

Ecole Nationale Polytechnique
Département Génie Civil

Laboratoire de Génie sismique & Dynamique de Structure

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention
du diplôme d'ingénieur d'état en génie civil

Thème

*ETUDE DE LA REPONSE SISMIQUE DES
STRUCTURES LONGUES EN PLAN INPLANTEES
SOUS DES CONDITIONS DES SITES*

Réalisé par :

Fatima DJEFAL
Lila AMARNI

B.TILIOUINE
M. HAMMOUTENE
M.OUANANI

Professeur E.N.P
Professeur E.N.P
Docteure

Encadré par :

H. MOHAIBEDDI
D.CHERID

Président
Examineur
Examineur

Promotion 2014

Remerciements

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

Nous tenons à remercier Mme D. CHERID et Mme H.MOHABEDDINE pour avoir suivi et dirigé ce travail

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

Nous voudrions aussi exprimer nos profondes gratitude envers professeur HAMMOUTENE Pour ses conseils éclairés, et sa disponibilité.

Notre gratitude va également aux membres du jury pour honorer notre soutenance et pour l'effort fourni afin juger ce travail.

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

Dédicace

Je dédie ce travail à:

La mémoire de :

Mon père,

Ma mère,

Mes frères (Attaa Allah, Belkaceme, Abde el rahman, Abde el Kader) et sœurs (Rahmania)

À mes amis (Nedjla , Soumaya , Mounia, Hassiba, Fatima)

mes proche et à toute personne

Ayant collaboré à ce travail.

Fatima.DJEFAL

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes parents,

A mes frères Mohamed, Ahmed et Amar

A mes sœurs Nadia, Akila et Sarah

A mes grandes mères

*A tous mes amis et surtout A Ferhat TAMSAOUT, Rania
REDJEM, Cilya MISRAOUI, Younes MALEK, Juba
SALHI, Naima TAOUDIAT, Lounis GHELAF,*

A toute la famille

Lila AMARNI

المخلص

ان تغيرات الوسط (الجيولوجية والطبوغرافية) تلعب دورا هاما في تحديد الاجابة الزلزالية للتربة وللأبنية. لهذا فانه من المهم اخذها بعين الاعتبار في حساب الاجابات الزلزالية .

هذا العمل يقوم على تمثيل هذه التغيرات تمثيلا فيزيائيا من خلاله ندرس مدى تأثير هذه الاخيرة على اجابات الانظمة .
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 .

النتائج تكون على شكل معامل زلزالي فضائي للانتقال وللقوة من خلاله تتم دراسة مدى تأثير تغيرات الوسط في تحديد اجابة الابنية

كلمات مفاتيح آثار الموقع. انتشار الامواج . الاجابة الزلزالية . طيف الاستجابة. التغيرات الفضائية.

Résumé :

Les Effets de Site exercent une influence déterminante sur la réponse sismique des sols et des structures, et il est donc important d'en tenir compte dans les calculs de réponses sismiques des systèmes.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de l'analyse de la sensibilité du spectre de réponse aux variations en états locaux de sol.

En effet, un modèle analytique d'amplification de sol a été présenté. Ce modèle est basé sur une formulation de temps discrets de la propagation verticale des ondes SH, Une approche vibration aléatoire basée sur le spectre de réponse d'un oscillateur à 1ddl sur deux appuis, dont un est fondé sur la roche et l'autre sur une couche de sol, est présentée afin d'étudier l'influence des excitations non-uniformes sur des structures multi support.

Les réponses sont formulées comme des coefficients sismiques spatiaux, commodes pour les analyses de sensibilité de spectre de réponse aux effets de site.

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

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 site effects are modelled by considering reflections and transmission of vertically propagating shear waves from bedrock to the surface through a soil layer.

A random vibration based response spectrum of a simple oscillator on two supports, one of which is founded on rock outcrop and the other on soil layer, is formulated in order to study the influence of non-uniform excitations on multi support structures.

The resulting response spectrum is formulated as displacement and force spatial seismic coefficients, convenient for sensitivity analysis.

Key words: Site effects, Amplification, wave propagation, seismic response, Response spectrum, Spatial Variability.

TABLE DE MATIERE

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SEISMES	3
1.1. INTRODUCTION	3
1.2. ONDES DE VOLUME	3
1.2.1. ONDE P OU ONDE PRIMAIRE (ONDE DE COMPRESSION).	3
1.2.2. ONDE S (ONDE SECONDAIRE)	4
1.2.2. ONDES DE SURFACE	4
1.2.2.1. ONDE DE RAYLEIGH	5
1.2.2.2. ONDE DE LOVE	6
1.3. LOCALISATION DES TREMBLEMENTS DE TERRE.....	6
1.4. CARACTERISATION DU MOUVEMENT SISMIQUE	6
1.5. PARAMETRES AFFECTANT LE MOUVEMENT SISMIQUE	8
1.5.2. MAGNITUDE.....	8
1.5.3. L'INTENSITE	8
1.5.4. FACTEURS LIES AU TRAJET PARCOURU	8
1.5.5. FACTEURS LIES AUX CONDITIONS LOCALES.....	8
1.5.6. ATTENUATION	8
1.6. CONCLUSION	9
CHAPITRE 2 : CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES DU SOL.....	10
2.1. INTRODUCTION	10
2.2. DETERMINATION DES PARAMETRES DYNAMIQUES DU SOL	10
2.2.1. DETERMINATION DU MODULE DE YOUNG DYNAMIQUE DANS LE CAS DU CHARGEMENT CYCLIQUE.....	10
2.2.2. MODULE DE DEFORMATION PAR GLISSEMENT.....	10
2.2.3. COEFFICIENT DE POISSON	11
2.2.4. AMORTISSEMENT DANS LE SOL	11
2.3. CONCLUSION.....	11
CHAPITRE 3: NOTIONS DE VIBRATION ALEATOIRE	12
3.1. INTRODUCTION	12
3.2. PROCESSUS ALEATOIRES	12
3.2.1. DEFINITION	12
3.2.2. DESCRIPTION PROBABILISTE DES PROCESSUS ALEATOIRE	12

