

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



مخبر هندسة الزلازل و ديناميكا الهياكل
Laboratoire Génie Sismique et Dynamique des Structures

Département Génie Civil
Laboratoire de Génie Sismique et Dynamique des Structures

Mémoire pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie Civil

Intitulé :

**Analyse des effets des paramètres de site sur la réponse en
forces des ponts implantés dans des conditions de site
spatialement variables**

présenté par :

Abdellali SAFSAFI

Présenté et soutenu publiquement le 16 Juin 2016 devant le jury composé de :

Président	M	B. TILIOUINE	Professeur	ENP
Rapporteurs	M	M. HAMMOUTENE	Professeur	ENP
	M	S. LAKEHAL	M.A.A	ENP
Examineurs	M	M. OUANANI	M.C.B	ENP
	Mme	D. CHERID	M.A.A	ENP

Promotion 2016

Ecole Nationale Polytechnique : 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach 16200 Alger
(Algérie)

Tel : +213 21 52 53 01/03 - Fax : +213 21 59 29 73

Remerciements :

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes profondes gratitude ainsi que mes sincères remerciements à :

- Monsieur :M.HAMMOUTENE mon encadreur qui est malgré les occupations et les responsabilités, il a toujours eu le temps pour m'écouter, et meconseiller et me fournir les informations nécessaire pour faire mon travail.

- Mon Co-encadreur : Monsieur S.LAKEHAL qui n'hésite pas à m'aider par ces conseils.

- Monsieur B.TILIOUINE, d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

- Monsieur.M.OUANANI et Madame D.CHERID, qui ont accepté également d'être parmi le jury.

Je remercie également tous les membres du laboratoire 'LGSDS'

Enfin, un grand remerciement à l'ensemble des personnes qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces :

Je dédie ce mémoire à :

Ma mère, qui a oeuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes frères qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Mes amis et amies et tous ceux qui me sont chers.

ملخص

تعرف سعة الموجات الزلزالية ارتفاعا كبيرا عند انتشارها من خلال طبقات التربة الناعمة القريبة من السطح تسمى هاته الظاهرة التي ترتبط ارتباطا كبيرا بخصائص التربة بخاصية تضخيم الموقع.

لعبت هاته الظاهرة دورا كبيرا في الخسائر التي سببتها الكثير من الزلازل. اذا من المهم اخذها بعين الاعتبار في اختبار مصداقية الهياكل.

الهدف من هذا العمل هو دراسة حساسية اطياف الاستجابة الخاصة بالقوى لتغيرات خصائص التربة . نأخذ بعين الاعتبار اربعة عوامل، ارتفاع طبقة التربة، سرعة موجات القص، معامل النوعية، نسبة المقاومة.

كلمات مفتاحية ، زلزال، موجات القص، خصائص التربة، طيف الاستجابة، نسبة المقاومة.

Abstract

The amplitudes of the seismic waves increases significantly as they propagate through the soft soil layers near the surface. This phenomenon has a relation with the parameters of the site, and it's known as the site amplification.

It is known that the site amplification has played a major role in the destructive effects of many earthquakes. Thus it's important to analyze the effects of variation in soil parameters on the response of structures to verify their reliability.

The aim of this work is the study of the sensitivity of response spectra of forces to the variation of soil parameters. 4 soil parameters are taken into consideration : height of soil layer h , shear wave velocity V_S , the quality factor Q , and the effect of the impedance ratio between the soil layer and rock $I_{r/s}$.

Keywords : Earthquake, Shear waves , soil parameters, response spectrum, impedance ratio.

Résumé

Les amplitudes des ondes sismiques augmentent de manière significative comme elles se propagent à travers les couches du sol mou près de la surface. Ce phénomène qui est lié directement aux paramètres du sol, est connu comme le phénomène d'amplification de site.

L'amplification de site a joué un rôle majeur dans les effets destructeurs de nombreux séismes. Alors il est important d'analyser les effets de la variation des paramètres du sol sur la réponse des structures afin de vérifier leur fiabilité.

Le but de ce travail est l'étude de la sensibilité des spectres de réponse des forces à la variation des paramètres du sol. On prend en considération 4 paramètres du sol : la hauteur des couches h , la vitesse d'onde de cisaillement V_S , le facteur de qualité Q , et l'effet du rapport d'impédance entre la couche du sol et la roche $I_{r/s}$

Mots clés : Séisme, Ondes de cisaillement, Paramètres du sol, Spectre de réponse, rapport d'impédance.

Table des matières

Introduction générale	9
1 Généralités sur les séismes	10
1.1 Introduction :	10
1.2 Les diverses ondes sismiques et leur propagation :	10
1.2.1 Les ondes de volume :	10
1.2.2 Les Ondes de surfaces :	11
1.3 Conditions de propagation :	12
1.4 Vitesse de propagation :	13
1.5 Caractérisation du mouvement sismique :	13
1.6 Caractérisation du mouvement sismique :	14
1.6.1 Facteurs liés à la source :	14
1.6.2 Moment sismique :	14
1.6.3 Chute de contrainte :	14
1.6.4 Magnitude :	14
1.6.5 L'intensité :	14
1.6.6 Facteurs liés au trajet parcouru :	14
1.6.7 Facteurs liés aux conditions locales :	15
1.6.8 Atténuation :	15
1.7 Conclusion	15
2 Spectre de réponse et effets d'amplification de site	16
2.1 Introduction	16
2.2 Modèle de fonction de cohérence :	16
2.2.1 Introduction	16
2.2.2 Modèle de Der Kiureghian :	17
2.3 Modèle d'amplification de site :	18
2.3.1 Introduction	18
2.3.2 Modèle de KANAI-TAJIMI :	18
2.3.3 Modèle de SAFAK :	19
2.4 Coefficient sismique spatiale :	24
2.4.1 La densité spectrale du déplacement dynamique et des forces :	26
2.4.2 Le coefficient sismique spatial :	27
2.5 Conclusion	28

3	Analyse de l'effet des paramètres de site sur le spectre de réponse	29
3.1	Introduction :	29
3.2	Les paramètres utilisés dans l'étude paramétrique :	29
3.2.1	Exemple d'application :	30
3.3	Influence de l'épaisseur h de la couche du sol :	33
3.3.1	L'influence de l'épaisseur h de la couche de sol sur les densités spectrales des forces :	33
3.3.2	L'influence de la hauteur de la couche de sol sur le RMS et sur le coefficient sismique spatiale des forces :	35
3.4	L'effet du facteur de qualité Q :	36
3.5	L'effet de la vitesse des ondes de cisaillement V_s :	37
3.6	l'effet du rapport d'impédance :	37
3.7	Conclusion	39
	Conclusion générale	40
	Bibliographie	41

Table des figures

1.1	L'effet des ondes P sur les milieux traversés.	11
1.2	L'effet des ondes S sur les milieux traversés.	11
1.3	Onde de Love.	12
1.4	Onde de Rayleigh.	12
1.5	Vitesse de propagation des ondes P et S.	13
2.1	Spectre de Clough et Penzien.	19
2.2	Transformation du mouvement du substratum à la surface pour une couche de sol (côté droit) et un affleurement rocheux (côté gauche).	20
2.3	Module de la fonction de transfert	23
2.4	Effet de la variation de τ , Q et r sur la fonction de transfert	23
2.5	Le rapport entre les amplifications amorties et non amorties	24
2.6	Système dynamique 1ddl	25
3.1	Profil d'un sol.	30
3.2	la densité spectrale des forces.	31
3.3	RMS des forces.	32
3.4	RMS normalisé des forces.	32
3.5	Densité spectrale des forces	33
3.6	Densité spectrale des forces en fonction de la profondeur	34
3.7	RMS de forces pour différentes valeurs de h	35
3.8	RMS normalisé de forces pour différentes valeurs de h	35
3.9	L'effet du facteur de qualité Q sur RMS forces	36
3.10	L'effet de la vitesse des ondes de cisaillement V_s sur le RMS forces	37
3.11	RMS forces pour $I_{r/s} = 200$ et $V_s = 15et9$	38
3.12	RMS forces pour $I_{r/s} = 750$ et $V_s = 2et3$	38

Introduction générale :

Le spectre de réponse est l'outil le plus approprié développé jusqu'à présent pour exprimer la relation de réponse d'excitation en génie sismique et la conception parasismique. Bien que ce soit une mesure indirecte de l'intensité du mouvement du sol, il exprime une réponse maximale directement, ce qui est une préoccupation majeure dans la conception.

Si on observe un ensemble des spectres de réponse pour les mouvements du sol enregistrés à différents endroits lors des séismes passés, une grande variation sera observée dans les réponses spectrales maximales et dans la forme des courbes des spectres d'un ensemble à autre. Ces variations dépendent de nombreux facteurs tels que le mécanisme de dissipation d'énergie dans le voisinage du foyer et le long des interfaces de faille, distance épiscopale et profondeur focale, et spécialement la variation des paramètres du sol.

Le but de ce travail est d'étudier la sensibilité des spectres de réponse à la variation des paramètres du sol.

Ce travail est composé de trois chapitres :

- Le premier chapitre porte sur les généralités sur les séismes.

- Le deuxième chapitre traite l'élaboration du modèle analytique d'amplification du sol. Il est consacré à la mise en place des éléments constitutifs du modèle simplifié permettant l'étude de la sensibilité de la réponse structurale aux variations des états locaux de sol.

- Une investigation paramétrique est menée dans le dernier chapitre. A travers ce traitement numérique nous avons étudié la sensibilité de la réponse structurale aux changements des paramètres physiques du sol.

Chapitre 1

Généralités sur les séismes

1.1 Introduction :

Un séisme ou tremblement de terre est une secousse du sol résultant de la libération brusque d'énergie accumulée par les contraintes exercées sur les roches. Cette libération d'énergie se fait par rupture le long d'une faille, généralement préexistante. Plus rares sont les séismes dus à l'activité volcanique ou d'origine artificielle (explosions par exemple). Le lieu de la rupture des roches en profondeur se nomme le foyer, la projection du foyer à la surface est l'épicentre du séisme. Le mouvement des roches près du foyer engendre des vibrations élastiques qui se propagent, sous la forme de trains d'ondes sismiques, autour et au travers du globe terrestre. Il produit aussi un dégagement de chaleur par frottement, au point de parfois fondre les roches le long de la faille .[3]

1.2 Les diverses ondes sismiques et leur propagation :

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques dégagés lors d'un séisme et pouvant traverser un milieu sans le modifier durablement. L'impulsion créée lors du séisme va pousser des particules élémentaires qui vont pousser d'autres particules et reprendre leur place. Les vibrations (ondes sismiques) engendrées par un séisme se propagent dans toutes les directions. On distingue ainsi deux types d'ondes, les ondes de volume qui traversent la Terre et les ondes de surface qui se propagent comme leur nom l'indique à la surface de la Terre.

1.2.1 Les ondes de volume :

Se propagent à l'intérieur du globe. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et, d'une manière générale, cette dernière augmente avec la profondeur car le matériau traversé devient plus dense. Elles se propagent à l'intérieur de la terre sous deux formes :

Les ondes P :

Les ondes P sont des ondes primaires appelées aussi ondes longitudinales. Ce sont les plus rapides, elle se propagent à environ 6 km/s et sont enregistrées en premiers sur un sismogramme. Elles sont responsables du grondement sourd que l'on peut entendre au début d'un séisme. Le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par dilatation et compressions successives.

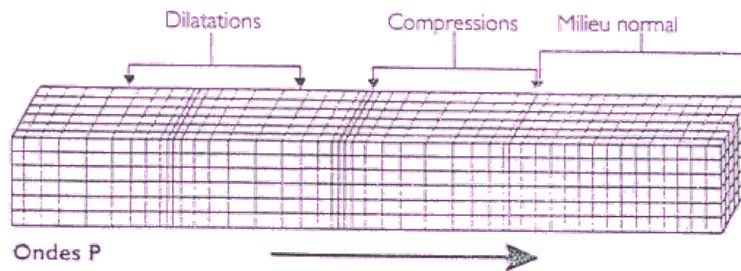


FIGURE 1.1 – L'effet des ondes P sur les milieux traversés.

Les ondes S :

Les ondes S sont des ondes secondaires appelées aussi ondes de cisaillement ou ondes transversales. A leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides, elles sont en particulier arrêtées par le noyau externe de la Terre. Leur vitesse est de 4,06 km/s. Elles apparaissent en second sur les sismogrammes.

