de la surface pour les mouvements du sol correspondant en considérant les mêmes valeurs de l'angle d'incidence $0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{cr} = 78^\circ$. Les résultats numériques sont représentés graphiquement sur la Fig.4-5a pour le mouvement de l'affleurement rocheux appliqué sans modification, directement à la base du profil de sol étudié (reposant sur une base élastique caractérisée par la vitesse de l'onde de cisaillement réelle ($V_N = 1100$ m/s) et sur la Fig.4-5b pour les mouvements d'entrée du substratum calculés (en supposant la même valeur de la vitesse des ondes de cisaillement que le rocher pour mieux renforcer les effets de l'amortissement radiatif).

4.4.1 Cas de l'affleurement rocheux

Pour le cas de l'affleurement rocheux, la réflexion parfaite de l'onde se produit à la surface. Les amplitudes des ondes incidentes et réfléchies sont des mouvements d'entrée identiques d'où le mouvement à l'affleurement est le double de l'amplitude de l'onde incidente seule. Le coefficient de réflexion est égal à 1 indépendamment de la fréquence et de l'angle d'incidence conduisant à une valeur de PGA constante (égale à $68,67$ cm/s² pour le cas près) pour les mouvements d'entrée de l'affleurement rocheux comme illustré sur la Fig. 4-5a. On voit également sur la même figure que les mouvements du sol présentent des valeurs plus petite du PGA d'autant plus lorsque l'angle d'incidence augmente, en raison de l'effet d'augmentation de l'amortissement radiatif. De même, une importante dé-amplification (supérieure à 2) des mouvements du sol en termes de valeurs de PGA près de la zone de dé-amplification ($\alpha_N \cong 78^\circ$) est à noter.

4.4.2 Cas du substratum

Pour le cas du substratum, au contraire, la Figure 4-5b montre qu'à l'exception près de la zone de dé-amplification ($\alpha_N \cong 78^\circ$), les diminutions des valeurs du PGA du mouvement d'entrée substratum présentent une faible variation avec l'augmentation de l'angle d'incidence. Ceci est due à une petite quantité d'énergie dans le dépôt de sol vibrant qui est irradiée vers le bas dans le rocher

sous - jacent (c'est-à-dire non réflexion parfaite de l'onde puisque les conditions de substratum rocheux rigide nécessiteraient une vitesse des ondes de cisaillement infinie et un coefficient de réflexion au fond d'un multicouche $r = 1$ impliquant zéro amortissement radiatif ce qui ne peut être atteint dans la réalité). Il en résulte que les valeurs du PGA de mouvements d'entrée du substratum rocheux sont nettement plus petites que celles des mouvements d'entrée de l'affleurement rocheux quand les valeurs d'incidence augmentent en raison d'un plus grand amortissement radiatif, en particulier près de la zone de dé-amplification comme illustré sur la Fig.4-5 est plus important d'observer qu'à partir de la même figure les mouvements du sol calculés sont, pour un angle d'incidence donné, identiques pour les cas de substratum rocheux et affleurement rocheux. Cette observation confirme le fait que l'amplification pour le substratum rocheux est significativement plus élevée que dans le cas de l'affleurement rocheux, pour cause précisément de l'état de réflexion non parfaite des ondes.

Ces observations corroborent le fait que la spécification des mouvements d'entrée du substratum rocheux doit être associé à la base rigide (c'est-à-dire base de rigidité infinie), tandis que les mouvements d'entrée de l'affleurement doivent être utilisés avec une conformité "base élastique" ayant une rigidité compatible avec la roche sous - jacente (c'est-à-dire le dépôt de sol reposant sur un substrat rocheux caractérisé par une vitesse de cisaillement finie de l'onde V_N

Chapitre 4 : Analyse de sensibilité de l'ASS d'un multicouche viscoélastique : Effets des angles sur les fonctions de transfert et les accélérogrammes.