3.3. ANALYSE SPECTRALE DES PROCESSUS STOCHASTIQUES	16
3.3.1. INTRODUCTION:	16
3.3.2. FONCTION DE DENSITE SPECTRALE DE PUISSANCE (D.S.P)	17
3.3.3. FONCTION D'INTER-CORRELATION ET INTER-DENSITE SPECTRALE :	18
3.3.4. FONCTION D'AUTO-CORRELATION ET DE DENSITE SPECTRALE DE PROCESSUS DERIVES :	18
3.4. ANALYSE STOCHASTIQUE DES SYSTEMES LINEAIRES:	19
3.4.1. REPONSE D'UN SYSTEME LINEAIRE A UN DEGRE DE LIBERTE:.....	19
3.5. DEVELOPPEMENT CANONIQUE	20
3.5.1. Définition	20
3.5.2. DEVELOPPEMENT CANONIQUE D'UNE FONCTION ALEATOIRE	20
3.5. CONCLUSION	21
CHAPITRE 4 : REPONSE D'UN PROFIL DE SOL	22
4.1 INTRODUCTION	22
4.2 L'EQUATION D'ONDE	22
4.2.1 REFLEXION ET REFRACTION DES ONDES A UNE INTERFACE.....	24
4.2.2. PROPAGATION D'ONDE PLANE EN MILIEU ELASTIQUE	26
4.2.2. PLAN DE DECOMPOSITION DES ONDES P-SV, SH	26
4.3. PROFIL DE SOL MONOCOUCHE	28
4.4. PROFIL DE SOL MULTICOUCHEs	31
4.4.1 PRESENTATION DE LA METHODE DE THOMSON HASKELL	31
4.4.2. Expression de la fonction de transfert entre la surface libre et un point du profil de sol	33
4.5 CALCUL DE LA FONCTION DE TRANSFERT DANS UN MILIEU VISCOELASTIQUE	35
4.5.1 MILIEU VISCOELASTIQUE	35
4.5.2 FONCTION DE TRANSFERT DANS UN MILIEU VISCOELASTIQUE	36
4.6 EXEMPLE DE CALCUL DE LA REPONSE SISMIQUE D'UN PROFIL DE SOL SOUMIS A UNE ONDE SH (LE MODELE ELASTIQUE ET VISCOELASTIQUE)	39
4.7 CONCLUSION	42
CHAPITRE 5 : SPECTRE DE REPONSE SPATIALE ET EFFETS AMPLIFICATION.....	43
5.1. INTRODUCTION	43
5.2. VARIABILITE SPATIALE	43
5.3. MODELE DE KANAI TAJIMI	44

5.6. LA DENSITE SPECTRALE DU DEPLACEMENT DYNAMIQUE ET DES FORCES	50
5.7. LE COEFFICIENT SISMIQUE SPATIAL BASE SUR LE SPECTRE DE REPONSE.....	54
5.7. TRAITEMENT D'OUVRAGE	57
5.7.1 ÉTUDE DES DENSITES SPECTRALES DE DEPLACEMENTS ET LES FORCES (L'OUVRAGE TRAITER).....	58
5.7.2. ÉTUDE DES RMS DE DEPLACEMENT RELATIF ET DES FORCES	59
5.7.3. ESTIMATION PROBABILISTE DE DEPLACEMENT ET DES FORCES A PARTIR LE RMS	60
5.8 CONCLUSION	61
CHAPITRE 6 : ETUDE PARAMETRIQUE	62
6.1. INTRODUCTION	62
6.2. ETUDE PARAMETRIQUE	62
6.3. INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR 'H' DE LA COUCHE DU SOL	63
6.4. CONCLUSION	72
CONCLUSION GENERALE.....	73
REFERENCE.....	74

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1-1: L'effet des ondes P sur les milieux traversés.....	3
Figure 2-1: L'effet des ondes S sur les milieux traversés.....	4
Figure 3-1 : Propagation des ondes.....	4
Figure 4-1: onde de Rayleigh.....	5
Figure 5-1: onde de love.....	6

Chapitre 3

Figure 3.1: Système linéaire invariant dans le temps avec entrée unique et sortie unique.....	19
---	----

Chapitre 4

Figure 4.1 : réflexion et réfraction à une interface.....	24
Figure 4-2 : Déplacements associés aux ondes SH, SV.....	26
Figure 4- 3: Déplacement associé aux ondes P.....	27
Figure 4-4 : Réflexion et réfraction d'une SH dans une monocouche.....	27
Figure 4.5 : Fonction de Transfert $ T(\omega) $ -milieu élastique.....	29
Figure 4-6 Milieu Stratifié.....	30
Figure 4-7 Fonction de transfert avec la méthode de HASKELL.....	33
Figure 4-8 Atténuation Spatiale.....	34
Figure 4-9 Fonction de transfert milieu viscoélastique.....	36
Figure 4-10 Fonction de transfert dans un milieu viscoélastique.....	37
Figure 4-11 Caractéristiques du profil de sol.....	38
Figure 4-12 Réponses sismiques d'un profil de sol, utilisant la loi de comportement élastique linéaire.....	39
Figure 4-13 Réponses sismiques d'un profil de sol, utilisant la loi de comportement élastique linéaire.....	40

Liste Des Figures

Chapitre 5

Figure. 5.1: Transformation du mouvement du substratum à la surface pour une couche de sol (côté droit) et un affleurement rocheux (côté gauche).....	43
Figure. 5.2: Variation de la fonction de transfert avec τ , Q et r	47
Figure. 5.3: Système dynamique 1ddl.....	47
Figure 5-6 Densité spectrale de déplacement (a' , a).....	52
Figure 5-4: La densité spectrale : (b, b') : forces.....	52
Figure 5-6 (a) RMS de déplacement.....	54
Figure 5-6 (b) RMS Normalisé de déplacement relatif	54
Figure 5.6-a RMS forces.....	55
Figure 5.6-b : RMS forces Normalisés.....	55
Figure 5-7 Représentation du pont.....	56
Figure 5.8 – (a) Densité spectrale de déplacement relatif.....	57
Figure 5.8 – (b) Densité spectrale des forces f_A et f_B	57
Figure 5.9 –(a) RMS de déplacement relatif.....	58
Figure 5.9 –(b) RMS des forces f_A et f_B	58
Figure 5-10 : Accélérogramme d'EL CENTRO.....	60