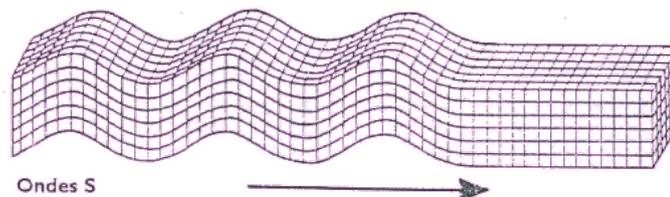


FIGURE 1.2 – L'effet des ondes S sur les milieux traversés.

1.2.2 Les Ondes de surfaces :

sont guidées par la surface de la Terre. Leur effet est comparable aux rides formées à la surface d'un lac. Elles sont moins rapides que les ondes de volume mais leur amplitude est généralement plus forte. On peut distinguer :

L'onde de Love :

c'est un anglais, Augustus Edward Hough Love qui a découvert son existence en 1911. Son déplacement est comparable à celui des ondes S sans le mouvement vertical. Les ondes de Love provoquent un ébranlement horizontal qui est la cause de nombreux dégâts aux fondations

d'un édifice qui n'est pas une construction parasismique. Les ondes de Love se propagent à environ 4 km/s.

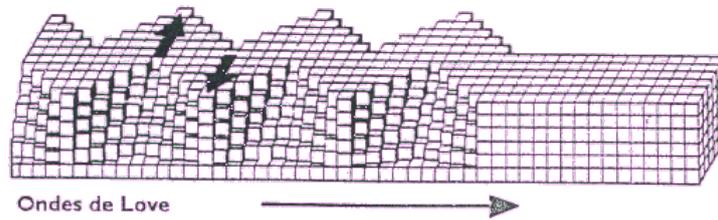


FIGURE 1.3 – Onde de Love.

L'onde de Rayleigh :

elle a été découverte par John William Strutt Rayleigh en 1885. Son déplacement est complexe, assez semblable à celui d'une poussière portée par une vague, constituant un mouvement à la fois horizontal et vertical. L'onde de Rayleigh se propage dans un milieu homogène et non homogène, où sa vitesse de propagation est inférieure à la vitesse des ondes P et à peu près 0,9 fois celle de l'onde transversale.

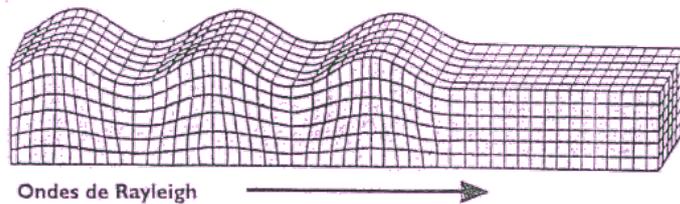


FIGURE 1.4 – Onde de Rayleigh.

En physique, la propagation des ondes est un phénomène qui est décrit par l'évolution d'une onde, ou du mouvement d'une particule dans le temps et l'espace, par rapport à un milieu. En considérant la direction de propagation de l'onde dans l'espace, on peut distinguer deux types d'ondes : Le principal paramètre caractérisant la propagation des ondes est la célérité, c'est-à-dire la vitesse de propagation d'une onde dans un milieu donné.

- Les ondes longitudinales.
- Les ondes transversales.

Le principal paramètre caractérisant la propagation des ondes est la célérité, c'est-à-dire la vitesse de propagation d'une onde dans un milieu donné.

1.3 Conditions de propagation :

Certains types d'onde ont besoin d'un milieu matériel pour se propager. Par exemple, le son ne se propage pas dans le vide. La propagation d'une onde n'implique pas le déplacement des composants du milieu à grande échelle, mais plutôt leur oscillation. Pour les ondes

mécaniques, ce n'est pas la matière qui est transportée, mais l'énergie, on parle alors de «transport d'énergie sans transport de matière»

1.4 Vitesse de propagation :

Les ondes P, on l'a vu ont la vitesse de propagation la plus importante, elles peuvent atteindre 14 km/s dans des milieux solides. En fait, cette augmentation de vitesse s'explique par l'accroissement de densité des roches traversées. Au contraire, la vitesse diminue quand les ondes atteignent un milieu liquide ou de densité plus faible.

Les ondes S quant à elle sont moins rapides que les précédentes (1,7 fois moins rapides). De même que pour les ondes P, la vitesse des ondes S augmente en rencontrant une densité plus élevée, et diminue quand la densité devient moins dense. Contrairement aux ondes P, les ondes S ne traversent pas les milieux liquides ; elles sont alors réfléchies vers la surface.

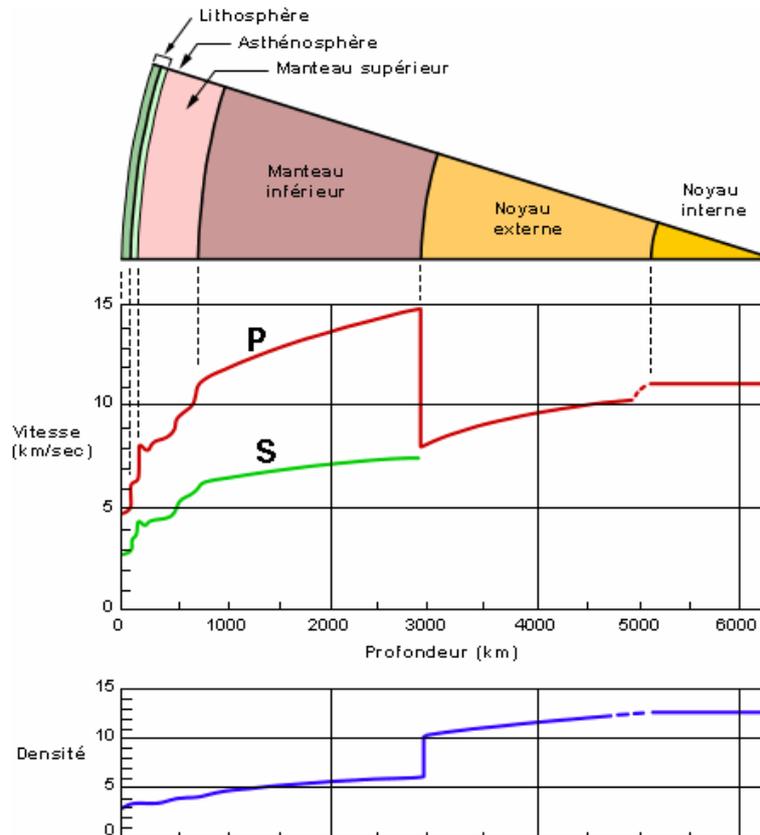


FIGURE 1.5 – Vitesse de propagation des ondes P et S.

1.5 Caractérisation du mouvement sismique :

Le spectre de réponse des structures est un outil pour estimer la réponse d'une structure au séisme, vise à estimer les sollicitations maximales, les déplacements et les accélérations maximales d'un oscillateur à un degré de liberté. Il est en fonction de la fréquence propre et de l'amortissement .

1.6 Caractérisation du mouvement sismique :

Le mouvement sismique est affecté par plusieurs paramètres dont :

1.6.1 Facteurs liés à la source :

Principalement nous disposons de deux paramètres : le moment sismique M_0 et la chute de contrainte $\Delta\sigma$. "en Ingénierie, il est préférable de caractériser un séisme par son amplitude ou par son intensité à l'épicentre".

1.6.2 Moment sismique :

Pour les séismes profonds, le mécanisme à la source est représenté par l'ensemble des forces constituant un couple dont le paramètre caractéristique est M_0 , qui est dû aux contraintes de cisaillement représentées par $M_0 = \iint_S \tau h dA = G\bar{u}A$ avec \bar{u} déplacement relatif des bords de faille, A surface de rupture et G module de cisaillement.

1.6.3 Chute de contrainte :

Un séisme survient lorsqu'il y a rupture de la faille, les plaques brusquement relâchées, libèrent l'énergie emmagasinée E lors du processus de déformation avec $E = \frac{1}{2} \iiint_V \sigma_{i,j} \epsilon_{i,j} dV$ où $\sigma_{i,j}$ et $\epsilon_{i,j}$ respectivement les tenseur des contraintes et déformations. La chute de contrainte est directement liée à l'énergie libérée et dépend de l'état de contrainte τ réagit sur le plan de la faille et s'écrit sous forme : $\frac{\tau M_0}{G}$.

Lors de la rupture, une partie de l'énergie libérée est dissipée par radiation des ondes sismiques et le complément est dissipé en chaleur sur la surface de rupture. Ce dernier est égal au travail de la force de frottement et s'écrit $\Delta E_r = \eta E$ avec E est le coefficient sismique.

1.6.4 Magnitude :

Elle est calculée à partir de l'amplitude maximale des ondes sismiques enregistrées sur un sismographe qui lie directement l'amplitude et la période d'onde en fonction de la distance épicentre, de la profondeur focale h et du facteur de site.

1.6.5 L'intensité :

C'est une détermination non instrumentale, attribuée à un séisme en fonction des dégâts subis par les constructions et les effets produits sur la population et l'environnement.

1.6.6 Facteurs liés au trajet parcouru :

Une partie d'énergie libérée se propage par radiation d'ondes sismique, à partir du foyer jusqu'à la surface libre. Les hétérogénéités, changent les caractéristiques physiques des couches

de sol, causant des réflexions et des réfractions des ondes. Une partie de cette énergie est absorbée par les milieux traversés, cela est dû à l'amortissement radiatif, et l'amortissement matériel.

1.6.7 Facteurs liés aux conditions locales :

La nature du mouvement sismique change par l'effet d'interaction sol-structure, condition géologique et topographique et pour cette raison on s'est attaché à mettre en considération la nature et caractéristique des terrains, en utilisant des méthodes analytiques. Lorsque l'on passe d'un type de sol à un autre, peut être examinée à l'aide des paramètres caractéristiques de ce mouvement tels que l'accélération ou la vitesse maximale, spectre de réponse.

1.6.8 Atténuation :

L'atténuation est définie comme la diminution de l'amplitude et une perte préférentielle des hautes fréquences du signal sismique, en fonction de la distance de propagation ou du temps. Due à la perte d'énergie sismique en chaleur ou granulaire dans un milieu inélastique fourni au moment de passage des ondes sismiques par les sols (différentes couches) traversées, ou entre un fluide et la matrice poreuse le contenant.

L'atténuation temporelle de l'amplitude de l'onde stationnaire pour un nombre d'onde donné revient à la viscosité du milieu matériel considéré comme étant un facteur dominant. Et l'atténuation spatiale à une fréquence donnée est très importante de la prendre en considération dans le calcul des éléments étendus dans l'espace.

1.7 Conclusion

Quelques notions de sismologie et d'élasto-dynamique ont été présentées dans ce chapitre. Ces notions sont les outils de base qui vont nous permettre de mener à bien notre étude. L'essentiel de notre travail s'appuie sur l'effet de site induit par la propagation verticale des ondes *SH*.

Chapitre 2

Spectre de réponse et effets d'amplification de site

2.1 Introduction

Le problème de la réponse sismique des structures implantées dans des sites spatialement variables était le sujet de plusieurs recherches considérables durant les années récentes .

Dans le présent chapitre, l'objectif est d'étudier la sensibilité de la réponse structurale aux variations spatiales en états locaux de sol en utilisant un modèle simplifié, qui tient compte des paramètres essentiels représentant le mouvement du sol et de la structure.

A cette fin, un modèle d'amplification de sol proposé par Safak[5] basé sur la formulation de temps discrets de la propagation verticale des ondes de cisaillement, associé à un coefficient sismique spatial basé sur le spectre de réponse (Zembyat[6]), ainsi que la fonction de cohérence spatiale de Der Kiureghian [7], sont intégrés en utilisant une formulation en vibrations aléatoires.

2.2 Modèle de fonction de cohérence :

2.2.1 Introduction

En fait, le signal sismique est soumis aux effets de réfractions, réflexions et diffractions du fait de la présence de couches de sols de caractéristiques différentes. De plus, l'effet de source influe sur les caractéristiques du signal sismique du fait que par exemple les sources sismiques étendues ou ponctuelles ne génèrent pas des mouvements identiques. Par conséquent, les signaux sismiques sont en amplitude et fréquence complètement différents et ce même sur des distances très petites. Il a été reconnu que quatre effets distincts sont à l'origine de la variabilité spatiale du signal sismique, il s'agit [7] :

- De la perte de cohérence des ondes sismiques due à la diffraction des ondes, définie comme étant l'effet de l'incohérence.

