

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



Ecole Nationale Polytechnique  
Département Génie Civil  
Laboratoire de Génie Sismique et du Dynamique des Structures



Mémoire  
En vue de l'obtention du master en Génie Civil

## Thème

---

ANALYSE DES EFFETS DES PARAMÈTRES DE SITE SUR LA  
RÉPONSE EN DÉPLACEMENT DES PONTS IMPLANTÉS DANS DES  
CONDITIONS DE SITES SPATIALEMENT VARIABLES

---

**Mémoire présenté par :**  
Ayoub Rehab

**Encadreur :**  
M.Hammoutene

**Co-Encadreur :**  
S.Lakehal

## Composition du jury :

B.Tiliouine	Professeur	président du jury
M.Ouanani	Maître assistant	examineur
H.Mohabeddine	Maître assistant	examineur

Juin 2016

*Je dédie ce travail à :*

*Mon père,*

*Ma mère,*

*Mes soeurs : Moufida, Iméne, Nour El Houda*

*Mon neveu :Anis*

*Mes nièces : Manel, Sirine, Inés*

*Mes beaux frères :Hamza, Mohamed*

*À mes amis,*

*À mes proches*

*Et à toute personne ayant collaboré à ce travail*

## المخلص

ان التغييرات الجيولوجية والطبوغرافية لها تأثيرات مهمة على تغييرات الحركة الزلزالية وفي هذا العمل نقوم بدراسة تأثير عوامل الوسط على الاجابات الزلزالية للأبنية ذات البعد المعتبر. بحيث تكون الشروط المحلية للتربة مختلفة بالنسبة لهذه الابنية. بهدف دراسة تأثير التنبهات الغير منتظمة على اجابة الابنية التي تركز على عدة دعائم. نقوم بفرض هزاز بسيط يقوم على دعامتين احدهما تتواجد على الوسط الصخري والاخرى فوق طبقة من التربة. نقوم بتغيير العلامات الخاصة بالتربة وبعدها نقوم بدراسة الكثافة الطيفية وجذر متوسط مربع للكثافة الطيفية. التحليل البعدي للمباني يحتاج الى تقديرات احتمالية للانتقال الديناميكي والقوى وهذا يتحقق بفضل حساب المعامل الزلزالي الفضائي لقيمة القصوى للاستجابة الهيكلية هي واحدة من أهم سمات لتحليل الموثوقية الهيكلية. في هذا السياق، من المثير للاهتمام أن دراسة تأثير الاختلاف العلامات من التربة على الاستجابة القصوى.

### كلمات مفاتيح :

آثار الموقع. انتشار الامواج . الاجابة الزلزالية . طيف الاستجابة. التغييرات الفضائية

## Abstract

Site effects exert a determining influence on the seismic response of soils and structures. It is thus important to account for such effect in system responses computations. This work handles the modelling of site effects by physical descriptions, and integrates these effects in a response spectrum based formulation. the maximum value of the structural response is one of the most important features for the analysis of structural reliability. In this context, it is interesting to study the influence of the variation of parameters of soil on the maximal response of a modeled structure of an oscillator in a 1ddl.

**Keywords :** Site effects, Amplification, wave propagation, seismic response, Response spectrum.

## Résumé

Les Effets de Site exercent une influence déterminante sur la réponse sismique des sols et des structures, et il est donc important de tenir compte dans les calculs de réponses sismiques des systèmes. la valeur maximale de la réponse des structures est l'une des caractéristiques les plus importantes pour l'analyse de la fiabilité des structures. Dans ce contexte, il est intéressant d'étudier l'influence de la variation des paramètres de sol sur la réponse maximale d'une structure modélisée par rapport aux déplacements.

**Mots clés :** Effets de site, Amplification, Propagations d'ondes, Réponse sismique, Spectre de réponse.

# Remerciements

Nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir accordées le courage, la patience et la volonté pour réaliser ce travail.

Nous tenons également à remercier le professeur B.TILIOUINE de l'École Nationale Polytechnique (Alger) d'avoir accepté d'être le président du jury de ce mémoire.

Nous tenons à remercier le professeur M.HAMMOUTENE de l'École Nationale Polytechnique (Alger) pour avoir accepté de m'encadrer et pour m'avoir fourni de judicieux conseils, de part de ses expériences et ses connaissances.

Je remercie H.MOHABEDDINE et M.OUANANI de l'École Nationale Polytechnique (Alger) qui m'ont fait honneur de participer au jury et d'être les examinateurs de ce modeste travail.

A toute l'équipe du laboratoire L.G.S.D.S

# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>iii</b>
<b>Remerciements</b>	<b>v</b>
<b>Table des matières</b>	<b>vi</b>
<b>Table des figures</b>	<b>viii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>9</b>
<b>1 La propagation d'ondes sismique</b>	<b>10</b>
1.1 Introduction . . . . .	10
1.2 Ondes de volume . . . . .	10
1.2.1 Onde P ou onde primaire (onde de compression) . . . . .	10
1.2.2 Onde S (onde secondaire) . . . . .	11
1.3 Les équations d'ondes . . . . .	13
1.4 solution de l'ondes planes . . . . .	14
1.4.1 Ondes P . . . . .	14
1.4.2 Ondes S . . . . .	14
1.5 Conclusion . . . . .	15
<b>2 Le spectre de réponse et l'effet d'amplification de site</b>	<b>16</b>
2.1 Introduction . . . . .	16
2.2 Variabilité spatiale . . . . .	16
2.3 Modèle de KANAI TAJIMI . . . . .	18
2.3.1 Modèle de DER KIUREGHIAN . . . . .	18
2.4 Variation de la fonction de transfert en fonction de $\tau$ , $Q$ et $r$ . . . . .	21
2.5 Coefficient sismique spatial basé sur le spectre de réponse . . . . .	21
2.6 La densité spectrale du déplacement dynamique : . . . . .	23
2.7 Coefficient sismique spatial base sur le spectre de réponse : . . . . .	25
2.8 Conclusion . . . . .	27

---

<b>3 Étude paramétrique</b>	<b>28</b>
3.1 Introduction . . . . .	28
3.2 Paramètres utilisées dans l'étude paramétrique : . . . . .	28
3.2.1 Influence de l'épaisseur ' $h$ ' de la couche de sol : . . . . .	29
3.2.2 Influence de la fréquence naturelle de la structure ' $\omega_0$ ' : . . . . .	31
3.2.3 l'influence de la hauteur de la couche de sol sur l'écart type RMS et sur le coefficient sismique (RMS normalisé) du déplacement	31
3.2.4 l'effet du facteur de qualité du sol sur l'écart type RMS et sur le RMS normalisé : . . . . .	32
3.2.5 l'effet de la vitesse d'onde de cisaillement ' $V_S$ ' sur le RMS nor- malisé de déplacement : . . . . .	34
3.2.6 l'effet du rapport d'impédance sur les RMS de déplacement normalisé : . . . . .	35
3.3 Conclusion . . . . .	36
<b>Conclusion générale</b>	<b>37</b>
<b>Références Bibliographiques</b>	<b>38</b>

# 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	propagation d'onde . . . . .	12
1.4	Onde de Rayleigh . . . . .	12
1.5	Onde de love . . . . .	13
2.1	Transformation du mouvement du substratum à la surface pour une couche de sol (côté droit) et un affleurement rocheux (côté gauche). .	17
2.2	Variation de la fonction de transfert avec $\tau$ , $Q$ et $r$ . . . . .	21
2.3	Système dynamique 1ddl . . . . .	22
2.4	Densité spectrale de déplacement . . . . .	24
2.5	RMS de déplacement . . . . .	26
2.6	RMS normalisé en déplacement . . . . .	27
3.1	Densité spectrale du Déplacement relatif . . . . .	30
3.2	la densité spectrale en fonction de la profondeur . . . . .	31
3.3	Représentation du RMS du Déplacement par l'influence de la hauteur	32
3.4	Représentation du RMS Déplacement Normalisé par l'influence de la hauteur . . . . .	33
3.5	l'effet du facteur de qualité 'Q' Sur le RMS normalisé déplacement .	33
3.6	RMS normalisé déplacement pour différentes valeurs de $V_S$ . . . . .	34
3.7	RMS normalisé déplacement pour différentes valeurs de $I_{r/s}$ et $V_S$ . .	35

# Introduction générale

Lors d'un événement sismique, les ondes qui se propagent depuis le foyer jusqu'à la surface libre subissent de multiples transformations à travers les divers milieux traversés. Ces milieux agissent comme des filtres successifs sur la composition du signal sismique. Il est connu depuis longtemps que la géologie locale pouvait avoir effet important sur la variation des mouvements générés par un tremblement de terre ou une autre source. Dans notre projet on étudie l'influence de l'effet de site sur la réponse sismique d'une structure étendue, sachant que les conditions locales de site peuvent être différentes d'un point à un autre. Cette constatation avait déjà été faite par Lawson (1908) au moment du tremblement de terre de San Francisco de 1906. Tout au long de ce siècle, les données macro-sismiques et récemment instrumentales, obtenues lors des séismes forts, ont montré l'influence des structures géologiques locales sur l'amplification des vibrations sismiques (Jennings, 1971, Poceski, 1969, Sozen, 1968, Celebi, 1987).