Chapitre 6

Figure .6.1-a Densité spectrale du Déplacement relatif.....	62
Figure .6.1-b Densité spectrale des forces en A et B.....	62
Figure 6.2 -a Représentation du RMS Déplacement.....	63
Figure 6.2 -b Représentation du RMS Déplacement Normalisé.....	64
Figure 6.3-a Représentation du RMS forces.....	65
Figure 6.3-b Représentation du RMS forces Normalisé.....	65
Figure 6.4 a : l'effet du facteur de qualité ' Q ' Sur les RMS normalisé déplacement.....	66
Figure 6.4 b : l'effet du facteur de qualité ' Q ' Sur les RMS forces.....	67
Figure 6.4 c : l'effet du facteur de qualité ' Q ' Sur les RMS forces en petit intervalle $T_0 \in [0.6 \text{ à } 1.1]$	67

Liste Des Figures

- Figure 6.5-a** RMS normalisé déplacement pour différentes valeurs de V_S68
- Figure 6.5-b** RMS forces pour différentes valeurs de V_S69
- Figure 5.7-a** RMS normalisé déplacement pour différentes valeurs de $I_{R/S}$ en fonction de V_S70
- Figure 5.7-b** RMS forces pour différentes valeurs de $I_{R/S}$ en fonction de V_S70

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Propagation des ondes 11

INTRODUCTION

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) [1] au moment du tremblement de terre de San Francisco de 1906. Tout au long de ce siècle, les données macrosismiques 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 400 Km de l'épicentre.

Pour étudier la sensibilité de la réponse structurale aux variations spatiales en états locaux de sol on a utilisé un modèle simplifié, qui tient compte des paramètres essentiels représentant le sol et la structure. A cet effet, nous avons traité le problème à l'aide du modèle analytique d'amplification de sol Thomson HASKELL.

Pour la prise en compte de l'effet de la variabilité spatiale a été effectué par le modèle de Der Kiureghian.

Ce mémoire est composé de cinq chapitres :

- Le premier chapitre porte sur les généralités sur les séismes.
- Le deuxième chapitre traite des caractéristiques dynamiques du sol et leur mode de détermination.

Introduction

- Le troisième chapitre décrit des notions sur la théorie des vibrations aléatoires.
- Le quatrième chapitre est consacré à la réponse d'un profil de sol et au traitement de propagation d'ondes sismiques dans un milieu élastique et viscoélastique ainsi que de la méthode de THOMSON HASKELL
- Le cinquième chapitre comporte une présentation de spectre de réponse spatiale et effets d'amplification sur la densité spectrale de déplacement et des forces d'une structure donnée et suivi d'une étude d'un cas réel (pont à poutres multiples).
- le sixième chapitre comporte l'étude de sensibilité de la réponse structurale au changement des paramètres de sol.
- Enfin on termine par une conclusion générale.

CHAPITRE 1-GENERALITES SUR LES SEISMES

1-Introduction

Les tremblements de terre sont des catastrophes naturelles qui causent des dégâts désastreuses. Ces derniers est produit par la libération brutale de l'énergie élastique emmagasinée, une partie de cette énergie se transforme en chaleur et un compliment se propage dans toutes les directions sous forme d'ondes élastique de divers types [2], [3].

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 t et de l'espace. Et on distingue deux types d'ondes (ondes de volume et ondes de surface) [2].

1-2-1 : Ondes de volume :

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

1-2-1-1 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 les 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 [2],[4].

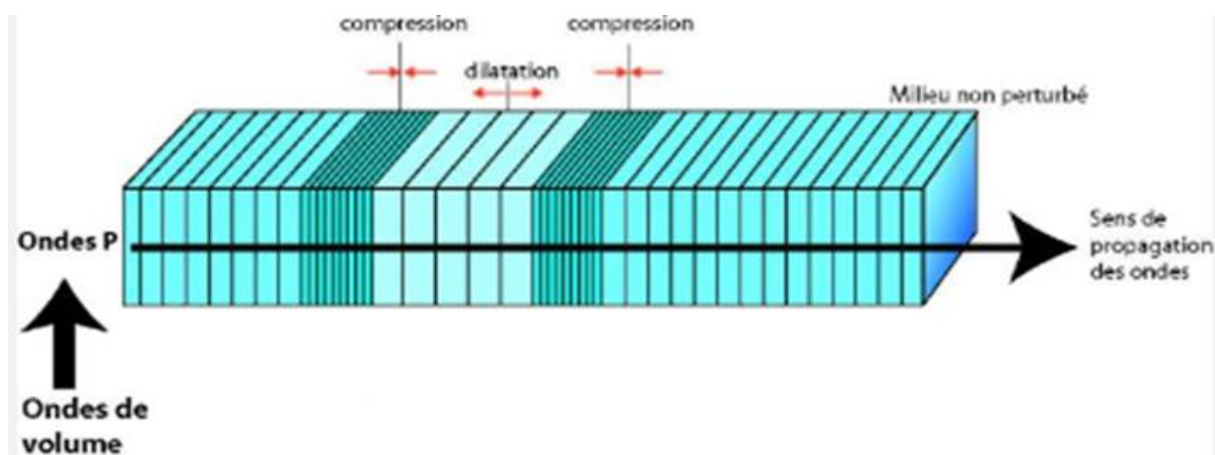


Figure 1-1: L'effet des ondes P sur les milieux traversés.

1-2-1-2 Ondes S (Ondes Secondaires) :

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 [2], [4].