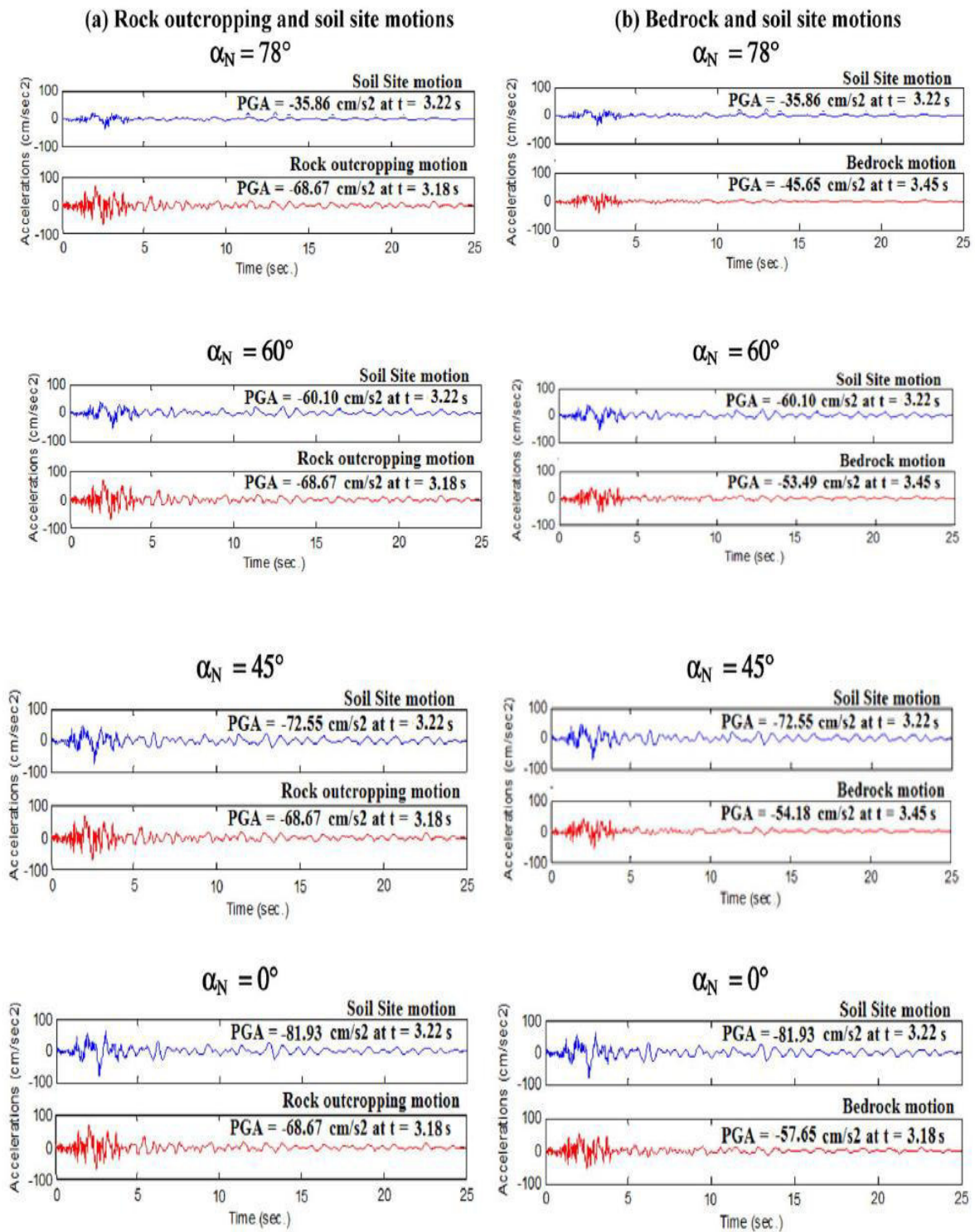


Figure 4-5 : Histoire temporelle de l'accélération au niveau de la surface d'un sol multicouche viscoélastique : (a) affleurement rocheux et (b) substratum pour divers angles d'incidence des ondes SH ($V_2 = 1100 \text{ m/s}$, site des 500 appartements résidentiels, ville El-Asnam).