L'exemple le plus frappant qui met en exergue l'importance de la prise en compte de l'effet de site est sans conteste le tremblement de terre de Michoacán de 1985 qui a fortement touché la ville de Mexico située à 400Km de l'épicentre.

Dans le génie parasismique, la valeur maximale de la réponse des structures est l'une des caractéristiques les plus importantes pour l'analyse de la fiabilité des structures. Dans ce contexte, il est intéressant d'étudier l'influence de la variation des paramètres de sol ' $h$ ', le facteur de qualité ' $Q$ ', la vitesse des ondes de cisaillement ' $V_s$ ', et le rapport d'impédance ' $I'_{R/S}$ ' sur la densité spectrale et le RMS normalisé de déplacement.

- Le premier chapitre porte sur les généralités sur les séismes.
- Le deuxième chapitre porte sur le spectre de réponse et l'effet d'amplification de site.
- Le troisième chapitre porte une étude paramétrique.

# La propagation d'ondes sismique

## 1.1 Introduction

Les tremblements de terre sont des catastrophes naturelles qui causent des dégâts désastreux. Ces derniers sont produits par la libération brutale de l'énergie élastique emmagasinée, une partie de cette énergie se transforme en chaleur et un complément se propage dans toutes les directions sous forme d'ondes élastique de divers types [7],[1].

Compte tenu de l'hétérogénéité du milieu de propagation, elles engendrent à la surface du sol un mouvement complexe. Et mathématiquement, une onde est une solution des équations de l'élasto-dynamique en fonction du temps et de l'espace. Et on distingue deux types d'ondes (ondes de volume et ondes de surface) [7].

## 1.2 Ondes de volume

Elles se propagent à l'intérieur de la terre sous deux formes :

### 1.2.1 Onde P ou onde primaire (onde de compression)

Les ondes P sont des ondes longitudinales, sont plus rapides. Elles se propagent avec une vitesse de 7 à 8 km/s , s'accompagnent d'un changement de volume et traversent tous les milieux. Le déplacement des particules du sol est parallèle à la direction de

propagation des ondes. Il se fait par dilatation et compressions successives comme les mouvements des spires d'un ressort [7],[4].

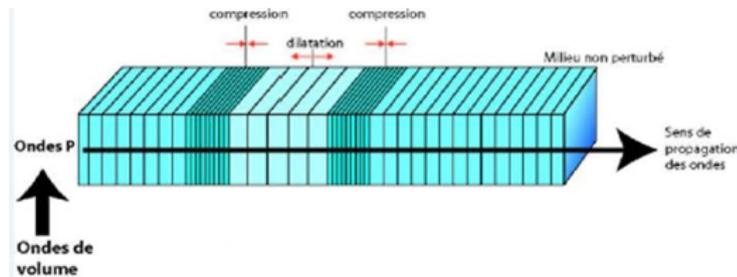


FIGURE 1.1 – l'effet des ondes P sur les milieux traversés

### 1.2.2 Onde S (onde secondaire)

Ces ondes se déplacent avec une vitesse de 4 à 5 km/s, se progressent en cisillant le sol sans changement de volume, perpendiculairement à leur sens de cheminement . Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides car il est impossible de déformer un liquide par cisaillement [7].

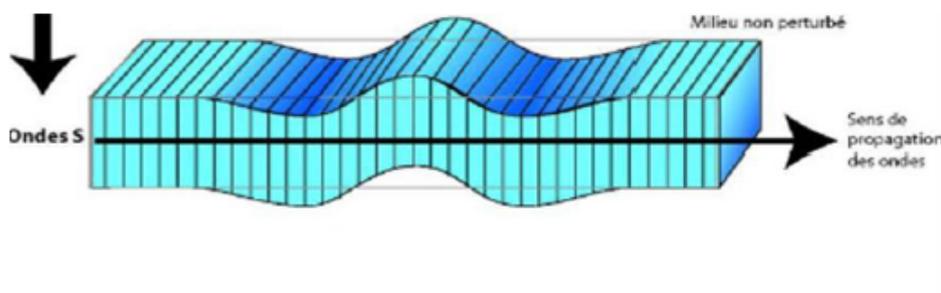


FIGURE 1.2 – l'effet des ondes S sur les milieux traversés

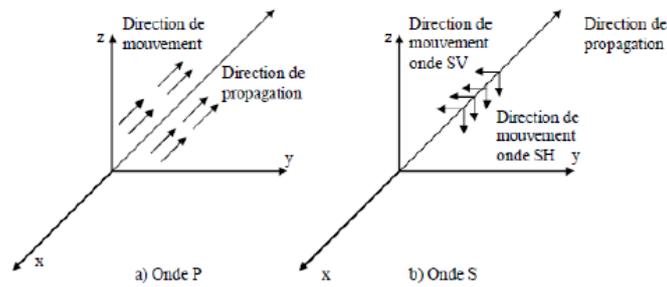


FIGURE 1.3 – propagation d'onde

### Onde de Rayleigh

L'onde de Rayleigh est une sorte de houle, dans laquelle les particules ont deux composantes de mouvement, l'une verticale et l'autre horizontale, dont la combinaison produit une trajectoire elliptique. 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. Dans les calculs, les ondes sismiques de volume ou de surface sont représentées par des expressions sinusoïdales (ce qui permet par superposition, de produire une onde de forme quelconque).[7]

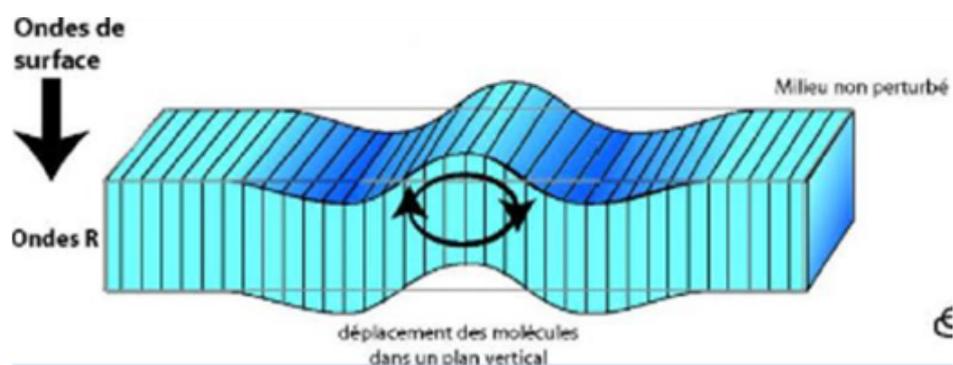


FIGURE 1.4 – Onde de Rayleigh

### Onde de love

Il s'agit d'une onde transversale (mouvement des particules perpendiculaires à la direction de propagation), comme l'onde de volume S mais à la différence de celle-ci, son amplitude n'est perceptible que près de la surface et s'atténue vite en profondeur. Elle ne peut exister que dans des milieux non homogènes et à un caractère dispersif, c'est-à-dire que sa vitesse de propagation dépend de sa fréquence.[7]