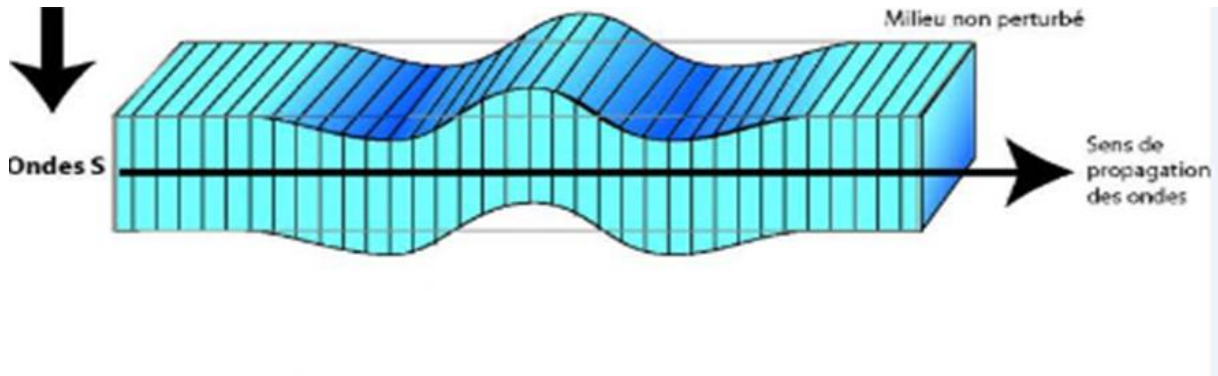


Figure 2-1: L'effet des ondes S sur les milieux traversés

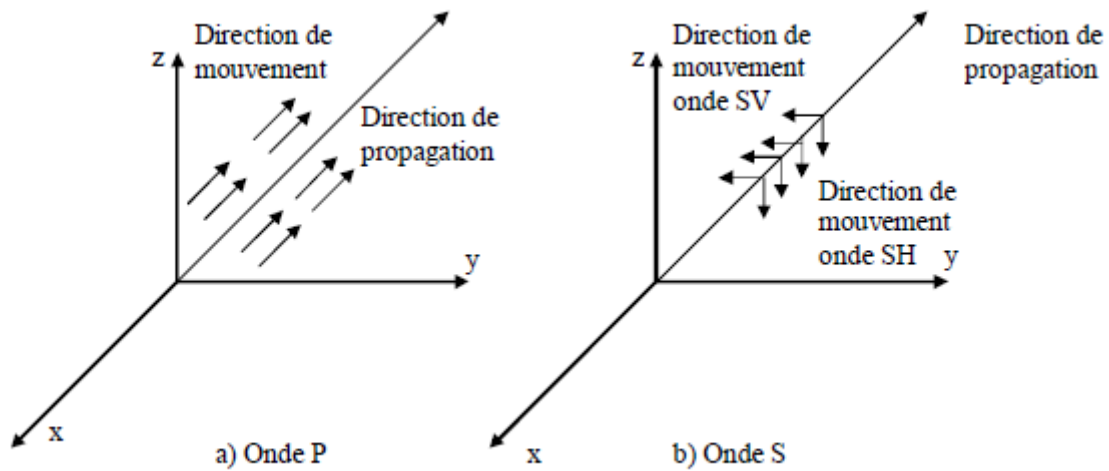


Figure 3-1 : Propagation des ondes

1-2-2 : Ondes de surface

Elles sont générées par l'arrivée des ondes de volume à la surface du globe. Plus le séisme est profond, moins elles sont puissantes. Elles concernent les couches superficielles des sols. Les ondes de surface sont les ondes de Rayleigh et de Love.

1-2-2-1 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) [2],[4].

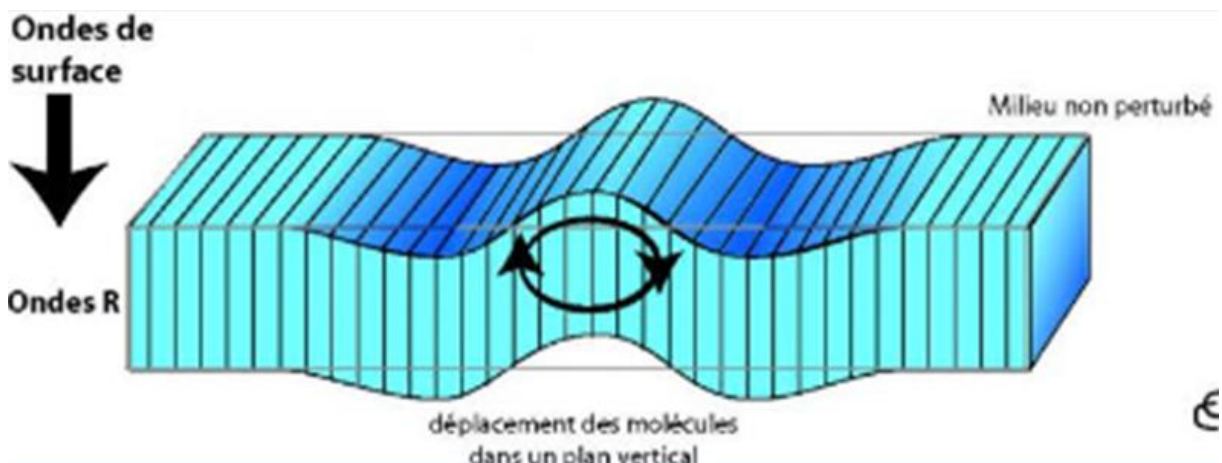


Figure 4-1: onde de Rayleigh

1-2-2-2 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 [2],[4].

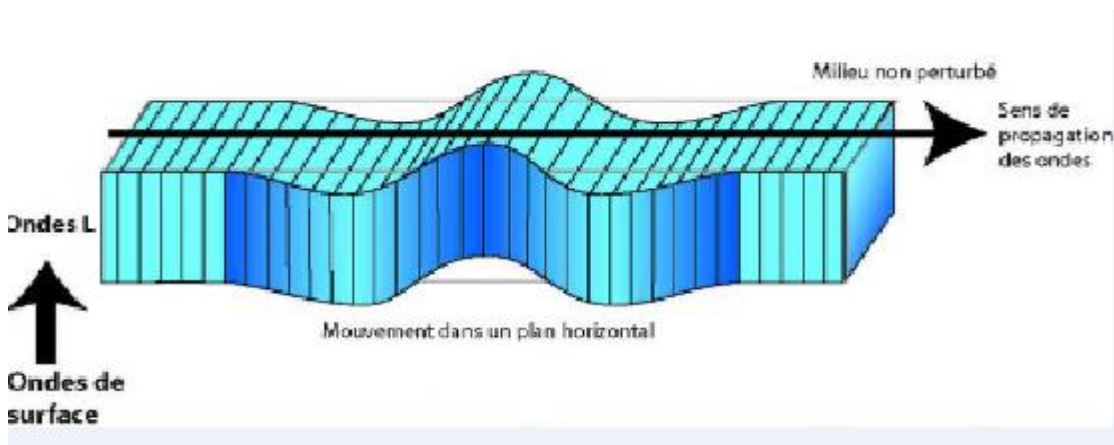


Figure 5-1: onde de love

1-3 Localisation des tremblements de terre :

- **Épicentre géométrique:** représente la projection verticale du foyer sismique sur la surface libre.
- **La distance focale :** C'est la distance qui sépare la station au foyer sismique.
- **L'épicentre d'observation:** représente le site où se produit le maximum de dégâts durant le tremblement de terre. Il n'est pas obligatoirement confondu avec l'épicentre géométrique.
- **Distance épicentrale :** c'est la distance qui sépare une structure de l'épicentre géométrique [2].
- **1-4- 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 [3].