- Du décalage temporel dans l'arrivée du même signal sismique, dénommé l'effet du passage d'ondes
- Du changement des caractéristiques du profil de sol et l'effet qu'il a sur les caractéristiques du signal, dénommé l'effet de site.
- De la diminution graduelle de l'amplitude du signal avec la distance, définie par l'effet de l'atténuation.

Les multiples aspects liés à la variabilité du signal sismique ne sont pas, à ce jour, entièrement connus [8]. Cependant les travaux accomplis durant les deux dernières décennies ont permis de décrire les caractéristiques du signal sismique soumis à ce phénomène. En fait, le consensus existe uniquement autour de l'outil à utiliser pour modéliser ce phénomène. Il s'agit de la fonction de cohérence γ_{AB} définie par le rapport entre la fonction d'inter-densité spectrale du mouvement sismique $S_{AB}(\omega)$, entre deux points A et B et la racine carrée du produit des fonctions de densité spectrale (DSP) du mouvement sismique au niveau des points A et B c'est-à-dire $S_A(\omega)$ et $S_B(\omega)$.

$$\gamma_{AB} = \frac{S_{AB}}{\sqrt{S_A \cdot S_B}} \quad (2.1)$$

C'est une fonction complexe dont l'amplitude $|\gamma_{AB}|$ mesure la cohérence des signaux d'accélération. La phase de cette fonction quantifie le phénomène de propagation d'onde selon la distance entre A et B , ainsi que le déphasage lié à l'effet de site.

2.2.2 Modèle de Der Kiureghian :

Der Kiureghian [7] a proposé un modèle composé du produit de trois termes dont chacun est relatif à un phénomène donné, à savoir : l'effet d'incohérence, l'effet de passage d'onde et l'effet de la variation des conditions locales de site.

$$\begin{aligned} \gamma_{AB}(\omega) &= \gamma_{AB}^{(i)}(\omega) \gamma_{AB}^{(w)}(\omega) \gamma_{AB}^{(s)}(\omega) \\ &= \gamma_{AB}^{(i)}(\omega) \exp[i(\theta_{AB}^{(w)}(\omega) + \theta_{AB}^{(s)}(\omega))] \end{aligned} \quad (2.2)$$

Où :

$\gamma_{AB}^{(i)}$: est une mesure de l'incohérence entre les stations A et B.

$\gamma_{AB}^{(w)}$: est une mesure de l'effet de passage d'onde engendré par la différence dans les temps d'arrivée des ondes aux différentes locations.

$\gamma_{AB}^{(s)}$: représente l'effet de site.

Dans l'analyse qui suit, on supposera que tous les effets spatiaux résultent seulement des différences dans des effets de site. Les effets de sites sont modelisés par les fonctions de transfert de sol $H_A(\omega)$ et $H_B(\omega)$ aux deux stations. Ceci entraîne la relation suivante entre l'inter densité spectrale au niveau de la roche $S_{AB}^{(b)}(\omega)$ et l'inter densité spectrale au niveau de la surface libre $S_{AB}^{(r)}(\omega)$.

$$S_{AB}^{(r)}(\omega) = H_A(\omega) \cdot H_B^*(\omega) \cdot S_{AB}^{(b)}(\omega) \quad (2.3)$$

Quand les deux sites A et B coïncident, au lieu de l'équation précédente on peut écrire deux équations pour les deux sites A et B , à savoir :

$$S_{AA}^{(r)}(\omega) = |H_A|^2 \cdot S_{AA}^{(b)}(\omega) \quad S_{BB}^{(r)}(\omega) = |H_B|^2 \cdot S_{BB}^{(b)}(\omega) \quad (2.4)$$

Quand seuls les effets de site sont considérés, la fonction de cohérence γ_{AB} se réduit à :

$$\gamma_{AB} = \gamma_{AB}^{(s)}(\omega) = \exp[i\theta_{AB}^{(s)}(\omega)] \quad (2.5)$$

Avec la différence de phase $\theta_{AB}^{(s)}$ donné par [] :

$$\theta_{AB}^{(s)} = \tan^{-1} \frac{Im \left[\frac{H_A(\omega) H_B^*(\omega)}{H_A(\omega) H_B^*(\omega)} \right]}{Re \left[\frac{H_A(\omega) H_B^*(\omega)}{H_A(\omega) H_B^*(\omega)} \right]} \quad (2.6)$$

2.3 Modèle d'amplification de site :

2.3.1 Introduction

Les amplitudes des ondes sismiques augmentent de manière significative pendant qu'elles traversent des couches molles de sol près de la surface de la terre. Ce phénomène est généralement connu sous le nom d'amplification de site.

L'amplification locale du sol peut entraîner l'augmentation de l'excitation sismique sur un site à hauteur de plusieurs fois l'excitation sur la roche ou sur la terre ferme. Le tremblement de terre de Mexico en 1985, avec son amplification de 5 fois, a démontré l'importance du phénomène [1][2].

Un grand nombre d'investigations théoriques et expérimentales, et de modèles analytiques et empiriques d'amplification de site sont disponibles dans la littérature [8]. Les modèles analytiques sont développés en étudiant la propagation d'ondes sismiques dans divers types de sol (par exemple, linéaire, non linéaire [9], homogène, bi et tridimensionnel, et aléatoire [10]). Les modèles empiriques sont développés en étudiant des rapports spectraux des mouvements enregistrés sur un site aux mouvements sur la roche, et en corrélant les rapports avec les caractéristiques physiques du sol. Plus récemment, les méthodes des éléments finis, différences finies, et les éléments de frontière ont été suggérées pour étudier l'amplification de site.

2.3.2 Modèle de KANAI-TAJIMI :

Pour modéliser les effets locaux des sites on peut commencer par la densité spectrale de Kanai Tajimi $S(\omega)$:

$$S(\omega) = \frac{\omega_g^4 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2} \cdot S_0 \quad (2.7)$$

La fréquence ω_g et la constante d'amortissement ξ_g sont les propriétés du sol local et S_0 est un facteur d'intensité. En termes de la théorie de vibrations aléatoires, le spectre de Kanai-Tajimi

représente un effet de filtrage du dépôt de sol aux excitations de bruit blanc de la roche. Les valeurs du $\omega_g = 4\pi rad/s$ et de $\xi_g = 0.6$ ont été traditionnellement assignées aux conditions de sol ferme. En variant les valeurs de ω_g et ξ_g on peut obtenir des valeurs représentant des effets désirés de filtrage du sol. Les gammes typiques pour ces paramètres sont :

Pour ω_g : $2\pi \rightarrow 6\pi rad/s$

Pour ξ_g : $0.2 \rightarrow 0.6$

Le spectre de Kanai-Tajimi prend une valeur différente de zéro peu réaliste pour $\omega = 0$. Cet effet peu désiré a été corrigé en présentant un filtre passe-haut, comme proposé par Clough et Penzien [11], menant à la fonction de densité spectrale suivante :

$$S(\omega) = \frac{(\omega_g^4 + (2\xi_g\omega_g\omega)^2)\omega^4}{((\omega_g^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_g\omega_g\omega)^2) \cdot ((\omega_b^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_b\omega_b\omega)^2)} \cdot S_0 \quad (2.8)$$

Dans laquelle $\omega_b = 1.636$ et $\xi_b = 0.619$ sont des constantes proposés par Clough et Penzien [11]. Le spectre de Kanai-Tajimi, quoique populaire parmi les ingénieurs, a été critiqué par des sismologues par manque de perspicacité physique pour les effets d'amplification de sol.

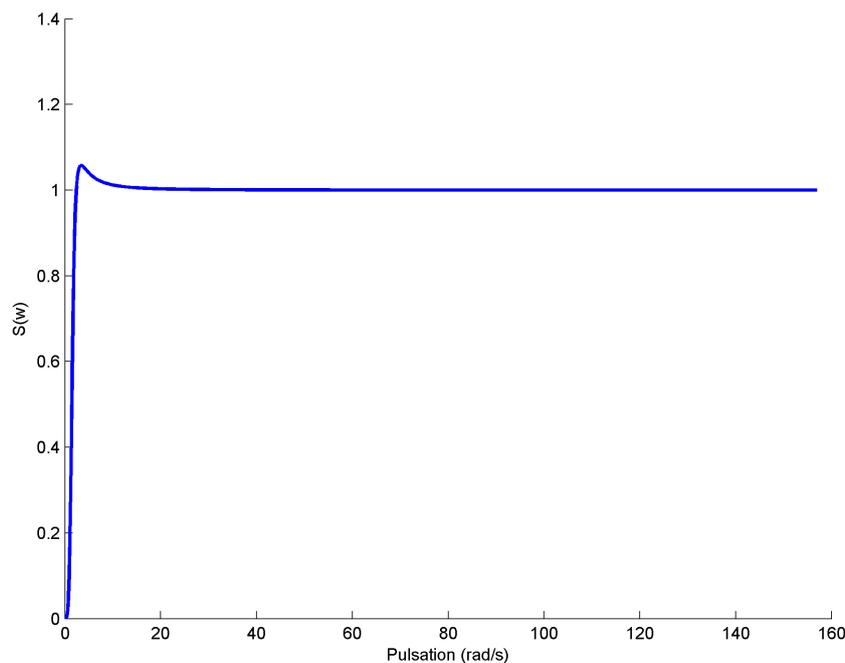


FIGURE 2.1 – Spectre de Clough et Penzien.

2.3.3 Modèle de SAFAK :

Présentation du modèle :

Récemment, Safak a proposé un modèle d'amplification de sol basé sur l'analyse de temps discrets des réflexions de propagation verticale des ondes de cisaillement. A la différence du spectre de Kanai-Tajimi, ce modèle reflète correctement la physique de l'amplification de sol résultant de l'interférence et des réflexions des ondes. La formulation de temps discret

de la propagation des ondes est parmi les modèles analytiques simples pour l'amplification de site. En comparaison avec les précédents modèles, ce modèle a des avantages importants [5] :

- Il utilise les paramètres physiques de site, y compris l'atténuation intrinsèque Q .
- Pour une seule couche de sol surmontant un rocher et soumise à la propagation verticale des ondes, le modèle est exact et il emploie seulement trois paramètres (τ, r, Q).
- Les amplitudes aussi bien que les caractéristiques de phase de site sont considérées dans le modèle.
- Le modèle peut incorporer des réflexions multiples des ondes dans la couche.
- les mouvements du sol sont simulés par des filtres récursifs dans le domaine temporel.

Les modèles de temps discrets sont commodes pour l'utilisation des techniques de vibration aléatoires, pour étudier la sensibilité des spectres de réponse aux paramètres physiques de site et pour identifier les paramètres physiques de site à partir des mouvements enregistrés.

Pour notre travail on va opter pour la formulation de la propagation des ondes dans une seule couche au dessus du substratum. Pour maintenir les équations relativement simples, nous considérons la propagation verticale des ondes SH seulement. La méthode peut facilement être étendue aux ondes SH suivant n'importe quel angle d'incidence en modifiant les densités et les coefficients de réflexion des ondes (Kausse and Roesset 1984)[12]. La méthode peut également être étendue aux ondes P et SV en utilisant les coefficients de réflexion appropriés, qui sont donnés par (Tolstoy and Usdin 1953)[13]. Cependant, les équations seraient plus compliquées.

Nous présentons les équations en deux étapes : d'abord en ne supposant aucune atténuation dans le sol, puis en tenant compte de l'atténuation due au frottement interne Q .

Propagation d'ondes sans atténuation :

On considère une couche de sol surmontant un substratum du côté droit et un affleurement rocheux du côté gauche

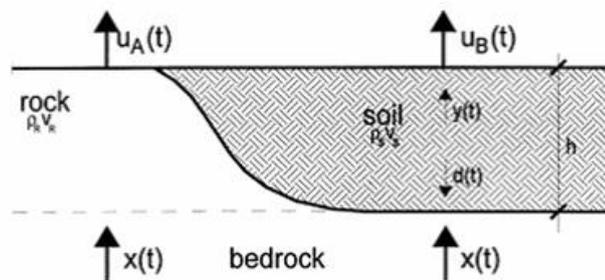


FIGURE 2.2 – Transformation du mouvement du substratum à la surface pour une couche de sol (côté droit) et un affleurement rocheux (côté gauche).

où :

$d(t)$: représente l'onde qui se propage vers le bas.