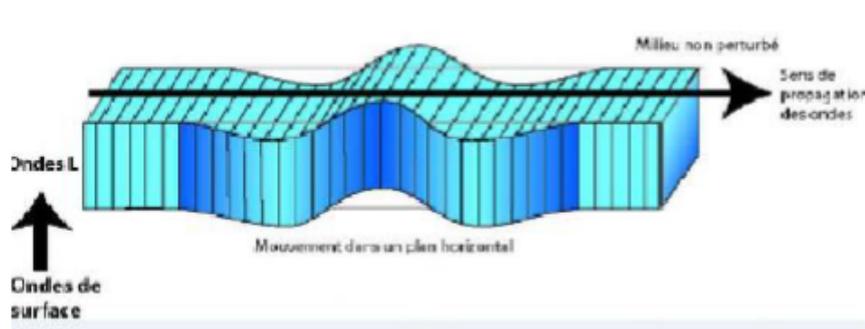


FIGURE 1.5 – Onde de love

## 1.3 Les équations d'ondes

Dans un milieu isotrope et homogène on obtient la relation suivant

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) - \mu \vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{u} \quad (1.1)$$

Prenons à présent la divergence des deux membres de l'équation (la divergence d'un rotationnel et le rotationnel d'un gradient étant nul) nous obtenons respectivement.

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) \quad (1.2)$$

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\vec{\nabla} \times \vec{u}) = -\mu \nabla^2 (\vec{\nabla} \times \vec{u}) \quad (1.3)$$

L'équation (1) décrit une variation de volume (Les ondes de compression-dilatation, décrites par le terme  $\vec{\nabla} \cdot \vec{u}$  et de petites rotations (les ondes de cisaillement, d'écrites par le terme  $\vec{\nabla} \times \vec{u}$ .

Les ondes de compression-dilatation sont les premières arrivées, les ondes de cisaillement arrivent en second, car la terre oppose beaucoup plus de résistance aux rotations qu'aux dilatations.

## 1.4 solution de l'ondes planes

### 1.4.1 Ondes P

Dans le cas du potentiel scalaire

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - \alpha^2 \nabla^2 \phi = 0 \quad (1.4)$$

Avec la constante

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (1.5)$$

### 1.4.2 Ondes S

Les ondes S sont décrites à l'aide d'un potentiel vectoriel

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \beta^2 \nabla^2 \psi = 0 \quad (1.6)$$

Avec la constante

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1.7)$$

Le déplacement associé aux ondes de volume décrites par l'équation 1 se décompose en une onde P longitudinale comportant à la fois dilatation (changement de volume) et cisaillement (changement de forme) et une onde S transversale purement cisailant (changement de forme sans changement de volume), elle-même décomposable en onde SV et onde SH. Ces ondes sont illustrées figure 1.1 L'onde P se propage plus rapidement que l'onde S ( $\alpha \approx \sqrt{3}\beta$ ), et les ondes S ne se propagent pas dans les liquides.

L'onde P, l'onde longitudinale, correspond à un déplacement dans la direction de propaga-

---

tion. L'onde S, transversale, correspond à un déplacement perpendiculaire à la direction de propagation, décomposable en composantes SH et SV.

## 1.5 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.

# Le spectre de réponse et l'effet d'amplification de site

## 2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre, 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 HASKEL basé sur la formulation de temps discrets de la propagation verticale des ondes de cisaillement, associé à un coefficient sismique spatial utilisant le spectre de réponse (Zemby), ainsi que la fonction de cohérence spatiale de Der Kiureghian , sont intégrés en appliquant une formulation en vibrations aléatoires

## 2.2 Variabilité spatiale

Les enregistrements sismiques effectués sur les structures de grande taille, indiquent que les ondes sismiques à la surface du sol varient de manière appréciable sur des distances de l'ordre des dimensions de certaines structures étendues (ponts, barrages). On qualifie ce phénomène de variabilité spatiale des ondes sismiques et on lui attribue généralement trois origines :

- Le phénomène de passage d'onde traduisant le déphasage des ondes sismiques aux différents points d'appui de la structure.
- La perte de cohérence ou encore le changement de forme du mouvement de sol entre les appuis de l'ouvrage du fait des multiples réflexions des ondes dans un sol hétérogène et de l'étendue de la source sismique.
- Les effets de site sous chaque appui qui amplifient différemment les sollicitations sismiques et les déphasent.

Les multiples aspects liés à la variabilité du signal sismique ne sont pas, à ce jour, entièrement connus. 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 dernier. Il s'agit de la fonction de cohérence  $\gamma_{ab}$  définie par le rapport entre la fonction d'inter-densité spectrale du mouvement sismique  $S_{ab}$ , 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  $S_a$  et  $S_b$ .

$$\gamma_{ab} = \frac{S_{ab}}{\sqrt{S_a S_b}} \quad (2.1)$$

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.

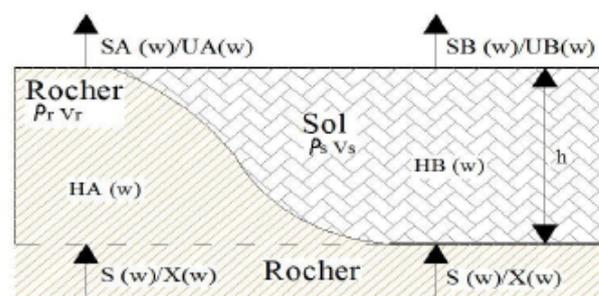


FIGURE 2.1 – Transformation du mouvement du substratum à la surface pour une couche de sol (côté droit) et un affleurement rocheux (côté gauche).

## 2.3 Modèle de KANAI TAJIMI

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. Et pour modéliser les effets locaux des sites on peut commencer par la densité spectrale de KANAI TAJIMI( $\omega$ ).

$$S(\omega) = \frac{\omega_g^4 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2} S_0 \quad (2.2)$$

$\omega_g, \xi_g$  :sont les propriétés du sol local. et  $S_0$  est un facteur d'intensité. 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  $\omega_g = 4\pi\text{rad/s}$  et de  $\xi_g = 0.6$  ont été traditionnellement assignées aux conditions de sol ferme. En changeant  $\omega_g$  et  $\xi_g$  on peut obtenir des valeurs représentant des effets désirés de filtrage du sol. Les gammes typiques pour ces paramètres sont :

— Pour  $\omega : 2\pi$  à  $6\pi\text{rad/s}$ .

— Pour  $\omega : 0.2$  à  $0.6$

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, menant à la fonction de densité spectrale suivante :

$$S(\omega) = \frac{(\omega_g^4 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2) \omega^4}{((\omega_g^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2)((\omega_b^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_b \omega_b \omega)^2)} S_0 \quad (2.3)$$

Dans laquelle  $\omega_b = 1.636$  et  $\xi_b = 0.619$  sont des constantes proposés par CLOUGH et PENZIEN

### 2.3.1 Modèle de DER KIUREGHIAN

Il s'agit d'un modèle composé d'un 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.

$$\gamma_{ab}(\omega) = \gamma_{ab}(\omega)^i \gamma_{ab}(\omega)^w \gamma_{ab}(\omega)^s \quad (2.4)$$

$$\gamma_{ab}(\omega) = \gamma_{ab} \exp i\theta_{ab}(\omega)^w + \theta_{ab}(\omega)^s \quad (2.5)$$

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 à différentes stations.
- $\gamma_{ab}^s$  Est représenté 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 site sont modélisés 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  $S_{AB}^r(\omega)$ .

$$S_{ab}(\omega)^r = H_A(\omega) \cdot H_B^*(\omega) S_{AB}^b(\omega) \quad (2.6)$$

$H_B^*(\omega)$  est la conjugué de  $H_B(\omega)$ .