1-5- Paramètres affectant le mouvement sismique

Le mouvement sismique est affecté par plusieurs paramètres dont :

1-5-1 - Facteurs liés à la source :

Principalement nous disposons de deux paramètres : le moment sismique M_0 et la chute de contrainte $\Delta\tau$ (en Ingénierie, il est préférable de caractériser un séisme par son amplitude ou par son intensité à l'épicentre) [3].

1-5-1-1 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.

1-5-1-2 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 $E =$

$$\frac{1}{2} \iiint_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV$$

Et σ_{ij} et ε_{ij} 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 : $\Delta E = \frac{\tau M_0}{G}$

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 η est le coefficient sismique [3].

1-5-2 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 épicycle, de la profondeur focale h et du facteur de site [2],[3].

1-5-3 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

1-5-4 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 [3].

1-5-5 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 [3].

1-5-6 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 [3].

1-6 Conclusion:

Quelques notions de sismologie et d'élasto-dynamique ont été présentées dans ce chapitre. Ces notions ont été 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 CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES DU SOL**2.1 Introduction**

La détermination des propriétés dynamiques des sols est nécessaire pour l'étude et la caractérisation de la réponse du sol au mouvement sismique.

Les paramètres les plus utilisés sont: le module de déformation longitudinale (module de Young) E , module de déformation transversale ν (coefficient de poisson), le module de déformation par glissement G (coefficient de lamé), et le coefficient d'amortissement ξ [5].

2.2 Détermination des paramètres dynamiques du sol

La détermination des modules de déformation dynamique s'effectue par des mesures de vitesses de propagation d'ondes longitudinales ou transversales [5].

2.2.1 Détermination du module de YOUNG dynamique dans le cas du chargement cyclique

Des travaux expérimentaux (Di Benedetto et Tatsuoka (1997)) ont montrés que l'interprétation et l'exploitation des chargements cycliques de faible amplitude reposent sur l'hypothèse qu'un incrément de déformation

$\Delta\varepsilon$ se décompose en deux parties : une composante non-visqueuse $\Delta\varepsilon^{nv}$ et une composante visqueuse $\Delta\varepsilon^v$ et :

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon^{nv} + \Delta\varepsilon^v \quad (1)$$

La composante non-visqueuse est instantanée, réversible et indépendante du temps. Alors que la composante visqueuse est différée, irréversible et dépendante du temps [3], [5].

2.1.2 Module de déformation par glissement

Le module de déformation par glissement μ se caractérise par des variations importantes en fonction de l'amplitude des déformations et essentiellement dans le cas des sols sans cohésion, selon l'état de serrage initial (l'indice des vides ou densité relative), la pression effective moyenne, et la teneur en eau [3] [5].

Les sols cohérents se distinguent des précédents par l'intervention du facteur temps, eu égard aux phénomènes de consolidation et aux propriétés « thixotropies » du milieu.

2.1.3 Coefficient de Poisson

Le coefficient de Poisson ν n'est susceptible de varier que dans des limites assez précises entre sa valeur supérieure absolue de 0,5 (solides incompressibles), et la valeur inférieure se situe rarement en dessous de 0.25 Et on distingue [3], [5]:

Types de sol	L'intervalle
Sable, sable et gravier	0,25 à 0,30
Sable silteux, sable argileux	0,30 à 0,35
Argile sableuse	0,35 à 0,40

Tableau : Variation de coefficient de poisson avec le type de sol

2.1.4 Amortissement dans le sol

Contrairement aux structures on distingue deux types d'amortissement dans le sol : l'amortissement matériel et l'amortissement géométrique ou radiatif

2.1.4.1 Amortissement matériel

Ce type d'amortissement correspond à la dissipation d'énergie sous forme de chaleur qui se produit dans les matériaux par-rapport aux déformations (amortissement interne) où correspondent à des frottements divers. L'amortissement se diffère d'un sol à un autre telle qu'il dépend de la fréquence, de l'amplitude des déformations, de l'état de contraintes, de la teneur en eau de l'indice des vides [3] [5].

2.3.4.2 Amortissement géométrique ou radiatif

On le nomme aussi un amortissement radiatif il est directement associé à l'effet de dissipation d'énergie par rayonnement lors de la propagation des ondes dans le sol. Est fonction de la pulsation propre de vibration ω [3] [5].

2.4 Conclusion

La détermination des propriétés dynamique des sols est nécessaire pour l'étude et la caractérisation de la réponse du sol au mouvement sismique.

CHAPITRE3: NOTIONS DE VIBRATION ALEATOIRE**3.1 Introduction:**

Les vibrations aléatoires constituent une discipline qui combine la théorie des processus aléatoires et la dynamique des structures. Le couplage de ces deux disciplines a été rendu nécessaire par l'existence de certaines classes de problèmes pour lesquels le problème de dynamique ne peut pas être formulé sous sa forme déterministe traditionnelle, par suite d'une connaissance imparfaite du système ou des forces qui lui sont appliquées. L'incertitude se répercute évidemment sur la réponse du système qui n'est plus connue qu'au travers de ses propriétés statistiques [6].

3.2 Processus Aléatoires:**3.2.1 Définition:**

Si un phénomène physique est aléatoire alors chaque échantillon $X(t)$ de ce Phénomène (enregistrement, histoire temporelle,...) est le résultat de circonstances uniques qui ne se répèteront pas à l'occasion d'autres mesures indépendantes du ce même phénomène [6].

3.2.2 Description probabiliste des processus aléatoires:

La caractérisation d'un processus aléatoire repose essentiellement sur deux paramètres: la fonction de densité de probabilité et les moments.