4.5 Conclusion

L'angle d'incidence α_{cr} est la solution d'un problème d'optimisation non linéaire de deux variables f et α variant respectivement dans les gammes [0-25 Hz] et [0 ° - 90 °]. On constate que, pour l'angle d'incidence α_{cr} la première amplitude de pic dominant est égale à 1.

On remarque, que l'amplification pour le substratum rocheux est significativement plus élevée que dans le cas de l'affleurement rocheux, pour cause précisément de l'état de réflexion non parfaite des ondes.

Il est plus important de noter que, les mouvements du sol calculés sont, pour un angle d'incidence donné, identiques pour les cas de substratum rocheux et affleurement rocheux. Cette observation confirme le fait que l'amplification pour le substratum rocheux est significativement plus élevée que dans le cas de l'affleurement rocheux, pour cause précisément de l'état de réflexion non parfaite des ondes.

Ces observations corroborent le fait que la spécification des mouvements d'entrée du substratum rocheux doit être associée à la base, tandis que les mouvements d'entrée de l'affleurement doivent être utilisés avec une conformité "base élastique" ayant une rigidité compatible avec la roche sous-jacente

Conclusion générale

L'amplification sismique de site bidimensionnelle des mouvements de propagation oblique anti-plans dans les modèles de sols viscoélastiques est présentée en utilisant deux approches différentes : temps discret et fréquence discrète. Des analyses détaillées de l'amplification sismique de site ont été réalisées pour deux études de cas formulées sur la base de tests de terrain et des études de laboratoire dans la région d'el-Asnam. Les résultats des analyses de sensibilité effectuées pour tenter d'estimer les fonctions d'amplification sismique de site des mouvements du substratum et l'affleurement rocheux, sont influencés par les variations de l'angle d'incidence et des rapports d'impédance rocher - sol.

Les résultats montrent qu'en général, les distorsions à la fois dans les amplitudes de décalage des fréquences et des pics des fonctions d'amplification de site augmentent lorsque l'angle d'incidence croît plus précisément :

Les pics d'amplification dans le substratum rocheux sont presque indépendants de l'angle d'incidence mais montrent un déplacement vers des fréquences plus élevées lorsque l'angle d'incidence augmente, ceci est dû à une réflexion non parfaite de l'énergie de vibration dans le dépôt de sol qui s'irradie dans le demi-espace rocheux.

Au contraire, des effets significatifs de l'angle d'incidence dans le cas de l'affleurement rocheux sont observés avec des pics d'amplification décroissants et décalés significativement (vers des fréquences plus élevées) lorsque l'angle d'incidence croît, ceci est dû essentiellement à une plus grande quantité d'amortissement effectif des radiations.

Pour les grands contrastes d'impédance entre les couches du sol et le demi-espace rocheux, on constate que les changements de fréquence et les pics d'amplification par rapport au substratum rocheux sont négligeables (effets de regroupement) par rapport à ceux du cas de l'affleurement qui restent relativement importants.

Les rapports spectraux (pour des pics de résonance fondamentale) de l'amplification du substratum à celui de l'affleurement rocheux se trouvent être dans la gamme de 4,76Hz (pour $\alpha_2 = 0^\circ$) à 13,86 Hz (pour $\alpha_2 = \alpha_{cr} = 78^\circ$). Pour les grands contrastes d'impédance, ces rapports se trouvent

CONCLUSION GENERALE

relativement dans une plus grande plage de 2,5 Hz (pour $\alpha_2 = 0^\circ$) à 13,76 Hz (pour $\alpha_2 = \alpha_{cr} = 85^\circ$).

De plus, l'amplification sismique de site des mouvements d'entrée d'incidence oblique et l'évolution de l'accélération associée à des sites de sols sont discutées en même temps que deux principaux problèmes abordés dans le document.