- Lorsque les deux sites A et B coïncident, leurs spectres respectifs croisés se réduisent à l'auto-densité spectrale. On obtient alors :

$$S_{AA}^r(\omega) = |H_A^2 \cdot S_{AA}^b(\omega)| \quad S_{BB}^r(\omega) = |H_B^2 \cdot S_{BB}^b(\omega)| \quad (2.7)$$

Quand seuls les effets de site sont considérés, la fonction de cohérence  $\gamma_{ab}$  se réduit à :  $\gamma_{AB} = \gamma_{AB}^s(\gamma) = \exp(i\theta_{AB}^s(\omega))$  Avec la différence de phase  $\theta_{AB}^s$  donnée par :

$$\theta_{AB}^s = \tan^{-1} \frac{\text{Im} \left[ \frac{H_A(\omega) H_B^*(\omega)}{H_A(\omega) H_B(\omega)} \right]}{\text{Re} \left[ \frac{H_A(\omega) H_B^*(\omega)}{H_A(\omega) H_B(\omega)} \right]} \quad (2.8)$$

- Propagation d'ondes sans atténuation :

On considère une couche de sol surmontant un substratum du côté droit et un affleurement rocheux du côté gauche Fig 2.1  $\tau_s = \frac{h}{v_s}$  est le temps de propagation dans le sol.  $r$  est le coefficient de réflexion des ondes, et  $(1+r)$  est le coefficient

de transmission donnée par AKI et RICHARDS .

$$r = \frac{\rho_R V_R - \rho_S V_S}{\rho_R V_R + \rho_S V_S} \quad (2.9)$$

Les fonctions de transfert prennent la forme suivant :

$$H_A(\omega) = \exp\left(\frac{-i\omega h}{V_R}\right) \quad (2.10)$$

$$H_B(\omega) = \frac{\exp\left(\frac{-i\omega h}{V_S}\right)}{|\cos(S_1 H) - i \frac{\mu_1 S_1}{\mu_2 S_2} \sin(S_1 H)|} \quad (2.11)$$

— Propagation d'ondes avec atténuation : Une méthode approximative a été a proposé pour intégrer l'atténuation des ondes dans la fonction de transfert du sol au moyen du facteur de qualité  $Q$ .

En utilisant la vitesse complexe dans le sol  $V_s^* = V_s(1 - i\xi)$ , avec  $\xi = \frac{1}{2Q}$

— coefficient de réflexion complexe est défini :

$$r^* = \frac{\rho_R V_R - \rho_S V_s^*}{\rho_R V_R + \rho_S V_s^*} \quad (2.12)$$

— temps de propagation complexe dans le sol est défini :

$$\tau^* = \frac{h}{V_s^*} = \frac{h}{V_s(1 - i\xi)} \quad (2.13)$$

Les fonctions de transfert prennent la forme suivante :

$$H_A(\omega) = \exp\left(\frac{-i\omega h}{V_R}\right) \quad (2.14)$$

$$H_B(\omega) = \frac{\exp\left(\frac{-i\omega h}{V_s^*}\right)}{|\cos(S_1^* H) - i \frac{\mu_1 S_1^*}{\mu_2 S_2} \sin(S_1^* H)|} \quad (2.15)$$

## 2.4 Variation de la fonction de transfert en fonction de $\tau$ , $Q$ et $r$

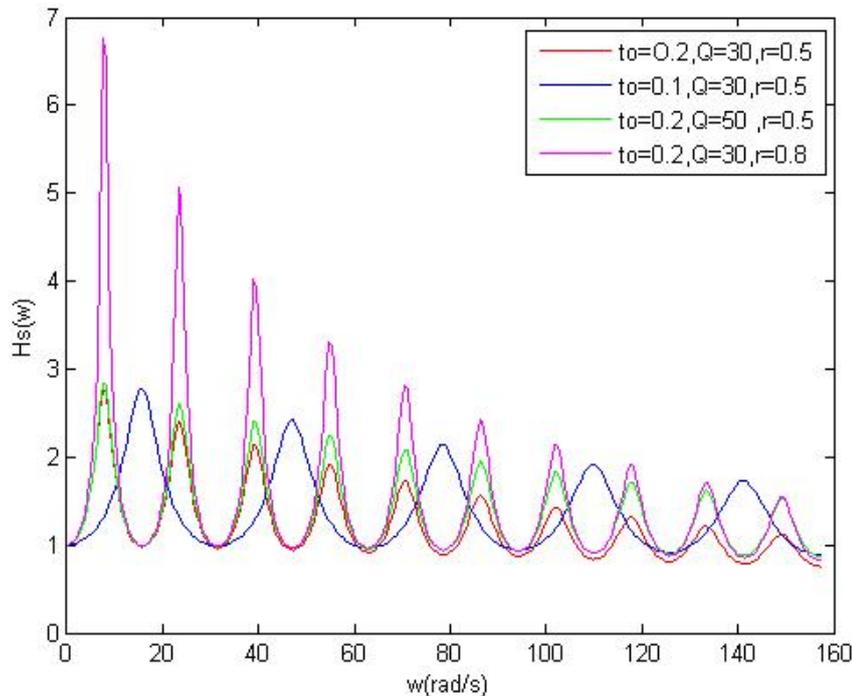


FIGURE 2.2 – Variation de la fonction de transfert avec  $\tau$ ,  $Q$  et  $r$

Le coefficient de réflexion ( $r$ ) et le déphasage temporel  $\tau$  déterminent la position des pics d'une part, de plus les paramètres  $r$  et  $Q$  affectent les amplitudes des pics et leur affaiblissement avec l'augmentation de la fréquence d'autre part.

## 2.5 Coefficient sismique spatial basé sur le spectre de réponse

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 ci-dessous :

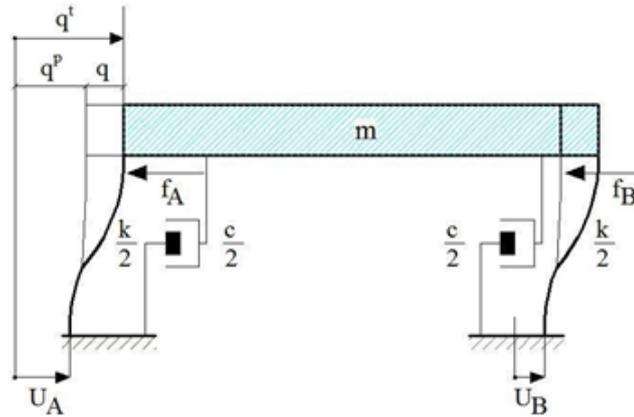


FIGURE 2.3 – Système dynamique 1ddl

L'équation du mouvement pour l'oscillateur simple :

$$\ddot{q} + 2\xi\omega_0\dot{q} + \omega_0^2q = -\frac{1}{2}[\ddot{u}_A(t) + \ddot{u}_B(t)] \quad (2.16)$$

avec :

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

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

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

$$q^t = q^p + q \quad (2.17)$$

$$\text{avec : } q^p = \frac{u_A + u_B}{2} \quad (2.18)$$

— 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.

$$q(t) = -\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) \exp(i\omega t) d\ddot{u}_A(\omega) - \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) \exp(i\omega t) d\ddot{u}_B(\omega) \quad (2.19)$$

Telle que :

$$\ddot{u}_A(\omega) = \ddot{u}_A(\omega) d\omega \quad (2.20)$$

$$\ddot{u}_B(\omega) = \ddot{u}_B(\omega) d\omega \quad (2.21)$$

alors :

$$q(t) = -\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) \exp(i\omega t) \ddot{u}_A(\omega) d\omega - \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) \exp(i\omega t) \ddot{u}_B(\omega) d\omega \quad (2.22)$$

## 2.6 La densité spectrale du déplacement dynamique :

On commence par la DSP du déplacement dynamique. Il s'agit d'un problème à input double et output simple donc : A partir de l'équation ?? on pose :

$$\varphi_A(\omega) = H(\omega) \ddot{u}_A(\omega) \Leftrightarrow S_A = \ddot{u}_A^*(\omega) \ddot{u}_A(\omega)$$

$$\varphi_B(\omega) = H(\omega) \ddot{u}_B(\omega) \Leftrightarrow S_B = \ddot{u}_B^*(\omega) \ddot{u}_B(\omega)$$

$$\Leftrightarrow q(\omega) = -\frac{H(\omega) \ddot{u}_A(\omega)}{2} - \frac{H(\omega) \ddot{u}_B(\omega)}{2} \quad (2.23)$$

$$S_q(\omega) = q^*(\omega) q(\omega) \quad (2.24)$$

$$S_q(\omega) = \frac{|H|^2}{2} (S_A + S_B + S_{AB} + S_{AB}^*) \quad (2.25)$$

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

$$S_q(\omega) = \frac{|H|^2}{2} \left( \frac{|H|_A^2 + |H|_B^2}{2} + \text{Re} \gamma_{AB} H_A H_B \right) S \quad (2.26)$$

$H(\omega) = -(\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\xi\omega_0\omega)^{-1}$  Est la fonction de transfert de l'oscillateur.