$y(t)$: représente l'onde qui se propage vers le haut.

$\tau_s = h/V_s$: le temps de propagation de l'onde dans la couche du sol.

$u_A(t)$ et $u_B(t)$ sont les déplacements enregistrés au niveau de la surface de l'affleurement rocheux et le sol respectivement.

$$u(t) = -rd(t - \tau_s) + (1 + r).x.(t - \tau)$$

$$d(t) = y(t - \tau) \quad (2.9)$$

$$y(t) = \frac{u(t)}{2}$$

Où r est le coefficient de réflexion des ondes, et $(1+r)$ est le coefficient de transmissions donnés par Aki et Richards [4] :

$$r = \frac{\rho_r V_r - \rho_s V_s}{\rho_r V_r + \rho_s V_s} \quad (2.10)$$

ρ_r, V_r, ρ_s, V_s sont les densités et vitesses des ondes de cisaillement pour la roche et le sol respectivement. $u_B(t)$ peut se réécrire après la substitution de $d(t)$ dans $y(t)$ et puis $y(t)$ dans $u_B(t)$ comme suit [5] :

$$u_B(t) = -r.u_B(t - 2\tau_s) + 2(1 + r).x.(t - \tau_s) \quad (2.11)$$

En introduisant la fonction excitation complexe unitaire $e^{i\omega t}$ dans l'équation (4.11) on obtient :

$$u_B(t) = -r.u_B(t - 2\tau_s) + 2(1 + r).e^{i\omega(t-\tau_s)} \quad (2.12)$$

Dont la solution est de la forme :

$$u_B(t) = H_s(\omega).e^{i\omega t} \quad (2.13)$$

Si on reporte l'Eq. (4.12) dans l'Eq. (4.12), on trouve que la fonction de transfert du sol sans atténuation prend la forme :

$$H_s(\omega) = \frac{(1 + r)\exp(-i\omega\tau_s)}{1 + r \exp(-2i\omega\tau_s)} \quad (2.14)$$

$x(t)$ vers le haut, les ondes passant par l'affleurement rocheux sortent sur la surface, provoquant le mouvement $u_A(t)$. Ce chemin de propagation est affecté par l'amplification extérieure libre de facteur 2 seulement, et par la phase retard en raison de la propagation dans la roche. Ainsi, la fonction de transfert du mouvement au point A peut être donnée comme :

$$H_r(\omega) = \exp(-i\omega\tau_r) \quad (2.15)$$

avec :

$\tau_r = h/V_r$ le temps de propagation dans la roche.

Propagation d'ondes avec atténuation :

Safak [5] a proposé une méthode approximative pour intégrer l'atténuation des ondes dans la fonction de transfert du sol au moyen du facteur de qualité Q . Ceci est fait en recalculant le temps de propagation de sol τ_s le coefficient de réflexion r . En utilisant la vitesse complexe dans le sol $V_s + i\omega$ avec $1/Q = 2\omega/V_s$ [7] :

$$\omega = \frac{V_s}{2Q} \quad (2.16)$$

Un nouveau coefficient de réflexion complexe est défini :

$$r' = \frac{\rho_r V_r - \rho_s (V_s + i\omega)}{\rho_r V_r + \rho_s (V_s + i\omega)} \quad (2.17)$$

$$\tau'_s = \frac{h}{V_s + i\omega} \quad (2.18)$$

On peut approcher les eqs. (2.15) et (2.16) comme suit :

$$r' = \frac{4Qr - i(1-r)}{4Qr + i(1-r)} \approx r - \frac{i}{4Q} \quad (2.19)$$

$$\tau'_s = \frac{2Q}{2Q + i} \cdot \tau_s \approx \left(1 - \frac{i}{2Q}\right) \cdot \tau_s \quad (2.20)$$

Les approximations (2.17) et (2.18) prise pour $|r| \leq 1$ et $Q \gg 1$ et ont été numériquement vérifiées par Safak [5]. La substitution de τ'_s et r' au lieu de τ_s et r dans l'eq. (2.14) donne, après quelques manipulations algébriques, la fonction de transfert suivante pour la couche de sol comprenant des effets d'atténuation :

$$H_s(\omega) = \frac{\left(1 + r - \frac{i}{4Q}\right) \exp[-i\omega\tau_s(1 - i/2Q)]}{1 + \left(r - \frac{i}{4Q}\right) \exp[-2i\omega\tau_s(1 - i/2Q)]} \quad (2.21)$$

Ce qui est exprimé encore en termes de r et τ_s à valeurs réelles.

La fonction de transfert pour la roche reste sans changement [Eq (2.15)], car elle décrit seulement la transmission extérieure libre et la phase retard. Le facteur " 2 " dans les équations (2.14), (2.15) et (2.20) relie les fonctions de transfert au mouvement de la roche. Il est plus commode de relier les fonctions de transfert directement au mouvement extérieur Ainsi, en conclusion, les fonctions de transfert prennent la forme suivante :

$$H_s(\omega) = \frac{\left(1 + r - \frac{i}{4Q}\right) \exp[-i\omega\tau_s(1 - i/2Q)]}{1 + \left(r - \frac{i}{4Q}\right) \exp[-2i\omega\tau_s(1 - i/2Q)]} \quad (2.22)$$

$$H_r(\omega) = \exp(-i\omega\tau_r) \quad (2.23)$$

Le module de la fonction de transfert (2.22), $|H_s(\omega)|$, est tracé dans la Fig.2.2 pour $r = 0.5, \tau_s = 0.2s$ et $Q = 30$.

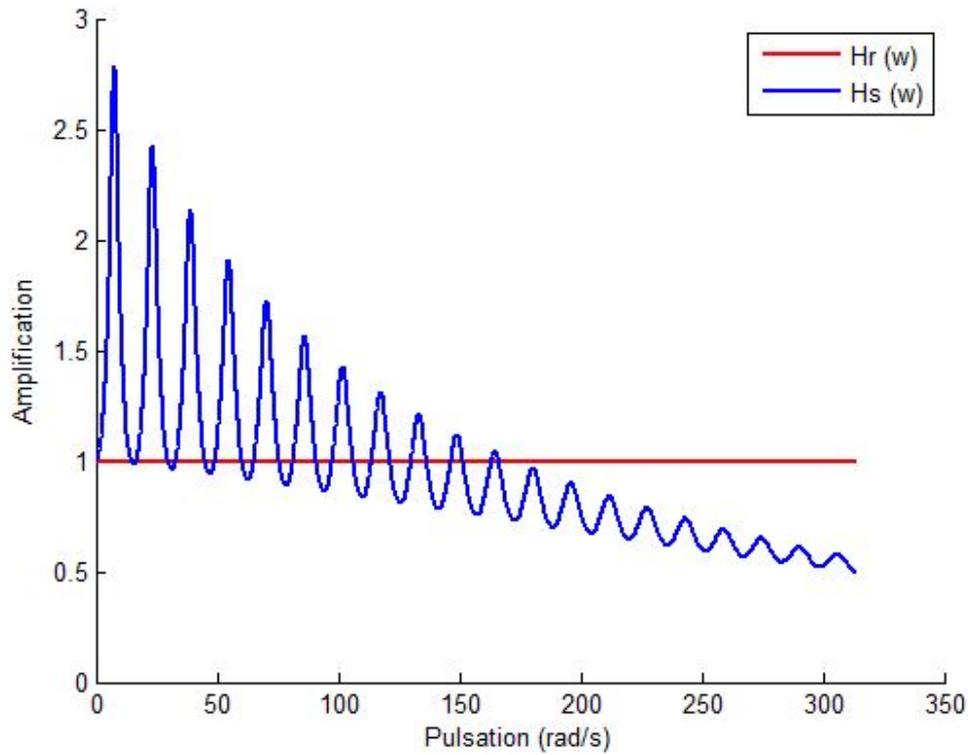


FIGURE 2.3 – Module de la fonction de transfert

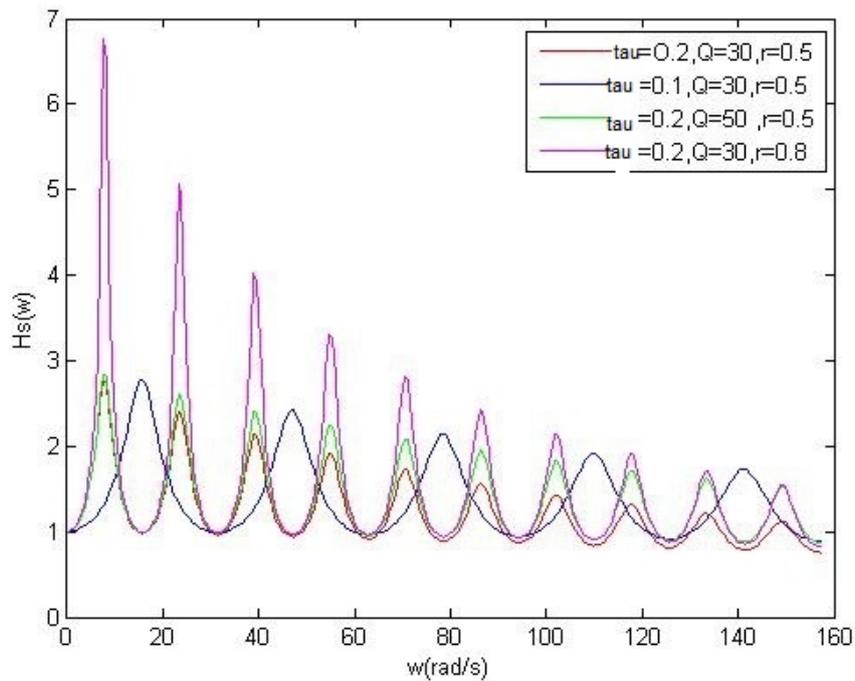


FIGURE 2.4 – Effet de la variation de τ , Q et r sur la fonction de transfert

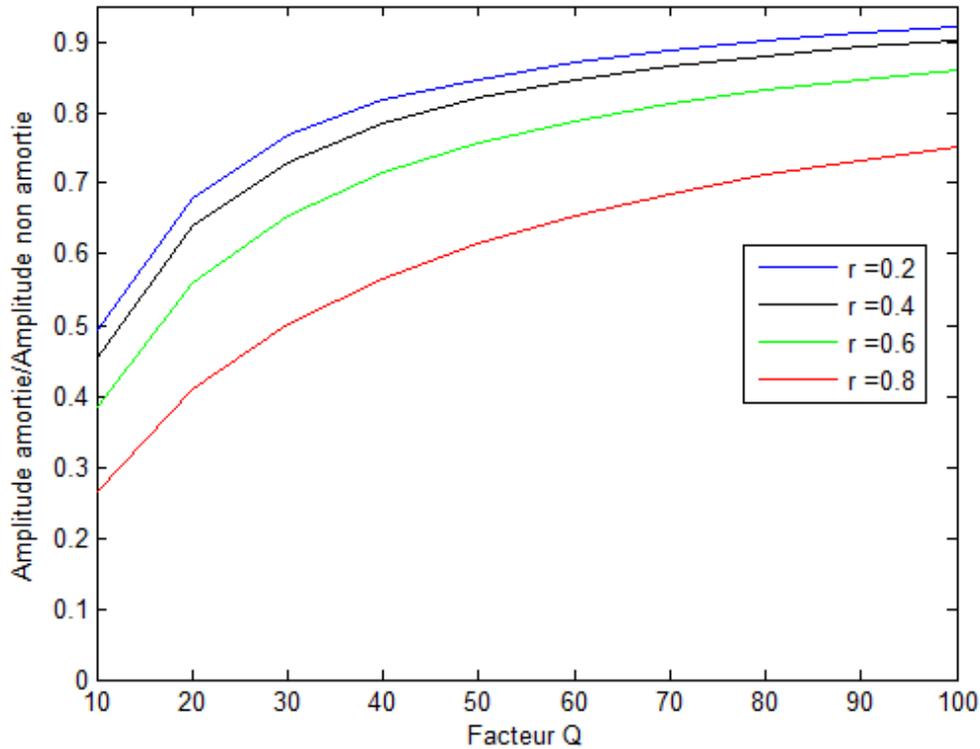


FIGURE 2.5 – Le rapport entre les amplifications amorties et non amorties

La figure (2.3) montre la variation de la fonction de transfert avec τ , Q et r . Le paramètre τ détermine l'endroit des pics, tandis que les paramètres r et Q affectent les amplitudes des pics et leur affaiblissement avec l'augmentation de la fréquence.