La première, qui a longtemps été une source de confusion pour les Ingénieurs structurels et géotechniques, est la spécification dans le mouvement d'entrée : le mouvement de l'affleurement rocheux ou le mouvement du substratum rocheux. Une question qui est résolue ici, en comparant systématiquement pour chaque angle d'incidence, les mouvements du sol estimés à partir des analyses d'amplification sismique de site des mouvements du substratum rocheux et de l'affleurement rocheux. Les résultats montrent que, sauf près de la zone de dés amplification, on a constaté que les variations des valeurs PGA des mouvements d'entrée du substrat rocheux ne présentent que de petites variations avec des variations croissantes de l'angle d'incidence dues à une réflexion de l'onde non parfaite. Cependant, pour le cas d'affleurement rocheux, une réflexion de l'onde parfaite se produit à la surface, conduisant à aucun changement dans les valeurs de PGA des mouvements d'entrée d'affleurement de roche. En outre, il est démontré à la fois théoriquement et numériquement, que les mouvements de site du sol sont identiques à condition que les fonctions de transfert appropriées et les mouvements d'entrée soient correctement utilisés.

La deuxième question concerne la clarification de la nature et les effets de deux sources d'amortissement rencontrées dans les études d'amplification sismique de site différent : Q-atténuation et amortissement radiatif. Ce dernier, qui résulte de la propagation de l'onde vers l'infini, est essentiellement différent de l'amortissement Q dû à la dissipation d'énergie causée par le frottement solide rencontré dans les études de comportement du sol.

Il est également important de noter que :

Alors que l'amortissement radiatif affecte à la fois les pics des amplitudes et le décalage de fréquence (le décalage étant plus prononcé pour les fréquences plus élevées), l'amortissement Q affecte uniquement les amplitudes des pics et leur décroissance avec la fréquence.

CONCLUSION GENERALE

L'amortissement existe même dans un matériau élastique linéaire qui ne montre aucun amortissement matériel.

En ce qui concerne les deux approches différentes utilisées dans le présent document :

Les méthodes de fréquence discrète de la propagation des ondes pour estimer l'analyse d'amplification sismique de site restent beaucoup plus répandues dans la pratique que les techniques à temps discret. Parmi les raisons pour lesquelles cette pratique continue, la sélection de paramètres pour les techniques d'analyse à fréquence discrète est relativement simple (ne nécessitant que des estimations de la densité de masse, de vitesse de l'onde de cisaillement, de l'épaisseur de couche et de l'amortissement Q) et les effets de la variabilité des paramètres.

En revanche, les techniques d'analyse en temps discret nécessitent l'utilisation de paramètres des couches (deux pour le substrat rocheux et trois pour l'affleurement) qui sont moins familiers à la plupart des Ingénieurs et plutôt difficiles à mesurer. Bien que les expressions récursives à temps discret présentent un intérêt historique, elles sont de valeur limitée dans des contextes réalistes. Leur mise en œuvre sur des sites multicouches est laborieuse et sophistiquée en particulier pour des ondes de volume incidentes obliques et des milieux stratifiés ayant des interfaces irrégulières ou des hétérogénéités latérales.

Les procédures analytiques pour les fonctions d'amplification sismique de site bidimensionnel, sous incidence d'onde oblique, présentées ici, peuvent être utilisées avantageusement pour des études du problème des Entrants (in put) de fondation, pour l'étude des effets de l'interaction sol-structure et des mouvements sismiques forts spatialement variables sur les structures. En outre, il convient de souligner qu'en raison du faible niveau des mouvements sismiques enregistrés lors de l'étude post-sismique du tremblement de terre d'El-Asnam du 10 octobre 1980, les principaux résultats du présent travail ne devraient pas être les mêmes dans le cas de tremblement de terre plus forts. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour étudier le rôle pertinent de la non-linéarité du sol dans l'amplification sismique de site.