Où  $H_A$  et  $H_B$  : sont les fonctions de transfert pour la roche et la couche de sol.

$S$  : est la densité spectrale au niveau du substratum.

### Application numérique : détermination des densités spectrales de déplacement et des forces

pour :  $h = 150m$

On considère le site (B) possédant les caractéristiques suivantes :

$$\rho_S = 2\left(\frac{g}{cm^3}\right), V_S = 750\left(\frac{m}{s}\right), \xi_{sol} = 0.017, Q = 30.$$

On considère le site (A) possédant les caractéristiques suivantes :

$$\rho_R = 3\left(\frac{g}{cm^3}\right), V_R = 1500\left(\frac{m}{s}\right),$$

les paramètres de l'oscillateur :

$$\omega_0 = 2\pi\left(\frac{rad}{s}\right), \xi_0 = 0.05.$$

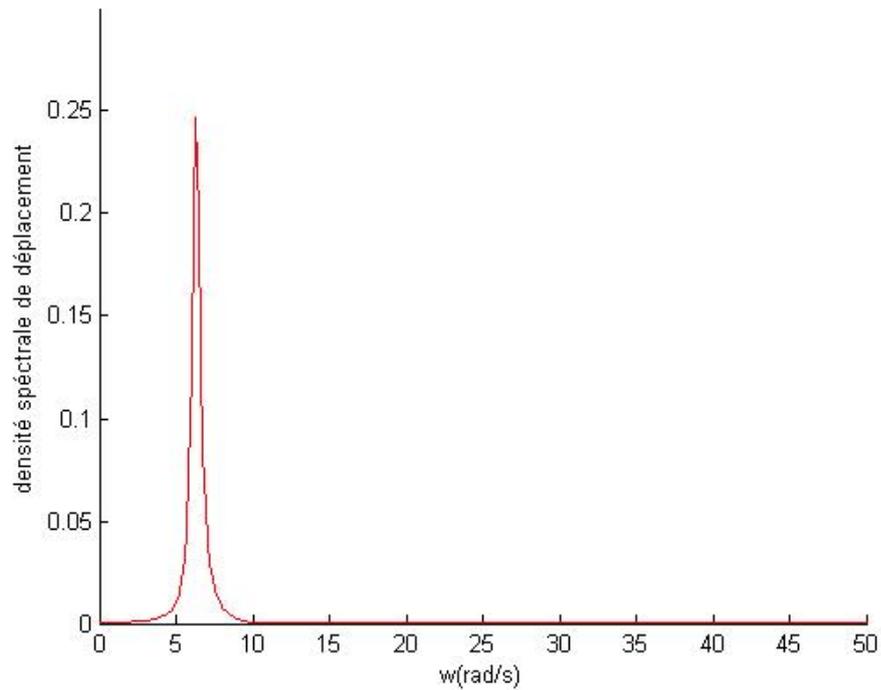


FIGURE 2.4 – Densité spectrale de déplacement

La figure (2.4) : montre l'allure des densités spectrales des déplacements dynamiques, La densité spectrale de déplacement est celle d'une réponse typique d'oscillateur soumise à une excitation large bande telle que la densité se concentre autour de la fréquence de résonance  $\omega_o = 2\pi(\frac{rad}{s})$

## 2.7 Coefficient sismique spatial base sur le spectre de réponse :

Le RMS pour l'input uniforme ou non uniforme trouvé par l'intégration par rapport à la fréquence de densité spectrale des expressions ci-dessus mène à la variance (the mean square response spectrum).

$$\sigma^2(\omega_o) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega, \omega_o) d\omega \quad (2.27)$$

La normalisation de l'écart type (RMS) (root mean square) obtenu à partir de l'équation précédente ; calculé pour la roche (sol ferme) donne la réponse sous la forme du coefficient sismique spatial suivant :

$$\frac{\sigma}{\sigma_R} = \frac{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega, \omega_o) d\omega}}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} S_R(\omega, \omega_o) d\omega}} \quad (2.28)$$

- $S(\omega, \omega_o)$  Représente la densité spectrale des déplacements .
- $S_R(\omega, \omega_o)$  Fait référence à la réponse de la structure. On considère les mêmes valeurs des paramètres du substratum rocheux, du sol et de la structure utilisée dans l'exemple d'application des densités spectrales du déplacement relatif et des forces.

On considère les mêmes valeurs des paramètres du substratum rocheux, du sol et de la structure utilisée dans l'exemple d'application des densités spectrales du déplacement relatif et des forces.

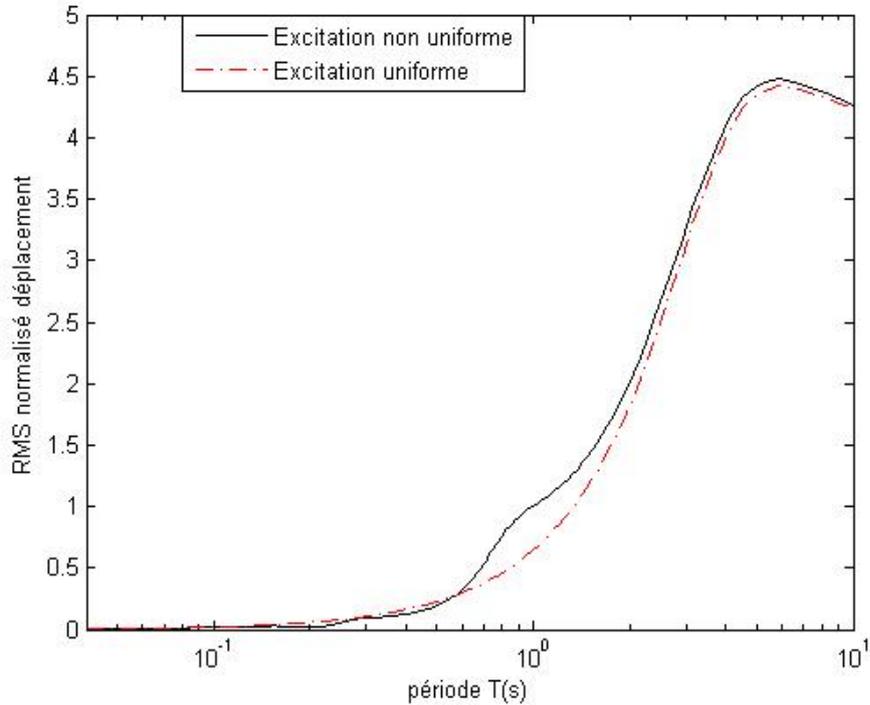


FIGURE 2.5 – RMS de déplacement

Figure(2.5) montre la variation du RMS déplacement relatif en fonction de la période naturelle de la structure pour les deux excitations uniforme et non uniforme.

On remarque que l'allure des deux courbes augmente en fonction de la flexibilité de la structure jusqu'à une valeur max pour  $t_o = 4.53s$  puis diminue.

Figure (2.6) représente Le RMS normalisé : on remarque que l'amplification du RMS est plus importante dans le cas non uniforme. Le RMS normalisé est maximale pour une structure ayant une période naturelle proche de celle du sol (résonance structure-sol).