3.2.2.1 Fonction de densité de probabilité: (FDP)

Pour caractériser le processus aléatoire de façon complète dans le sens probabiliste, il est nécessaire d'établir la fonction de densité de probabilité multi variée

$$P(x(x_1, x_2, \dots, x_n)): \text{Où } x_i = x(t_i).$$

Pour une grande classe de problèmes, il suffit d'établir les deux premières fonctions seulement:

$$P(x(t))$$

$$P(x(t_1), x(t_2))$$

3.2.2.2 Moments:

La moyenne et la moyenne de la valeur carrée, qui sont les moments les plus importantes du processus, ont les expressions suivantes [7]:

$$m_x = E[X(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} XP(x)dx \quad (3.1)$$

$$E[X(t)^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} X^2P(x)dx \quad (3.2)$$

Espérance mathématique

Espérance mathématique d'une variable aléatoire est la somme des produits de toutes les valeurs possible de cette variable aléatoire [6] [7].

$$M[X] = \frac{\sum_{i=1}^n Xi Pi}{\sum_{i=1}^n Pi} = \sum_{i=1}^n XiPi \quad (3.3)$$

Variable aléatoire centré

Variable aléatoire centré associé est la différence entre le variable aléatoire et l'espérance mathématique [6].

$$\dot{X} = X - mx \quad (3.4)$$

Le moment centré

L'espérance mathématique d'un variable aléatoire centré \dot{X}

$$M[\dot{X}] = M[X - mx] = \sum_{i=1}^n (Xi - mx)Pi = \sum_{i=1}^n (XiPi) - mx \sum_{i=1}^n Pi = 0 \quad (3.5)$$

Donc le centrage d'un variable aléatoire c'est la translation de l'origine au point moyen [7]

Le mode

C'est la valeur la plus probable où c'est la valeur pour laquelle la densité de probabilité est maximale [6].

La fonction de corrélation :

$$k_x(t, t') = E[X(t).X(t')] \quad (3.6)$$

La covariance :

La covariance est une caractéristique du système décrivant en plus de la dispersion du variable aléatoire X en t et t' [6].

La fonction de covariance

$$D_x(t, t') = E[(X(t) - m_x). (X(t') - m_x)] \quad (3.7)$$

A partir des fonctions définies ci-dessus on caractérise

La variance:

Caractérise la dispersion de ses valeurs au voisinage de son espérance mathématique, est la dimension carrée de variable aléatoire

$$D_x(t) = E[X(t) - m_x(t)]^2 \quad (3.8)$$

L'écart type (Ecarte quadratique moyen) :

$$\sigma_x(t) = \sqrt{D_x(t)} = \sqrt{E[X(t) - m_x(t)]^2} \quad (3.9)$$

Le coefficient de corrélation:

$$\rho_x(t, t') = \frac{k_x(t, t')}{\sigma_x(t)\sigma_x(t')} \quad (3.10)$$

Les mêmes définitions précédentes pour le cas d'un processus aléatoire peuvent être étendues au cas de deux ou plusieurs processus aléatoires. On définit ainsi: La fonction d'inter-corrélation:

$$k_{XY}(t, t') = E[X(t).Y(t')] \quad (3.11)$$

La fonction d'inter-covariance :

$$k_{XY}(t, t') = E[(X(t) - m_X(t)) \cdot (Y(t') - m_Y(t'))] \quad (3.12)$$

Les coefficients d'inter-corrélation:

$$\rho_{XY}(t, t') = \frac{k_{XY}(t, t')}{\sigma_X(t) \cdot \sigma_Y(t')} \quad (3.13)$$

3.2.3 Processus stochastiques stationnaires:

Une fonction aléatoire est stationnaire si ces propriétés probabilistes est invariante par la translation dans le temps, nécessitant varier d'une façon homogène c'est-à-dire l'espérance mathématique soit constante [6] [7] [8].

$$D_x(t) = D_x = \text{constante} \quad (3.14)$$

La fonction de corrélation

Une fonction de corrélation d'un processus aléatoire stationnaire est une fonction d'un seul argument

$$k_x(t + \tau) = k_x(\tau) \quad (3.15)$$

k_x Est une fonction symétrique

$$k_x(t, t') = k_x(t', t) \quad (3.16)$$

k_x Est une fonction paire

$$k_x(-\tau) = k_x(\tau) \quad (3.17)$$

Fonction d'auto-covariance:

$$E[X(t) \cdot X(t + \tau)] = k_x(\tau) \quad \text{Indépendante de } t \quad (3.18)$$

$$D_x(-\tau) = D(\tau) \quad (3.19)$$

Les processus aléatoires utilisés en pratique ont toujours un début et une fin, et ne peuvent donc pas être vraiment stationnaire. Mais pour des considérations pratiques, il est très souvent convenable de supposer que le processus est stationnaire pour l'essentiel de la durée, ou qu'il peut être divisé en plusieurs périodes sur lesquelles il est approximativement stationnaire [7].

3.3 Analyse Spectrale des Processus Stochastiques:

3.3.1 Introduction:

Il est nécessaire de faire une décomposition spectrale, d'un processus aléatoire. La fonction d'un accomplissement $x(t)$ peut être représentée par:

- **Développement d'un signal en série de Fourier Si la fonction est périodique**

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) \quad (3.20)$$

Pour $\frac{2\pi}{T} = \omega$

et a_0, a_k, b_k , Sont des coefficients de Fourier.

Alors: $x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{+\infty} [a_k \cos(\omega kt) + b_k \sin(\omega kt)]$

Après le développement la fonction de Fourier s'écrit :

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_k e^{i\omega kt} \quad (3.21)$$

c_k : Sont des coefficients complexes de série de Fourier et sont défini comme sous de suit:

$$c_k = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) e^{-i\omega kt} dt \quad (3.22)$$

- **Transformée de Fourier si la fonction n'est pas périodique**

La fonction de Fourier $x(t)$ s'applique aussi sur les fonctions non périodique qui sont défini pour $t \in]-\infty, +\infty[$

Telle que: $\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt$ est une valeur finie

Et pour $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$ on obtient:

$$X(\omega) = c_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3.23)$$

Et de même manier on trouve la transformé inverse

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{i2\pi ft} dt \quad (3.24)$$

Et se décompose par une valeur réelle et une valeur imaginaire

$$Re[X(f)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cos(2\pi ft) dt \quad (3.25)$$

$$Im[X(f)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \sin(2\pi ft) dt \quad (3.26)$$

3.3.2 Fonction de densité spectrale de Puissance: (D.S.P)

Pour que $X(\omega)$ n'est pas absolument intégral c'est-à-dire :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |X(t)dt| \text{ N'est pas une valeur finie (réelle).}$$

Et pour cette raison on utilise la fonction de corrélation pour obtenir la fonction de densité de puissance (D.S.P)

$$k_X(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_X(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (3.27)$$

Ces relations sont les relations de "Wiener-Khintchine"[6].