Afin de voir la réduction des pics d'amplification due au amortissement, on a tracé le rapport entre les amplifications amorties et non amorties pour différentes valeurs de Q et r . La figure (2.4) montre que la réduction d'amplification augmente avec l'augmentation de Q et la diminution de r . Pour des valeurs de Q assez grandes et de petites valeurs de r , le rapport converge vers 1, et l'influence d'amortissement devient négligeable.

Dans l'analyse de vibration aléatoire qui suit, le modèle de Safak est appliqué pour décrire les effets spatiaux simultanés entre deux sites : roche et sol.

2.4 Coefficient sismique spatiale :

On considère la réponse sismique d'un système dynamique à un degré de liberté (1ddl) sous l'effet de deux excitations différentes aux appuis A et B . Le système présenté dans la Figure (2.6) a été déjà considéré lors d'analyses des effets sismiques spatiaux (Zembyat et Krenk [14], Zembyat [6], Zembyat et Rutenberg [15]).

L'équation du mouvement pour l'oscillateur simple de la Figure (2.6) :

$$\ddot{q} + 2\xi\omega_0\dot{q} + \omega_0^2q = -\frac{1}{2}[\ddot{u}_A(t) + \ddot{u}_B(t)] \quad (2.24)$$

avec :

$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ est la pulsation propre de l'oscillateur.

et $\xi = \frac{c}{2.m.\omega_0}$ est le coefficient d'amortissement.

Le déplacement totale égal à la somme des déplacements pseudo-statique q^p et dynamique q :

$$q^t = q^p + q \quad \text{avec :} \quad q^p = \frac{u_A + u_B}{2} \quad (2.25)$$

Les forces de cisaillement dans les colonnes :

$$f_A(t) = \frac{k}{2}(q^t - u_A) = \frac{k}{2}\left(\frac{u_B(t)}{2} - \frac{u_A(t)}{2} + q(t)\right) \quad (2.26a)$$

$$f_B(t) = \frac{k}{2}(q^t - u_B) = \frac{k}{2}\left(\frac{u_A(t)}{2} - \frac{u_B(t)}{2} + q(t)\right) \quad (2.26b)$$

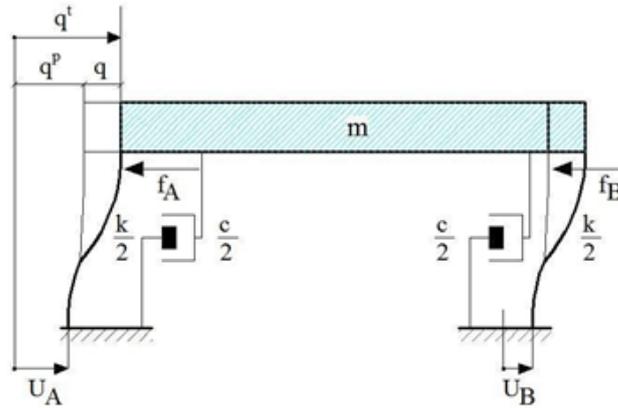


FIGURE 2.6 – Système dynamique 1ddl

A partir des équations ci- dessus on peut tirer les conclusions suivantes :

- La réponse en déplacement d'un système SDOF soumis à des excitations différentes aux supports est juste une réponse à la moyenne simple des excitations.
- Cependant, la réponse en force est une combinaison des réponses dynamique et pseudo statique, et elle est donc plus influencée par le mouvement différentiel entre supports.

Les solutions des équations (2.24) , (2.26a) et (2.26b) en domaine fréquentiel sont données par :

$$q(t) = -\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\ddot{u}_A(\omega) - \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\ddot{u}_B(\omega) \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned}
 f_A(t) = & \frac{k}{4} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} d\ddot{u}_B(\omega) - \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} d\ddot{u}_A(\omega) \right. \\
 & \left. - \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\ddot{u}_A(\omega) - \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\ddot{u}_B(\omega) \right)
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

et :

$$\begin{aligned}
 f_B(t) = & \frac{k}{4} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} d\ddot{u}_A(\omega) - \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} d\ddot{u}_B(\omega) \right. \\
 & \left. - \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\ddot{u}_A(\omega) - \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\ddot{u}_B(\omega) \right)
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

2.4.1 La densité spectrale du déplacement dynamique et des forces :

On commence par la DSP du déplacement dynamique. Il s'agit d'un problème à input double et output simple :

$$S_q(\omega) = [H^*(\omega)]^T \cdot [S_u] \cdot [H(\omega)] \tag{2.30}$$

où la fonction de transfert de l'oscillateur est donnée par :

$$H(\omega) = \frac{-1}{(\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\xi\omega_0\omega)} \tag{2.31}$$

$$[H(\omega)] = \begin{bmatrix} -(\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\xi\omega_0\omega)^{-1} \\ -(\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\xi\omega_0\omega)^{-1} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} H \\ H \end{bmatrix} \tag{2.32}$$

La matrice spectrale pour le vecteur $[\ddot{u}_A(t) \quad \ddot{u}_B(t)]^T$ nécessaire au calcul de la densité spectrale des déplacements :

$$\begin{bmatrix} S_A & \gamma_{AB}\sqrt{S_A \cdot S_B} \\ \gamma_{AB}^*\sqrt{S_A \cdot S_B} & S_B \end{bmatrix} \tag{2.33}$$

La densité spectrale pour le déplacement dynamiques $q(t)$ est donnée par :

$$S_q(\omega, \omega_0) = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} H^* & H^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_A & \gamma_{AB}\sqrt{S_A \cdot S_B} \\ \gamma_{AB}^*\sqrt{S_A \cdot S_B} & S_B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H \\ H \end{bmatrix} \tag{2.34}$$

Ce qui donne :

$$S_q(\omega, \omega_0) = \frac{1}{2} |H|^2 \left(\frac{|H_A|^2 + |H_B|^2}{2} + |H_A||H_B| \operatorname{Re}\gamma_{AB} \right) S \tag{2.35}$$

Et pour les forces :

$$S_f(\omega) = [H^*(\omega)]^T \cdot [S_u] \cdot [H(\omega)] \tag{2.36}$$

Avec :

$$[H(\omega)] = \frac{k}{4} \begin{bmatrix} -1 \\ +1 \\ -H \\ -H \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

et La matrice spectrale pour le vecteur $[u_A(t)u_B(t)\ddot{u}_A(t)\ddot{u}_B(t)]^T$ nécessaire au calcul de la densité spectrale des forces :

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\omega^4}S_A & \frac{1}{\omega^4}\gamma_{AB}\sqrt{S_A \cdot S_B} & -\frac{1}{\omega^2}S_A & -\frac{1}{\omega^2}\gamma_{AB}\sqrt{S_A \cdot S_B} \\ \frac{1}{\omega^4}\gamma_{AB}^*\sqrt{S_A \cdot S_B} & \frac{1}{\omega^4}S_B & -\frac{1}{\omega^2}\gamma_{AB}^*\sqrt{S_A \cdot S_B} & -\frac{1}{\omega^2}S_B \\ -\frac{1}{\omega^2}S_A & -\frac{1}{\omega^2}\gamma_{AB}\sqrt{S_A \cdot S_B} & S_A & \gamma_{AB}\sqrt{S_A \cdot S_B} \\ -\frac{1}{\omega^2}\gamma_{AB}^*\sqrt{S_A \cdot S_B} & \gamma_{AB}^*\sqrt{S_A \cdot S_B} & -\frac{1}{\omega^2}\gamma_{AB}^*\sqrt{S_A \cdot S_B} & S_B \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Les densités spectrales pour les forces f_A et f_B :

$$\begin{aligned} Sf_A(\omega, \omega_0) = & \frac{k^2}{8} \left(\frac{1}{\omega^4} \left(\frac{|H_A|^2 + |H_B|^2}{2} - |H_A||H_B| \cdot Re\gamma_{AB} \right) \right. \\ & - \frac{2}{\omega^2} \left(\frac{|H_A|^2 + |H_B|^2}{2} ReH + |H_A||H_B| \cdot ImH \cdot Re\gamma_{AB} \right) \\ & \left. + |H^2| \left(\frac{|H_A|^2 + |H_B|^2}{2} + |H_A||H_B| Re\gamma_{AB} \right) \right) \cdot S \end{aligned} \quad (2.39)$$

et :

$$\begin{aligned} Sf_B(\omega, \omega_0) = & \frac{k^2}{8} \left(\frac{1}{\omega^4} \left(\frac{|H_A|^2 + |H_B|^2}{2} - |H_A||H_B| \cdot Re\gamma_{AB} \right) \right. \\ & + \frac{2}{\omega^2} \left(\frac{|H_A|^2 + |H_B|^2}{2} ReH + |H_A||H_B| \cdot ImH \cdot Re\gamma_{AB} \right) \\ & \left. + |H^2| \left(\frac{|H_A|^2 + |H_B|^2}{2} + |H_A||H_B| Re\gamma_{AB} \right) \right) \cdot S \end{aligned} \quad (2.40)$$

où :

$H = H(\omega, \omega_0)$, $H_B = H_s(\omega)$, $H_A = H_r(\omega)$, $S = S(\omega)$ and $\gamma_{AB} = \gamma_{AB}(\omega)$. Les trois termes des équations (2.39) et (2.40) représentent une composante dynamique (le troisième terme) et pseudo-statique (le premier terme), un terme représentant une combinaison des deux effets (deuxième terme).

2.4.2 Le coefficient sismique spatial :

L'intégration par rapport à la fréquence des densités spectrales données par les équations (2.35), (2.39) et (2.40) pour une plage de valeurs de la fréquence naturelle ω_0 mène à la variance (the mean square response spectrum) [6] :

$$\sigma^2(\omega_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega, \omega_0) d\omega \quad (2.41)$$

La normalisation de l'écart type (RMS) (root mean square) obtenu à partir de l'eq. (2.41) par l'écart type calculée pour la roche (sol ferme) donne la réponse sous la forme du coefficient sismique spatial suivant basé sur le spectre de réponse [6] :

$$\frac{\sigma}{\sigma_R} = \frac{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega, \omega_0) d\omega}}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} S_R(\omega, \omega_0) d\omega}} \quad (2.42)$$

Là où $S(\omega, \omega_0)$ dans le numérateur représente des densités spectrales des déplacements dynamiques [Eq. (2.35)] ou des forces [Eqs. (2.39)et (2.40)], et la densité spectrale $S_R(\omega, \omega_0)$ dans le dénominateur fait référence à la réponse de la structure, en supposant que la structure est appuyée dans la roche en A et B (Fig.2.6).

2.5 Conclusion

Dans le cadre de ce chapitre ,une analyse des effets d'amplification de site sur la réponse sismique des structures multi-support est présentée. Les effets de sites sont modélisés en considérant des réflexions et des transmissions de la propagation verticale des ondes de cisaillement de la roche vers la surface par une couche de sol. Une approche vibration aléatoire basée sur le spectre de réponse d'un oscillateur simple sur deux appuis, dont un est fondé sur la roche et l'autre sur la couche de sol, est formulée afin d'étudier l'influence des excitations non-uniformes sur des structures multisupport. Les spectres de réponse résultants sont formulés en déplacement et forces .

Chapitre 3

Analyse de l'effet des paramètres de site sur le spectre de réponse

3.1 Introduction :

La valeur maximale de la réponse sismique des structures soumises à des excitations non uniformes est liée directement aux paramètres de site, alors une investigation paramétrique sur l'effet de ces paramètres sur le comportement des structures est nécessaire afin de vérifier leurs fiabilité.

3.2 Les paramètres utilisés dans l'étude paramétrique :

On suppose que le substratum est excité par un bruit blanc, filtré avec un filtre passe haut de Ruiz-Penzien [11] (éq.2.8).

En filtrant les mouvements au niveau du substratum rocheux par les fonctions de transfert du sol et de la roche H_s et H_r (équations (2.23) et (2.22)), on peut déduire les mouvement au niveau de l'affleurement rocheux et à la surface du sol. Ces mouvements sont représentés par leur fonction d'inter et d'auto densité spectrale de puissance (équation (2.3) et (2.4)).