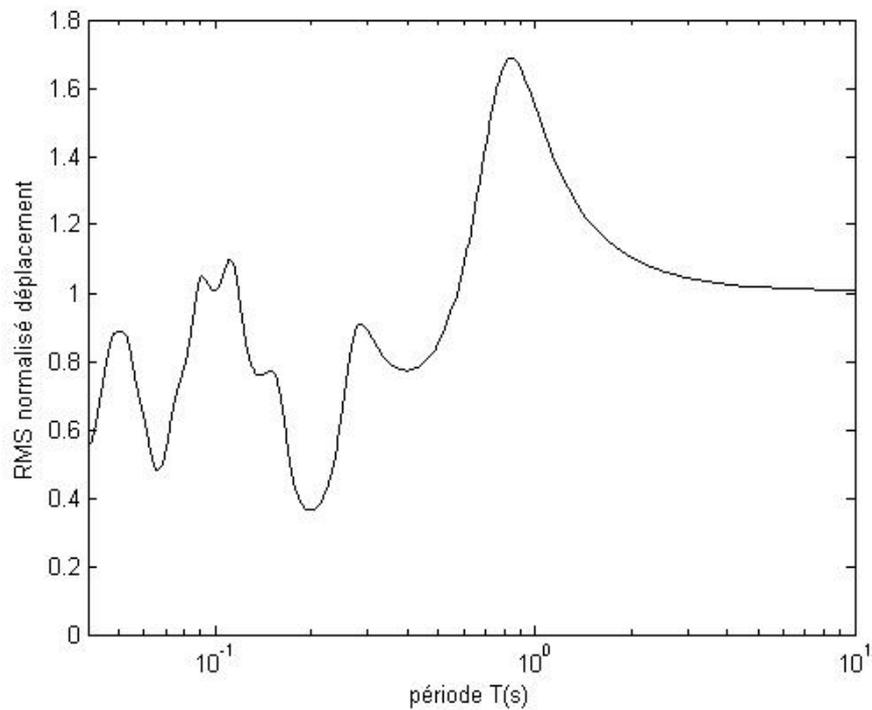


FIGURE 2.6 – RMS normalisé en déplacement

## 2.8 Conclusion

Dans le cadre de ce chapitre, une analyse simplifiée 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.

## Étude paramétrique

### 3.1 Introduction

En génie sismique, pour analyser la fiabilité des structures on s'intéresse aux valeurs maximales de la réponse des structures pour les déplacements et les forces, il est nécessaire d'étudier la variation des paramètres de sol pour étudier la réponse maximale de la structure.

### 3.2 Paramètres utilisées dans l'étude paramétrique :

Soit un substratum rocheux excité par un bruit blanc (séisme) filtré par le modèle modifié par CLOUGH et PENSIEN Les fonctions de transfert caractérisent le filtrage du signal par un milieu Les paramètres considérés sont les vitesses de l'onde de cisaillement du sol, de la roche  $V_R$ , les masses volumiques respectives  $\rho_S$  et  $\rho_R$ , le contraste d'impédance, le facteur de qualité et  $h$ , épaisseur de la couche de sol. Le contraste d'impédance est le rapport d'impédance (roche/sol)  $I_{R/S}$  :

$$I_{R/S} = \frac{\rho_R V_R}{\rho_S V_S} \quad (3.1)$$

On prend les valeurs suivantes :

— Pour le Rocher :

$$\rho_R = 3\left(\frac{g}{cm^3}\right) \text{ et } V_R = 1500\left(\frac{m}{s}\right).$$

— Pour le sol :

$$\rho_S = 1.5 - 2\left(\frac{g}{cm^2}\right), V_S = 100 - 750\left(\frac{m}{s}\right) . \text{ et } h = 50, 150 \text{ et } 500m.$$

Le contraste d'impédance peut atteindre la valeur minimale égale à 3 pour un sol très ferme (dense) et une valeur maximale égale à 30 pour un sol très mou. Ces valeurs ont des coefficients de réflexion variant 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,  $\xi_{sol}$ , avec  $\xi_{sol} = \frac{1}{2Q}$ .

Q appartient à l'intervalle  $Q \in [10 - 100]$  on a  $\xi_{sol} \in [0.005 - 0.05]$ .

pour le cas ou on a un affleurement rocheux entre les deux point (A et B) et ils sont situés sur affleurement rocheux, le rapport d'impédance sera égal à 1 ( $I_{r/S} = 1$ ) et le coefficient de réflexion  $r = 0$ .

Ces points seront soumis à une excitation uniforme.

### 3.2.1 Influence de l'épaisseur 'h' de la couche de sol :

Pour commencer cette étude paramétrique, on va étudier l'effet de la hauteur de la couche de sol sur la densité spectrale du déplacement.

On prendra les valeurs de l'exemple donné dans le chapitre 5, pour  $h = 50m, 150m \text{ et } 500m$ . On considère le site (B) possédant les caractéristiques suivantes :

$$\rho_S = 2\left(\frac{g}{cm^3}\right), V_S = 750\left(\frac{m}{s}\right), \xi_{sol} = 0.017, Q = 30 .$$

On considère le site (A) possédant les caractéristiques suivantes :

$$\rho_R = 3\left(\frac{g}{cm^3}\right), V_R = 1500\left(\frac{m}{s}\right),$$

les paramètres de l'oscillateur :

$$\omega_0 = 2\pi\left(\frac{rad}{s}\right), \xi_0 = 0.05.$$

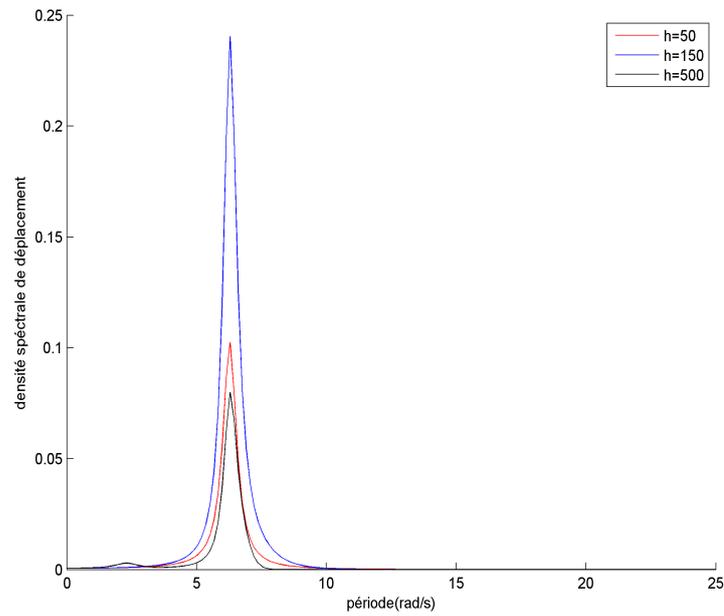


FIGURE 3.1 – Densité spectrale du Déplacement relatif

La figure (3.1) représente les densités spectrales du déplacement relatif pour  $h = 50m$  et  $500m$  qui sont presque identiques, tandis que celle calculée pour une valeur intermédiaire  $h = 150m$  est largement supérieure en point de résonance de la structure. Et plus particulièrement pour la valeur de la fréquence coïncidant avec la fréquence de résonance de la structure  $\omega_o = 2\pi(\frac{rad}{s})$ .

### 3.2.2 Influence de la fréquence naturelle de la structure ' $\omega_o$ ' :

on va étudier l'effet de la hauteur de la fréquence naturelle de la structure sur la densité spectrale du déplacement, quand on varie les hauteurs.