Références

- [1] Trifunac MD, Todorovska MI., 2000, “Can aftershock studies predict site amplification factors. Northridge CA earthquake of 17 January 1994. ”, *Soil Dyn. Earthquake Engng.* 19:233–51.
- [2] Seed, H. B., Romo, M. P., Sun, J. I., Jaime, A. and Lysmer, L., 1988, “The Mexico earthquake of September 19, 1985: Relationships between site conditions and earthquake ground motions.”, *Earthquake Spectra*, 4, 687 – 729.
- [3] Hays. 1986, “Site amplification of earthquake ground motion. ”, 3rd US National Conference on Earthquake Engineering, Charleston, SC, vol. I., p. 357–68.
- [4] Stewart, J.P., Boore, D.M., Campbell, K.W., Erdik, M., and Silva, W.J. (2012). “Site effects in parametric ground motion models.”, Report to GEM. PEER Center, UC Berkeley, CA.
- [5] Erdik MÖ (2014), Site response analysis, Chapter in Strong Ground Motion Seismology, Volume 204 of the series NATO ASI Series, pp 479-534, Editors: MÖErdik, MN Toksöz, Springer Science & Business Media, BV, Dordrecht, Netherlands.
- [6] Zhao, J. X., Irikura, K., Zhang, J., Fukushima, Y., Somerville, P. G., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., and Ogawa, H., 2006, “An empirical site-classification method for strong motion in Japan using H/V response spectral ratio”, *BSSA.*, 96: 914 - 925.
- [7] Hammoutène, M., Tiliouine, B. and Bard, P. Y., 1992, “A two dimensional nonstationary optimized accelerogram scaled for magnitude, distance and soil conditions.”, *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain.
- [8] Rössset, J. M., Sarraxin, M. A. and Vanmarcke, E. H., 1969, “The use of amplification functions to derive response spectra including the effect of local soil conditions ”, *Research Report R69-48, Dept. of Civi. Engrg., Massachussets Inst. Of Tech., Cambridge, Mass.*
- [9] M. Navarro, M., García-Jerez, A., Alcalá, F.J. Vidal, F., Aranda, C. and Enomoto, T., (2012), “Analysis of site effects, building response and damage distribution observed due the 2011 Lorca, Spain, Earthquake.” 15thWCEE, Lisboa, Portugal.
- [10] Seed, H. B., 1969, “The influence of local soil conditions on earthquake damage”, *Proc. of 7th Int. Conf. on Soil Mec. and Found. Engrg.*, Mexico City, Mexico.

Références

- [11] Chin B.-H. and Aki K., (1991), “Simultaneous study of the source, path, and site effects on strong ground motion during the 1989 Loma Prieta earthquake: a preliminary result on pervasive nonlinear site effects”, *BSSA*, 81(5), 1859–1884.
- [12] Safak, E., 1997: "Models and methods to characterize site amplification". *Earthquake Spectra*, EERI, 13 (1), pp. 97–129.
- [13] Sanchez-Sesma F.J., Vai R., Dretta E. and Palencia V.J., (1999), “Fundamentals of elastic wave propagation for site amplification studies.”, In: Kausel A., Manolis B., Editors. *Wave motion in Earthquake Engineering*, Boston (MA): MIT Press, pp. 1-36.
- [14] Joyner, W. B. and Boore, D. M. (1988), *Measurement, Characterization, and Prediction of Strong Ground Motion*, In *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II*, Proc. ASCE. Geotech. Eng. Div. Specialty Conf., June 27–30, 1988, Park City, Utah, 43–102.
- [15] L. Miglio¹, A. Pagliaroli¹, G. Lanzo¹ and S. Miliziano, (2008), “Seismic Analysis of a Rockfill Dam by FLAC Finite Difference Code”, *AIP Conf. Proc.* 1020, 550, Italy, <http://dx.doi.org/10.1063/1.2963883>
- [16] Kim, J., Papageorgiou, S., (1993), “Discrete wave-number boundary-element method for 3-D scattering problems”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 119(3), ASCE, pp. 603-624
- [17] Takano S, Yasui Y, Takeda T, Miyamoto A (1988) The new method to calculate the response of layered half-space subjected to obliquely incident body wave. *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. III, Tokyo, Japan, 423-428.
- [18] Kausel, E. and Roësset, J. M., 1981, “Stiffness matrices for layered soils”, *BSSA*, 71(6), 1743-1761.
- [19] Chen, J.-C. ; Lysmer, J. ; Seed, H B. (1981), “Analysis of Local Variations in Free Field Seismic Ground Motion.”, Technical Report EERC 81/03, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley.
- [20] Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B., 1972, “SHAKE, A computer program for earthquake response analysis of horizontal layered sites”, Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