Pour $\tau = 0$ l'équation (3.35) s'écrit donc :

$$k_X(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_X(\omega) d\omega = E[X^2] \quad (3.28)$$

La fonction de densité spectrale de puissance est une mesure de la distribution dans le domaine des fréquences de la moyenne de la valeur Carrée $E[X^2]$.

$S_X(\omega)$ Donne une indication de la décomposition spectrale du signal :

$$S_X(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E[|\bar{X}(\omega, t)|^2]}{4\pi T} \quad (3.29)$$

3.3.3 Fonction d'inter-corrélation et inter-densité spectrale :

Soient $X(t)$ et $Y(t)$ deux processus stochastiques stationnaires réels:

$$E[X(t)Y(t + \tau)] = k_{XY}(\tau) \quad (3.30)$$

$$E[Y(t)X(t + \tau)] = k_{XY}(\tau) = k_{XY}(-\tau) \quad (3.31)$$

La fonction d'inter-densité spectrale est définie par:

$$S_{XY}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} k_{XY}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2.32)$$

$$S_{YX}(\omega) = S_{XY}(-\omega) = S_{XY}^*(\omega) \quad (3.33)$$

3.3.4 Fonction d'auto-corrélation et de densité spectrale de processus dérivés :

a) Fonction d'auto-corrélation:

Les deux premières fonctions d'auto-corrélation de processus dérivés sont caractérisées par [6]:

$$k_{\dot{X}}(\tau) = -\frac{d^2}{d\tau^2} k_X(\tau) \quad (3.34)$$

$$k_{\ddot{X}}(\tau) = -\frac{d^2}{d\tau^2} k_{\dot{X}} = \frac{d^4}{d\tau^4} k_X(\tau) \quad (3.35)$$

b) Fonction de densité spectrale de puissance:

$$S_{\dot{X}}(\omega) = -\frac{d^2}{d\tau^2} S_X(\tau) = \omega^2 S_X(\omega) \quad (3.36)$$

$$S_{\ddot{X}}(\omega) = \frac{d^4}{d\tau^4} S_X(\tau) = \omega^4 S_X(\omega) \quad (3.37)$$

3.4 Analyse Stochastique des Systèmes Linéaires:

3.4.1 Réponse d'un système linéaire à un degré de liberté:

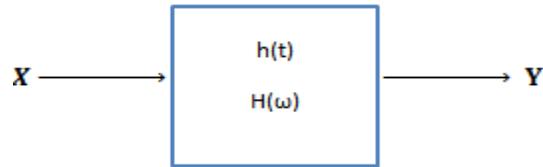


Figure.1.3: Système linéaire invariant dans le temps avec entrée unique et sortie unique

4.1.1 Domaine temporel:

La réponse temporelle unitaire d'un système initialement au repos est la fonction impulsionnelle $h(t)$, causée par une impulsion de Dirac $\delta(t)$. A partir du principe de superposition, on définit la réponse $Y(t)$ du système par un produit de convolution ou intégrale de Duhamel [8] :

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) \cdot x(t - \tau) d\tau = h * x \quad (3.38)$$

D'après le principe de causalité on a $h(t) = 0$ pour $\tau < 0$ soit:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) \cdot x(t - \tau) d\tau \quad (3.39)$$

3.4.1.2 Domaine des fréquences:

De manière analogue, la réponse fréquentielle unitaire $H(\omega)e^{i\omega t}$ de ce système s'exprime en termes de la fonction de transfert $H(\omega)$ causée par une excitation harmonique unitaire $e^{i\omega t}$. $H(\omega)$ Est la transformée de Fourier à $(1/2\pi)$ près de la réponse impulsionnelle $h(t)$ soit:

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3.40)$$

La relation entrée-sortie du système, prend la forme d'une simple multiplication

$$Y(\omega) = H(\omega).X(\omega)(3.41)$$

3.5 Développement Canonique

3.5.1 Définition

Développement canonique c'est une représentation sous la forme d'une somme des fonctions aléatoires élémentaires [7].

On appelle fonction aléatoire élémentaire une fonction de la forme :

$$X(t) = V\phi(t)(3.42)$$

V :Variable aléatoire,

$\phi(t)$: Fonction non linéaire.

3.5.2 Développement Canonique d'une Fonction Aléatoire

$X(t)$: Fonction aléatoire élémentaire

$$X(t) = m_x(t) + \sum_{i=1}^m V_i \phi_i(t)(3.43)$$

Ou les coefficients V_1, V_2, \dots, V_m forment un système de variable aléatoire.

Soit une fonction aléatoire stationnaire $X(t)$ sur $[0, T]$

La fonction de corrélation et la variance de la fonction aléatoire sont définies par :

$$k_x(t, t') = M[X(t).X(t')](3.44)$$

$$k_x(t, t') = M \left[\sum_{i=1}^m V_i V_j \phi_i(t) \phi_j(t') \right] = \sum_{i=1}^m M[V_i V_j] \phi_i(t) \phi_j(t') (3.45)$$

Si $i = j$ on a :

$$M[V_i V_j] = M[V_i^2] = k_{ij} = D_i \quad (3.46)$$

D_i Étant la variance de la variable aléatoire V_i .

Si $i \neq j$ on a :

$$M[V_i V_j] = k_{ij} \quad (3.47)$$

On obtienne de la fonction de corrélation de $X(t)$ donnée par la relation:

$$k_x(t, t') = \sum_{i=1}^m D_i \phi_i(t) \phi_j(t') + \sum_{i=1}^m k_{ij} \phi_i(t) \phi_j(t') \quad (3.48)$$

On posant $t' = t$ on obtient la variance de la fonction aléatoire $X(t)$

$$D_x(t) = \sum_{i=1}^m D_i \phi_i + \sum_{i=1}^m k_{ij} \phi_i(t) \phi_j(t') \quad (3.49)$$

Si V_i n'est pas corrélé, c'est -à -dire $k_{ij} = 0$ pour $i \neq j$ dans ce cas le développement de la fonction aléatoire $X(t)$ est dit canonique.