Les paramètres principaux à étudier sont les vitesses de l'onde de cisaillement dans le sol V_s , et dans la roche V_r , et les densités de masse du sol et de la roche ρ_s et ρ_r qui sont reliés par les fameuses expressions suivantes :

$$V_s = \sqrt{\frac{G_s}{\rho_s}} \quad , \quad V_r = \sqrt{\frac{G_r}{\rho_r}} \quad (3.1)$$

où :

G_s et G_r sont des modules de cisaillement pour le sol et la roche, respectivement.

Les quatre paramètres principaux relatifs aux effets d'amplification du sol et de la roche peuvent être représentés par un coefficient simple défini comme le rapport d'impédance roche/sol :

$$I_{r/s} = \frac{\rho_r \cdot V_r}{\rho_s \cdot V_s} \quad (3.2)$$

Afin de simplifier l'analyse, on suppose que les propriétés de la roche sont constants, avec $\rho_r = 3g/cm^3$ et $V_r = 1500m/s$. Pour ces paramètres de roche et des sols typiques $\rho_s = 1.5 - 2g/cm^3$ et $V_s = 100 - 750m/s$, le rapport d'impédance roche/sol peut atteindre la valeur de 3 pour le sol dense et 30 pour des sols très mous. Les valeurs respectives du coefficient de réflexion r (Eq. (2.10)) varient de 0.5 ($I_{r/s} = 3$) à 0.935 ($I_{r/s} = 30$).

Un autre paramètre important du sol à considérer est le facteur de qualité Q . Il est lié directement au taux d'amortissement visqueux critique, ξ_{sol} , avec $\xi_{soil} = \frac{1}{2Q}$.

Dans le présent travail, on suppose que le facteur de qualité Q est égal à 30, mais les résultats sont également examinés pour la gamme $10 < Q < 100$, qui correspond respectivement à $0.05 > \xi_{soil} > 0.005$.

Le dernier paramètre de sol à étudier est l'épaisseur, h , de la couche de sol. En l'absence de la couche de sol dans le site B, le rapport d'impédance $I_{r/s}$ est égal à 1 ($r \rightarrow 0$), les propriétés du site B sont les mêmes que ceux du site A, et les deux appuis dans le système sont soumis à une excitation uniforme.

3.2.1 Exemple d'application :

On considère d'abord l'ensemble suivant des données pour le site B représentant la couche de sol :

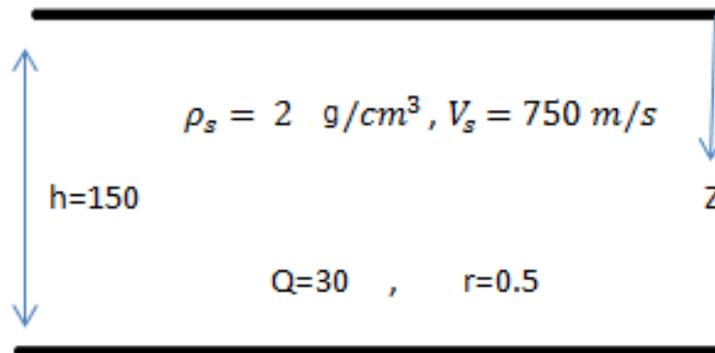


FIGURE 3.1 – Profil d'un sol.

Pour étudier la densité spectrale des forces et aussi les RMS et le RMS normalisé on utilise le modèle de CLOUGH et PENZIEN au niveau de substratum avec $S_0 = 1m^2/s^3$.

La figures (3.2) montre l'allure de densité spectrales des forces f_A et f_B pour les valeurs des paramètres de sol considérés et pour les paramètres d'oscillateur $\omega_0 = 2\pi rad/s$ et $\xi = 0,05$. On observe que la différence entre les densités spectrales des forces f_A et f_B est très faible pour les valeurs des paramètres de sol et d'oscillateur considérées.

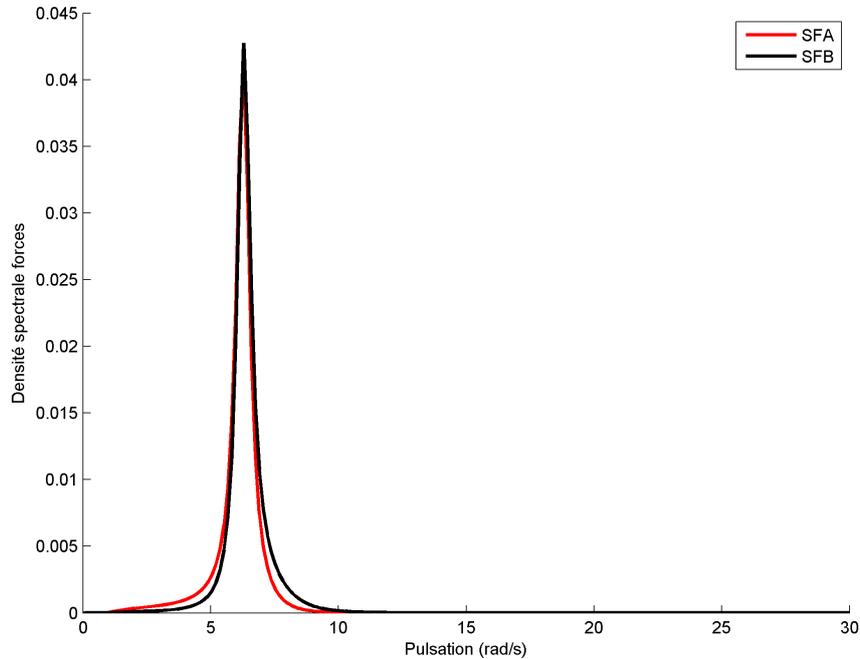


FIGURE 3.2 – la densité spectrale des forces.

Le RMS des forces F_A et F_B tracé sur la figure (3.3) ne s'annule pas. Ceci est dû à la prédominance de l'effet pseudo-statique par rapport à l'effet dynamique et les forces deviennent proportionnelles au mouvement différentiel entre les deux supports dans le cas d'un mouvement non uniforme, et a un moment donné le RMS devient stable. Alors que dans le cas d'un mouvement sismique uniforme, les forces au niveau des supports de la structure ne reçoivent pas la contribution de la composante pseudo-statique.

Ainsi les RMS normalisés des forces ont des valeurs très importantes pour des valeurs très faibles de la période naturelle de la structure.

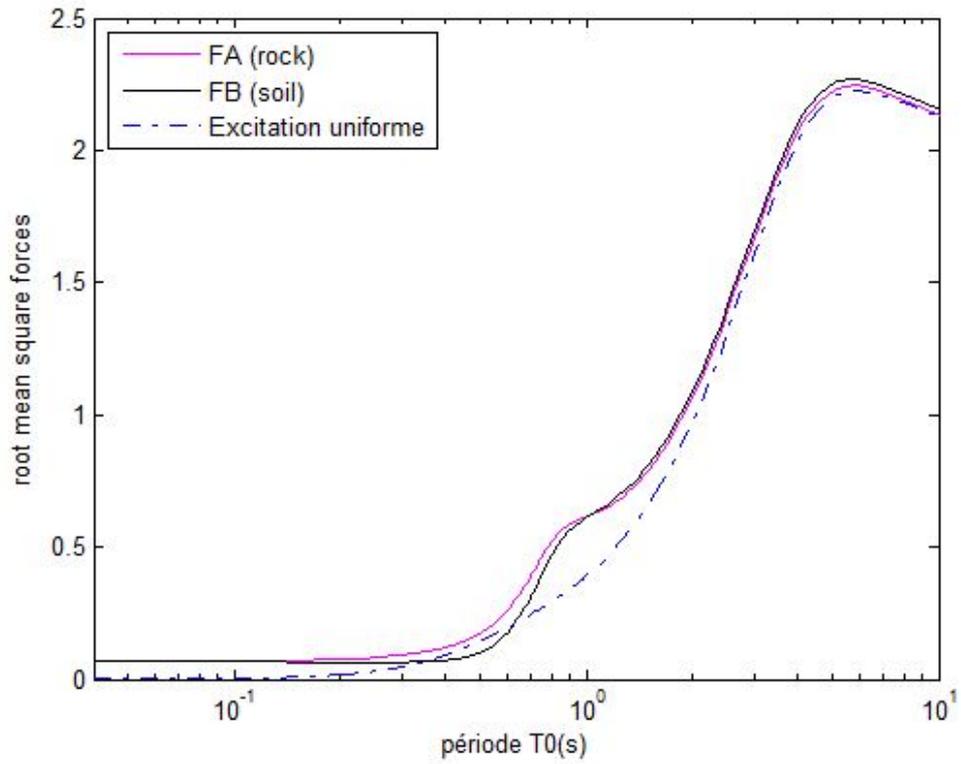


FIGURE 3.3 – RMS des forces.

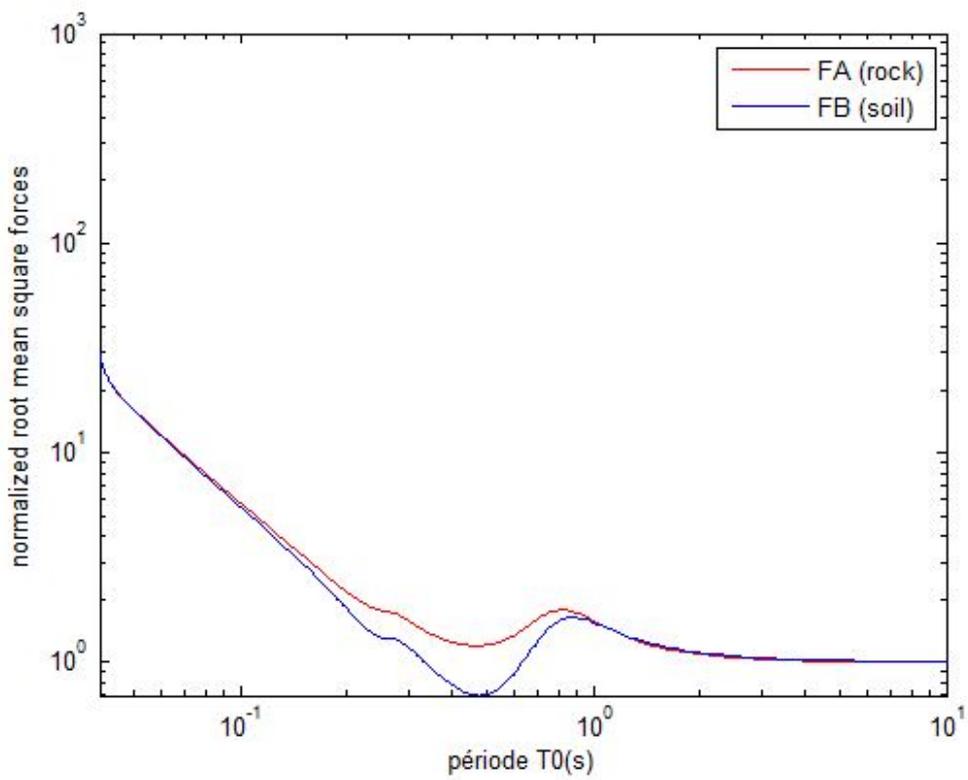


FIGURE 3.4 – RMS normalisé des forces.

3.3 Influence de l'épaisseur h de la couche du sol :

Dans cette étude paramétrique, on considère trois (03) valeurs d'épaisseur de la couche du sol : $h = 50\text{m}$, 150 m et 500 m .

3.3.1 L'influence de l'épaisseur h de la couche de sol sur les densités spectrales des forces :

La figure (3.5) montre que les densités spectrales des forces pour $h = 50\text{m}$ et 500m sont presque identiques, tandis que celle calculée pour une valeur intermédiaire $h = 150\text{ m}$ est largement supérieure et plus particulièrement pour la valeur de la fréquence coïncidant avec la fréquence de résonance de la structure $\omega_0 = 2\pi(\text{rad/s})$.

Mais la courbe exhibe un deuxième pic à $\omega_0 = 2.35\text{rad/s}$, correspondant au mode fondamental du sol, dans le cas de l'épaisseur de la couche de sol $h = 500\text{ m}$.