- [21] Aki K. and Larner, K.L. (1970). Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves. *Journal of Geophysical Research*, vol. 75, No. 5.
- [22] Safak, E., 1995: "Discrete-time analysis of seismic site amplification". *J. Eng. Mech., ASCE*, Vol.121 (7), pp. 801–9.
- [23] Takahashi, R. and Hirano, K., (1941), "Seismic vibrations of soft ground", *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Vol. 19, pp. 534-543 (in Japanese with abstract in English)
- [24] Youngs, R R., (2004), "Software validation report for SHAKE04" Geomatrix Consultants.
- [25] Kausel, E. and Assimaki, D., 2002, "Seismic site simulation of inelastic soils via frequency-dependant moduli and damping", *Journal of Engineering Mechanics*, 128 (1), 34-37.
- [26] O'Connell, DRH, (1999), "Replication of apparent nonlinear seismic response with linear wave propagation models", *Science*, 283(26): 2045 – 2050.
- [27] Campillo, M and Bouchon, M., (1985), "Synthetic *SH* seismograms in a laterally varying medium by the discrete wavenumber method", *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* Vol. 83(1), pp. 307–317.
- [28] Constantopoulos, I. V., Roësset, J. M. and Christian, J. T., 1973, "A comparison of linear and exact nonlinear analysis of soil amplification.", *Proceedings Of the World Conference on Earthquake Engineering.*, Rome, Italy, 2, 1806-1815.
- [29] PECKER. A, 1984 : « Dynamique des sols ». Presse de l'Ecole Nationale des ponts et Chaussées.
- [30] Ordonez, G. A. (2010), "SHAKE2000-A Computer Program for the 1-D Analysis of Geotechnical Earthquake Engineering Problems, User's Manual", Geomotions, LLC (www.geomotions.com), Lacey, Washington.
- [31] Aki, K. and Richards, P. G., 2002. *Quantitative Seismology*. University Science Books, Sausalito, CA, 2nd edition

Références

- [32] Mohabeddine H., Tiliouine B., Hammoutene M., Berrah M. K., 2017 “Investigation of incidence angle effects on 2-d soil amplification of bedrock seismic motions: a discrete time approach.”16thWCEE. Santiago, Chile (submitted)
- [33] Knopoff, L., 1964, “Q”, *Reviews of Geophysics*, Vol. 2, Issue 4, pp. 625-660.
- [34] Kramer, S. L., 1996, “Geotechnical Earthquake Engineering”, Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Mechanics, W. J. Hall, Editor.
- [35] Kausel, E. and Roësset, J. M., 1984, “Soil amplification: some refinements”, *Soil Dyn. Earthquake Engng.*, Vol. 3, No. 3 123.
- [36] Thomson, W., 1950, “Transmission of elastic waves through a stratified solid medium: J. Appl. Phys., 1950, 21, 89–93.
- [37] Milutinovic, Z. and Petrovski, J., 1981, “Deconvolution analysis of surface accelerogram records in El-Asnam region, Actes des Journées Scientifiques sur les Seismed’El-Asnam du 10-08-80, Algiers, Algeria.