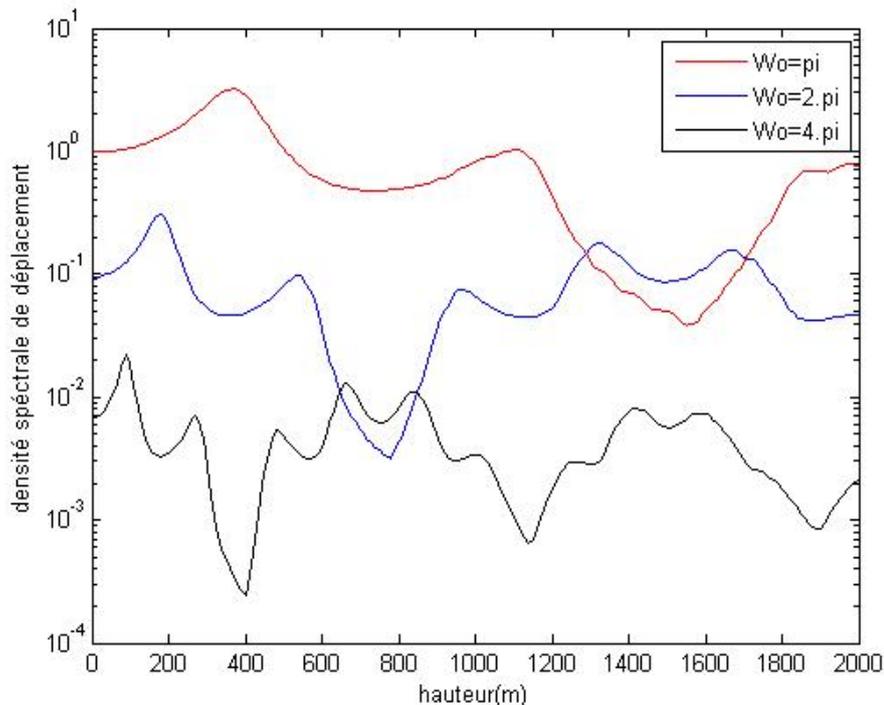


FIGURE 3.2 – la densité spectrale en fonction de la profondeur

la figure (3.2) 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.

pour notre cas on a pris 3 cas correspondant au :  $\omega_o = \pi$ ,  $\omega_o = 2\pi$ ,  $\omega_o = 4\pi$ .

### 3.2.3 l'influence de la hauteur de la couche de sol sur l'écart type RMS et sur le coefficient sismique (RMS normalisé) du déplacement

on va étudier l'influence de la hauteur sur le RMS et le RMS normalisé du déplacement, on prend 3 cas pour le  $h = 50$ ,  $150$  et  $500$ . la figure(3.3) : il apparait clairement que le

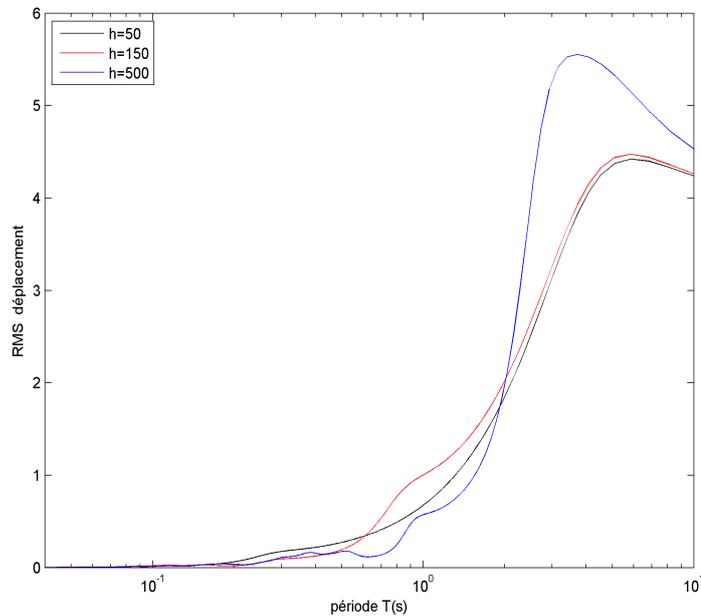


FIGURE 3.3 – Représentation du RMS du Déplacement par l'influence de la hauteur

RMS de déplacement augmente avec l'augmentation de la flexibilité de la structure.

Lorsque  $h$  augmente, on observe une amplification du RMS.

Leurs valeurs maximales RMS se situent autour de la même valeur  $T_0 \approx 3.8s$  ( $\omega = \omega_b$ ), reflète directement la résonance sol-structure. Sur la figure (3.4) on remarque que les amplitudes maximales des RMS normalisés du déplacement ont presque la même valeur, quel que soit l'épaisseur de la couche. Lorsque  $h$  augmente, le nombre de pics augmente. La valeur maximale du RMS normalisé, lorsque  $h$  augmente, se situe à une période plus grande.

### 3.2.4 l'effet du facteur de qualité du sol sur l'écart type RMS et sur le RMS normalisé :

pour le même exemple on va étudier l'effet du facteur de qualité du sol sur l'écart type RMS et sur le RMS normalisé pour les valeurs de  $Q = 10, 30, 50, 100$ . Sur la figure (3.5) on remarque que lorsque les facteurs de qualité augmentent, les amplitudes des RMS normalisés du déplacement s'amplifient, et les valeurs maximales pour chaque

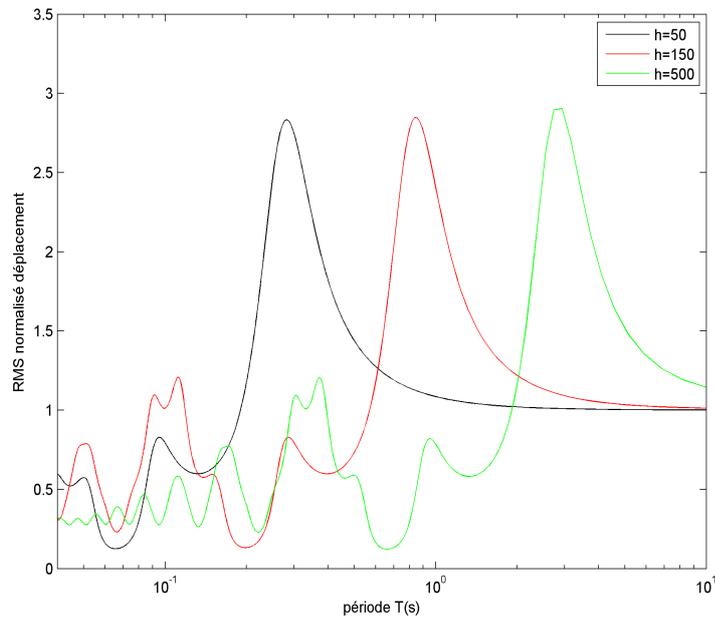


FIGURE 3.4 – Représentation du RMS Déplacement Normalisé par l'influence de la hauteur

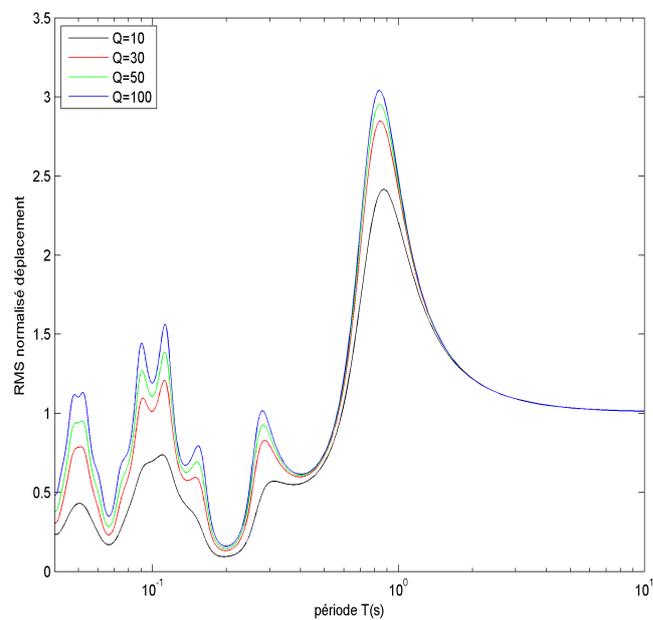


FIGURE 3.5 – l'effet du facteur de qualité 'Q' Sur le RMS normalisé déplacement

facteur de qualité coïncident ont la même valeur de fréquence.

lorsque  $T_0 \approx 0.85 L$  l'influence des facteurs de qualité  $Q$  devient négligeable.

### 3.2.5 l'effet de la vitesse d'onde de cisaillement ' $V_S$ ' sur le RMS normalisé de déplacement :

On va étudier l'effet de la vitesse d'onde de cisaillement ' $V_S$ ' sur le RMS normalisé de déplacement.