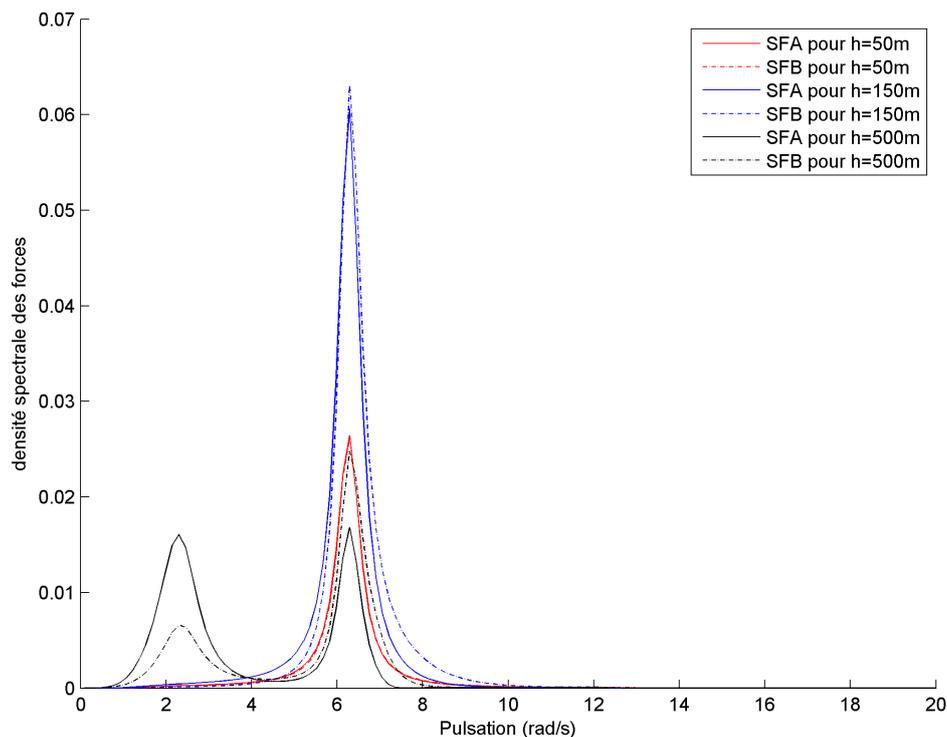


FIGURE 3.5 – Densité spectrale des forces

Dans ce contexte, on va étudier la variation du pic de la densité spectrale des forces ($\omega = 2\pi$) en fonction de l'épaisseur de la couche de sol pour le cas d'une structure ayant une fréquence naturelle ($\omega_0 = 2\pi$).

La figure (3.6) montre que la densité spectrale ne varie pas proportionnellement avec l'épaisseur h mais exhibe plusieurs maxima correspondant aux fréquences de résonance du sol coïncidant avec la fréquence naturelle de la structure ($\omega_0 = 2\pi$). On peut déduire directement

la valeur de l'épaisseur h correspondant aux maxima de la courbe de la densité spectrale des forces. Elle est donnée par :

$$\omega_0 = \omega_{k,soil} = 2.\pi \frac{kV_s}{4h}, k = 1, 2, 3, \dots \implies h = \frac{kV_s}{4} \quad (3.3)$$

Pour $k=1$: $h=187.5\text{m}$ (premier pic)

Pour $k=3$: $h=562.5\text{m}$ (deuxième pic)

Alors il est raisonnable de trouver la densité spectrale pour $h=150\text{m}$ supérieure à celle pour $h=500\text{m}$. La courbe, de la variation du pic des forces ($\omega = \omega_0$) en fonction de l'épaisseur de la couche de sol, sont tracées également pour le cas de ($\omega_0 = 2.\pi$) (figure 6.4). On peut remarquer que la densité spectrale des forces diminue lorsque la fréquence naturelle de la structure augmente .

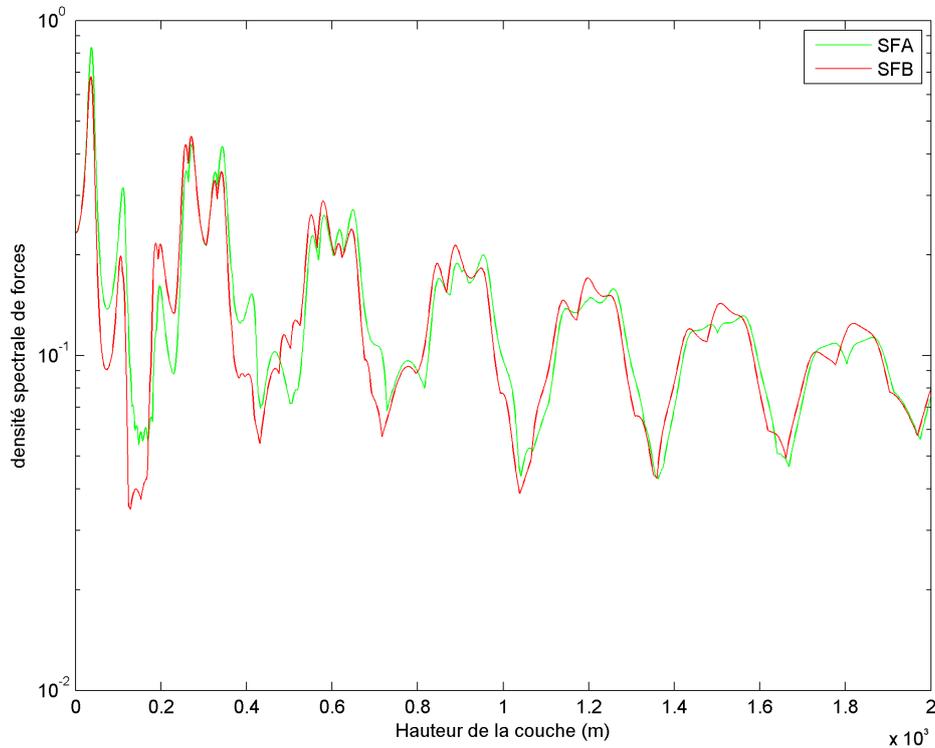


FIGURE 3.6 – Densité spectrale des forces en fonction de la profondeur

3.3.2 L'influence de la hauteur de la couche de sol sur le RMS et sur le coefficient sismique spatiale des forces :

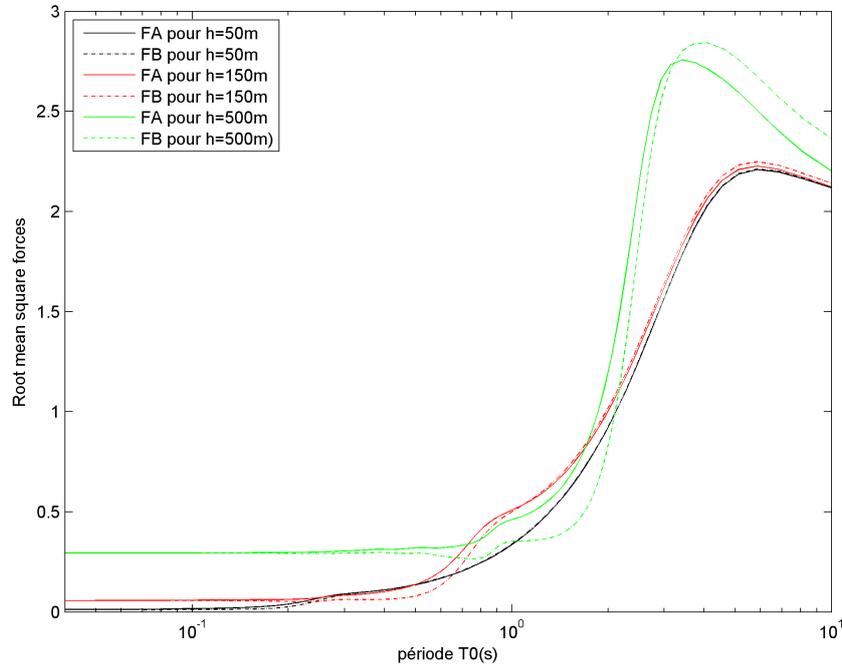


FIGURE 3.7 – RMS de forces pour différentes valeurs de h

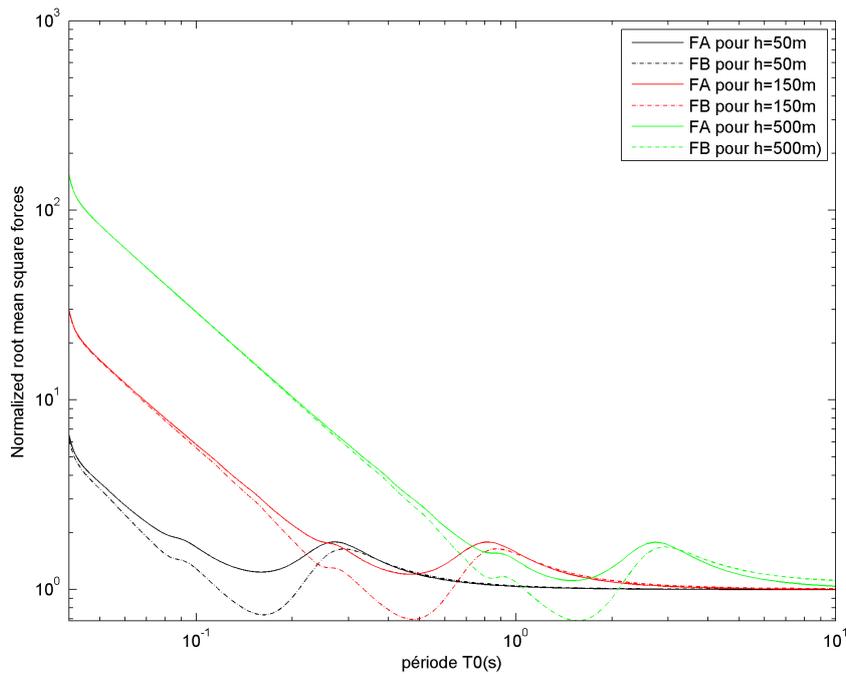


FIGURE 3.8 – RMS normalisé de forces pour différentes valeurs de h

On remarque que :

Le RMS des forces n'est pas proportionnel à l'épaisseur ' h ' mais reflète directement la résonance structure-sol. Sur la gamme de période de 0.1 à 1 la prédominance revient à la composante pseudo-statique. Sur la gamme de période au-delà de 1, l'effet dynamique qui prédomine.

Les forces sont généralement plus importantes dans le cas où le site où se trouve (B) est considéré non rocheux et plus particulièrement dans le cas de structures de période naturelle faible.

3.4 L'effet du facteur de qualité Q :

Dans cette partie, il est intéressant d'étudier l'influence du facteur de qualité Q les forces de la structure pour quatre valeurs du facteur de qualité : $Q=10, 30, 50$ et 100 .

Les forces sont affectées légèrement par la variation de Q sur la gamme intermédiaire de $T_0 \in [0.3 - 1.1](s)$ (fig 3.9), mais la variation induite est négligeable comparée à celle des déplacements.

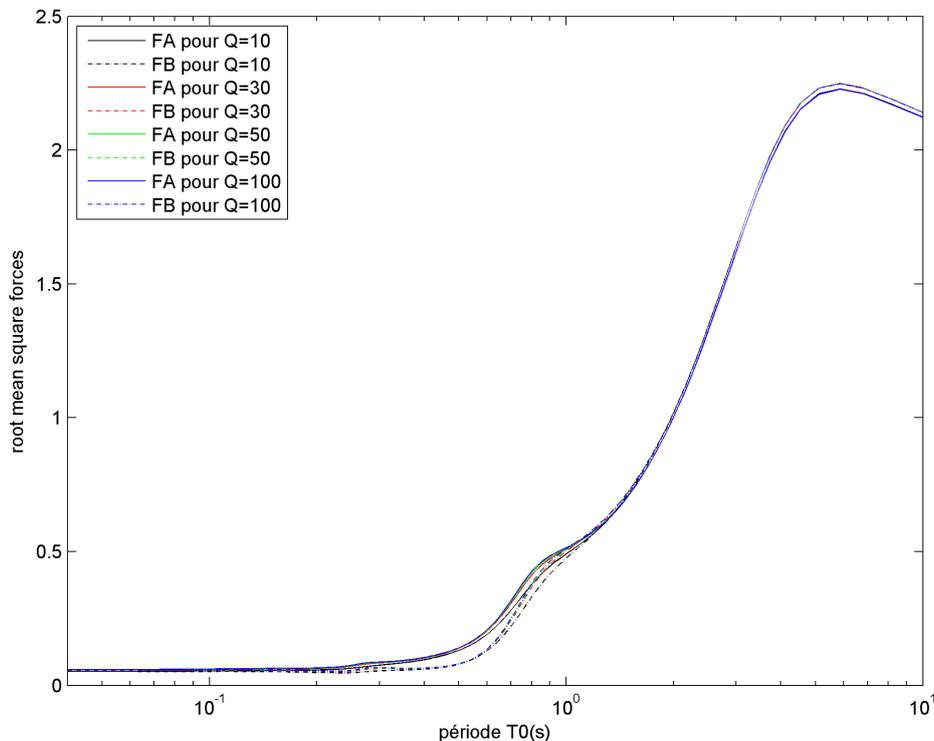


FIGURE 3.9 – L'effet du facteur de qualité Q sur RMS forces

3.5 L'effet de la vitesse des ondes de cisaillement V_s :

Les effets de la vitesse des ondes de cisaillement sur les spectres de réponse RMS forces est présentés dans les figures(3.11).On considère les quatre valeurs de le vitesse d'onde de cisaillement facteur de qualité : $V_s=100, 200,400$ et 750 .