On prend les quatre valeurs de la vitesse d'onde de cisaillement :

$V_S = 100, 200, 400$  et  $750 (\frac{m}{s})$ . Les amplitudes RMS normalisé de déplacement

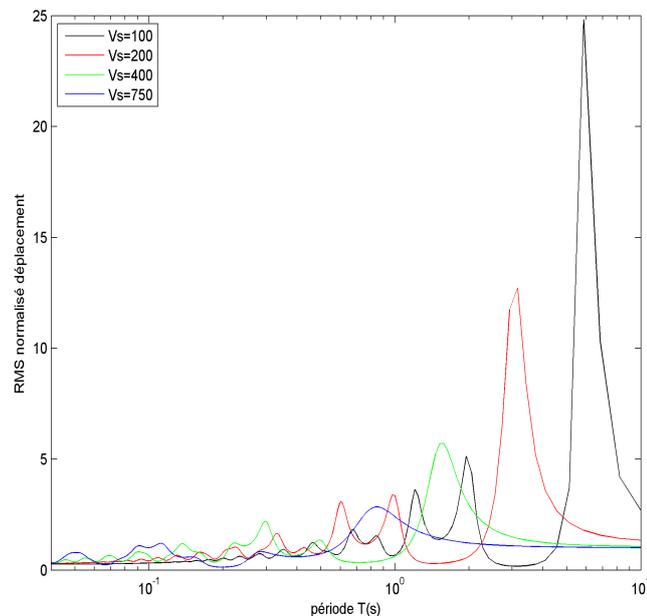


FIGURE 3.6 – RMS normalisé déplacement pour différentes valeurs de  $V_S$

s'amplifie avec la diminution des vitesses de cisaillement  $V_S$ . Contrairement à l'effet de profondeur du sol, lorsque les  $V_S$  diminuent les amplitudes maximales RMS normalisé de déplacement et se concentre dans les domaines des basses fréquences (grandes valeurs de  $T_0$ ),.

### 3.2.6 l'effet du rapport d'impédance sur les RMS de déplacement normalisé :

On va étudier l'effet du rapport d'impédance sur les RMS de déplacement normalisé pour des valeurs de  $I_{R/S} = 2$  et  $3$  ( $V_s = 750 \frac{m}{s}$ ) et  $I_{R/S} = 9$  et  $15$  ( $V_s = 200 \frac{m}{s}$ )

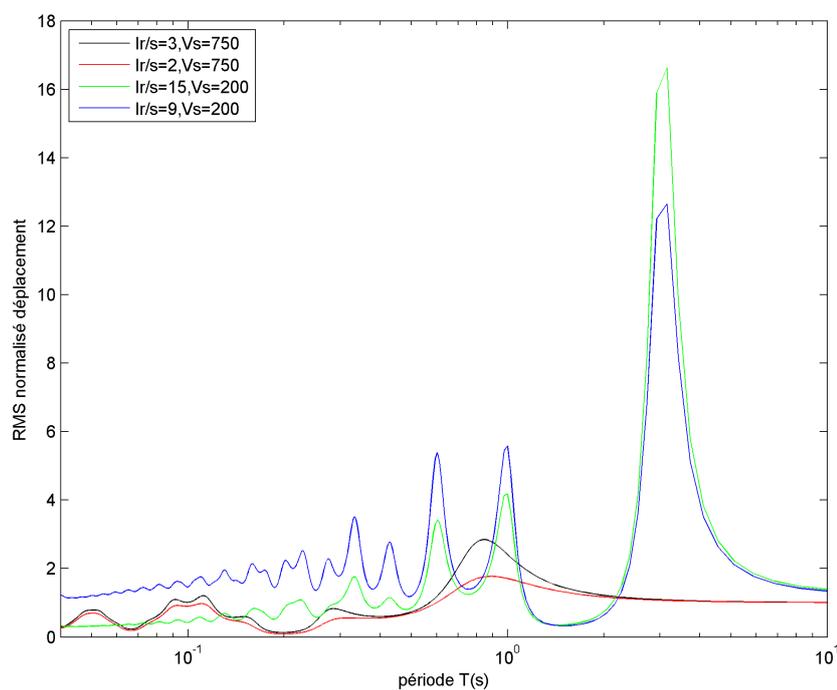


FIGURE 3.7 – RMS normalisé déplacement pour différentes valeurs de  $I_{R/S}$  et  $V_s$

Dans la figure(3.7) on remarque que les amplitudes maximales du RMS normalisé de déplacement pour la vitesse de cisaillement  $V_s = 200(\frac{m}{s})$  sont plus grands par-rapport  $V_s = 750(\frac{m}{s})$

Par ailleurs, on remarque que cette amplification est maximale pour le pic de résonance à  $T_0 = 3s$ . La diminution de masse volumique de sol  $\rho_s$  montre une amplification des amplitudes

### 3.3 Conclusion

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 que :

- Le RMS de déplacement augmente en fonction de la flexibilité de la structure jusqu'à une valeur de  $T_o$  coïncidant approximativement avec la période du déplacement de l'input sismique puis diminue. On a remarqué aussi l'amplification du RMS est maximale pour une structure ayant une période naturelle proche de celle du sol (résonance structure-sol).
- Le RMS normalisé du déplacement n'est pas proportionnel à l'épaisseur ' $h$ ' mais reflète directement la résonance sol-structure. Ce dernier est plus important lorsque la structure rentre en résonance avec le sol. Dans le cas d'un input sismique non uniforme par rapport au cas uniforme pour les structures de période naturelle proche de la moyenne des fréquences de deux modes de résonance successifs du sol.
- 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.
- L'effet de facteur de qualité devient très négligeable avec la croissance de la période naturelle de la structure. 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

## Conclusion générale

les effets d'amplification de site modifient le signal sismique d'une manière liée aux propriétés locales de sol. En conséquence, les deux appuis de la structure sont excités différemment. Les résultats obtenus montrent que les différents états de site peuvent induire des amplifications importantes dans le spectre de réponse. Une structure peut subir des endommagements si sa période naturelle est proche des périodes de résonance du sol. Par conséquent, les conditions locales de site deviennent importantes dans l'analyse de mouvement du sol et dans les conceptions parasismiques des structures.

# Références Bibliographiques

- [1] Aki, K. and Richards, P.G., 1980 : "Quantitative Seismology", Vol.II, W.H. freeman and Co., San Francisco.USA.
- [2] Pecker, A., 1984 : "Dynamique des sols". Presse de l'Ecole Nationale des ponts et chaussées.
- [4] Clough RW, Penzien J., 1975 : "Dynamics of Structures". McGraw-Hill Book Co., New York, NY., USA.
- [4] Der Kiureghian A.1996 : "A coherency model for spatially varying ground motions". Earthquake Eng. Struct. Dyn, Vol.25, pp.99–111.
- [5] Pecker, A., 1984 : "Dynamique des sols". Presse de l'Ecole Nationale des ponts et chaussées.
- 6] Safak, E., 1988 : " Analytical approach to calculation of response spectra frome seismological models of ground motion". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.16, pp. 121–134.
- [7] Safak, E., Mueller, C. and Boatwright, J., 1988 : "A simple model for strong motions and response spectra". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.16, pp. 203–215.
- [8] Safak, E., 1995 : "Discrete-time analysis of seismic site amplification". J. Eng. Mech., ASCE, Vol.121 (7), pp. 801–9.

- 
- [9] Safak, E., 2001 : "Local site effects and dynamic soil behavior". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 21, pp. 453-458.
- [10] Zembaty, Z. and Krenk, S., 1993 : "Spatial seismic excitations and response spectra". *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 119, No. 12, pp. 2449-2460.
- [11] Zembaty, Z., 1997 : "Vibrations of bridge structure under kinematic wave excitations". *J. Struct. Eng., ASCE*, Vol.123 (4), pp. 479–88.
- [12] 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.
- [13] Zerva, A., 1991 : "Effect of spatial variability and propagation of seismic ground motions on the response of multiply supported structures". *Probabilistic Eng. Mech.* Vol. 6, pp. 212–21.