La figure(3.11) montre également que les différences entre les RMS de forces FA et FB sont évidentes pour de petites valeurs de V_s et de grandes valeurs de T_0 .

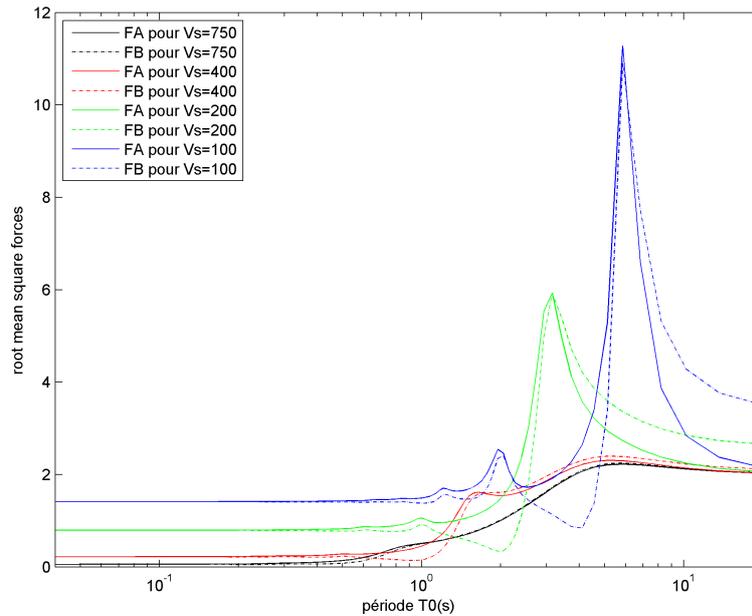


FIGURE 3.10 – L'effet de la vitesse des ondes de cisaillement V_s sur le RMS forces

3.6 l'effet du rapport d'impédance :

Pour les deux valeurs de vitesse de cisaillement ($V_s = 750m/s$ et $V_s = 200m/s$) correspondant respectivement aux sols fermes et très mous, l'intervalle de ρ représente les variations des propriétés de sol en général.

Dans les figure (3.12),On peut observer que ces variations des propriétés de sol entraînent une amplification plus grande pour $V_s = 200m/s$ en comparaison avec $V_s = 750m/s$. On peut remarquer aussi que cette amplification est maximale pour la crête de résonance à $T_0 = 3s$.

Pour le RMS des force et $VS = 200$ m/s on peut observer un décalage des premiers pics de résonance des forces FA et FB . On va étudier l'effet du rapport d'impédance sur le RMS des forces pour des valeurs de $I_{R/S} = 2$ et 3 ($V_s = 750m/s$) et $I_{R/S}= 9$ et 15 ($V_s = 200m/s$)

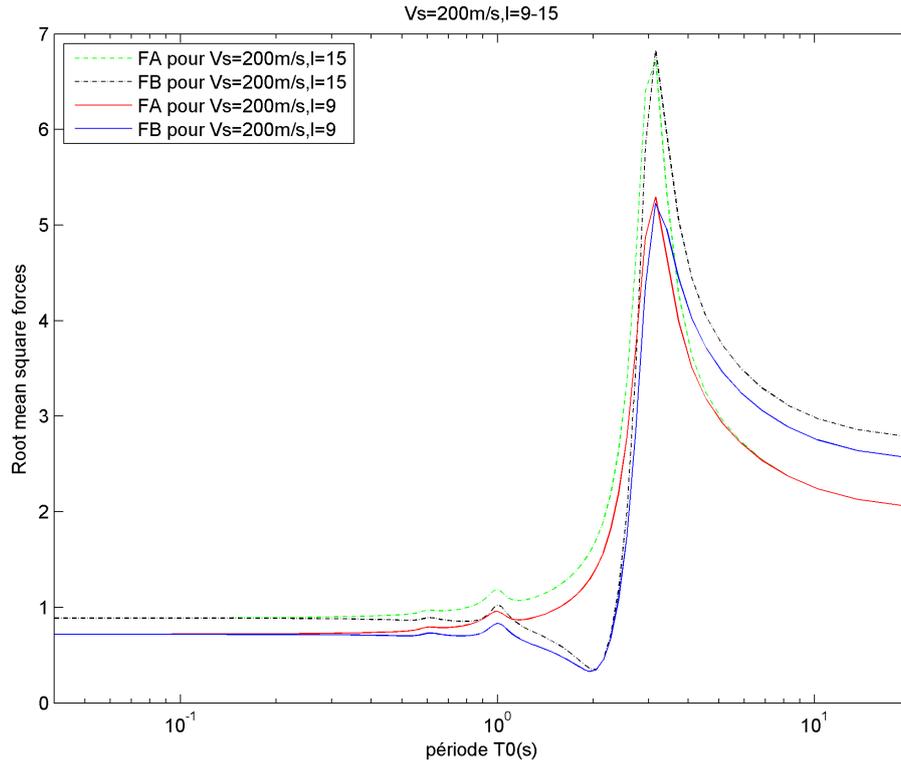


FIGURE 3.11 – RMS forces pour $I_{r/s} = 200$ et $V_s = 15$ et 9

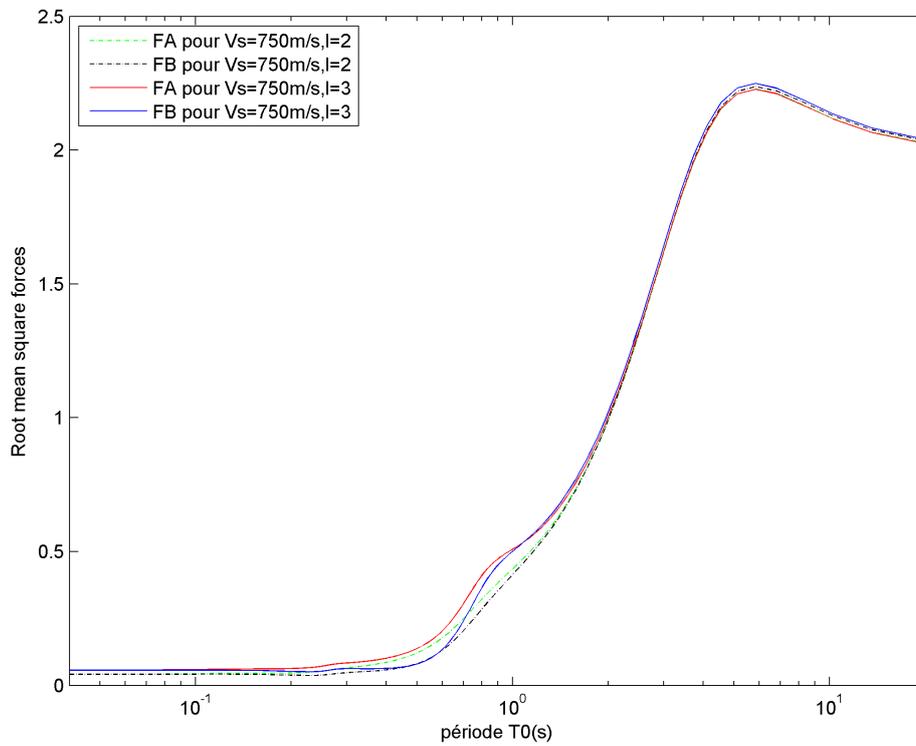


FIGURE 3.12 – RMS forces pour $I_{r/s} = 750$ et $V_s = 2$ et 3

3.7 Conclusion

On conclue que les paramètres du sol jouent un rôle très important dans la réponse des structures implantées dans des conditions de site spatialement variables, Alors il est important de les prendre en considération afin de vérifier la fiabilité des structures.

Conclusion Générale :

L'étude paramétrique traitant les effets de site sur la réponse des structures a été menée sur l'effet de quatre paramètres : la profondeur de la couche de sol h , le facteur de qualité Q , la vitesse d'onde de cisaillement V_s et l'effet du rapport d'impédance entre la couche de sol et le sol rocheux ($I_{s/r}$). On a conclu :

- Le RMS des forces n'est pas proportionnel à l'épaisseur 'h' mais reflète directement la résonance structure-sol sur la gamme de fréquences des structures où l'effet dynamique est prédominant. Alors que sur la gamme de fréquences de structures où la prédominance revient à la composante pseudo statique, le RMS est proportionnel à l'épaisseur de la couche de sol. Les forces sont généralement plus importantes dans le cas où le site B est considéré non rocheux et plus particulièrement dans le cas de structures de période naturelle faible.
- Les RMS s'amplifient avec la diminution de vitesse de cisaillement V_s . L'effet de V_s est plus important dans la gamme des basses fréquences.
- En ce qui concerne les forces, elles sont affectées légèrement par la variation de Q sur la gamme intermédiaire de T_o . La variation induite est négligeable comparée à celle des déplacements

Bibliographie

- [1] Lermo, J. and Chfivez-Garcia, F. J., 1994 : "Site effect evaluation at Mexico City : dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 13, pp. 413-423.
- [2] Abbiss, C.P., 1989 : "Seismic Amplification. Mexico City". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 17.
- [3] Pecker, A., 1984 : "Dynamique des sols". *Presse de l'Ecole Nationale des ponts et Chaussées*.
- [4] Aki, K. and Richards, P.G., 1980 : "Quantitative Seismology", Vol.II, W.H. freeman and Co, San Francisco.USA.
- [5] Safak, E., 1995 : "Discrete-time analysis of seismic site amplification". *J. Eng.Mech.*, ASCE, Vol.121 (7), pp. 801–9.
- [6] Zembaty, Z. and Rutenberg, A., 2002 : "Spatial response spectra and site amplification effects". *Engineering structures*, Vol. 24, pp. 1485-1496.
- [7] Der Kiureghian A.1996 : "A coherency model for spatially varying ground motions". *Earthquake Eng. Struct. Dyn*, Vol.25, pp.99–111.
- [8] Safak, E., 1989 : " Optimal-adaptive filters for modeling spectral shape, site amplification, and source scaling". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 75-95.
- [9] Trifunac, MD. And Todorovska, MI., 2000 : "Can aftershock studies predict site amplification factors. Northridge CA earthquake of 17 January 1994". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 19, pp. 233–51.
- [10] Zerva, A. and Harada, T., 1997 : "Effect of surface layer stochasticity on seismic ground motion coherence and strain estimates". *Soil Dynamics and Earthquake engineering*, Vol. 16, pp. 445-457.
- [11] Clough RW, Penzien J., 1975 : "Dynamics of Structures". McGraw-Hill BookCo., New York, NY., USA.
- [12] Kausse, E. and Roesset .J.M 1984 : "Soil amplification :some refinements." *Soil Dyn.and earthquake Engrng*.3(3),116-123.
- [13] Tolstoy,I, and Usdin.E.1953. "Dispersive properties of stratified elastic and liquid media :A ray theory." *Geophysics* .18,844-870.
- [14] Zembaty, Z. and Krenk, S., 1993 : "Spatial seismic excitations and response spectra". *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 119, No. 12, pp. 2449-2460.

- [15] Zembaty, Z. and Rutenberg, A., 1998 : "*On the sensitivity of bridge seismic response with local soil amplification*". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, pp. 1095–9.