$X(t) = m_x(t) + \sum_{i=1}^m V_i(t)$ Et sa fonction de corrélation s'exprime d'une manier fort simple (k_{ij} pour $i = j$), et on obtient

$$k_{ij}(t, t') = \sum_{i=1}^m D_i \phi_i(t) \phi_j(t') \text{ développement cononique de la fonction de corrélation}$$

3.5 Conclusion:

Des notions sur les vibrations aléatoires sont présentées dans ce chapitre. Ces dernières serviront d'éléments de base dans l'analyse de structure soumise à des excitations aléatoires.

CHAPITRE 4 REPOSE D'UN PROFIL DE SOL

4.1 Introduction

Il est nécessaire d'avoir une certaine connaissance de la propagation des ondes sismiques dans le milieu du sol pour deux raisons principales. Premièrement, les caractéristiques dynamiques de l'input du mouvement du sol d'entrée dépendent de la modification du mouvement du substratum rocheux au fur et à mesure qu'il se propage à travers le sol. Deuxièmement, la connaissance de la propagation des ondes dans le milieu du sol est essentielle pour comprendre les modifications des mouvements du sol dues aux propriétés du sol [3].

4.2 L'équation D'onde

Dans le cadre de l'hypothèse des petits déplacements d'un solide élastique, homogène et isotrope, occupant un domaine Ω , limité par sa surface Γ et repéré par un système de coordonnées défini par la base vectorielle (x,y,z) . Le couple $[\underline{u}, \underline{\sigma}]$ caractérisé par le champ de déplacement $\underline{u}(\underline{x}, t)$ et le tenseur de contraintes $\underline{\sigma}(\underline{x}, t)$ correspondant à une densité volumique de force $\underline{f}(\underline{x}, t)$ et une masse volumique ρ . Ce système est en état élasto-dynamique lorsqu'il vérifie le système d'équation gouvernant le mouvement [3].

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

$$\text{div} \underline{\sigma} + \underline{f} = \rho \left(\frac{\partial^2 \underline{u}}{\partial t^2} \right) \quad (4.1)$$

La loi de comportement élastique s'écrit :

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{ij} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (4.2)$$

En remplaçant (4.2) dans (4.1) on aboutit à l'équation suivante :

$$(\lambda + 2\mu)(\nabla \cdot \nabla \cdot \underline{u}) - \mu \nabla \nabla \nabla \nabla \underline{u} + \underline{f} = \rho \left(\frac{\partial^2 \underline{u}}{\partial t^2} \right) \quad (4.3)$$

Pour résoudre l'équation (4.3), on utilise une approche qui consiste à appliquer le concept de la décomposition d'HELMOLTZ au champ inconnu et exprimer le champ \underline{u} en terme de dérivées de potentiels scalaire ϕ et vectoriel ψ tel que [3]:

$$\underline{u} = \underline{u}_1 + \underline{u}_2$$

Avec : \underline{u}_1 qui dérive d'un potentiel scalaire ϕ le mouvement est rotationnel.

\underline{u}_2 : qui dérive d'un potentiel vectoriel $\underline{\psi}(\psi_x, \psi_y, \psi_z)$ le mouvement est rotationnel.

$$\underline{u} = \underline{u}_1 + \underline{u}_2 = \underline{\nabla} \cdot \phi + \underline{\nabla} \times \underline{\psi} \quad (4.4)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \underline{\nabla} \Delta \underline{u}_1 = 0 \\ \underline{\nabla} \Delta \underline{u}_2 = 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

En remplaçant le vecteur déplacement \underline{u} par sa valeur dans l'équation (4.3)

On aura :

$$((\lambda + 2\mu)[\underline{\nabla} \Delta \nabla^2 \phi] - \mu [\underline{\nabla} \Delta \underline{\psi}]) + \underline{f} = \rho \left(\partial^2 \frac{(\underline{\nabla} \cdot \phi + \underline{\nabla} \times \underline{\psi})}{\partial t^2} \right) \quad (4.6)$$

n négligeant les forces volumiques, vue qu'elles produisent un effet relativement insignifiant sur la propagation des ondes sismiques, on aboutit aux deux équations aux dérivées partielles satisfaites par ϕ et $\underline{\psi}$ suivantes :

$$\begin{cases} \Delta \phi - \frac{1}{V_P^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \\ \Delta \underline{\psi} - \frac{1}{V_S^2} \frac{\partial^2 \underline{\psi}}{\partial t^2} = 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\begin{cases} V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \\ V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \end{cases} \quad (4.8)$$

On définit la constante du matériau par : $R = \frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}}$ Les équations (4.8)

représentent une classe d'équations linéaires aux dérivées partielles du second ordre, ce

Sont deux équations d'onde de volume, longitudinale ou transversale dont les vitesses de propagation sont respectivement V_P et V_S .

Les deux équations aux dérivées partielles ont pour solutions générales données par :

$$\phi = A \exp\left(i \frac{\omega}{V_P} (V_P t - l_x x - l_y y - l_z z)\right) = A \cdot f_P \quad (4.9)$$

$$\underline{\psi} = \underline{B} \exp\left(i \frac{\omega}{V_S} (V_P t - l_x x - l_y y - l_z z)\right) = \underline{B} \cdot f_S \quad (4.10)$$

Les composantes l_x, l_y, l_z du vecteur \underline{l} représentent les cosinus directeurs de la direction de propagation des ondes.

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

Les fonctions (9), (10) vérifient les équations d'ondes (4.7) si :

$$l_x^2 + l_y^2 + l_z^2 = 1$$

Et

$$\underline{l} \cdot \underline{B} = 0$$

Cette dernière expression implique donc que les vecteurs \underline{B} et $\underline{\psi}$ sont perpendiculaires à \underline{l} .

Le modèle de propagation des ondes élastiques a prouvé de façon mathématique, qu'un tremblement de terre produit deux types d'onde de volume [3].

4.3 Réflexion et Réfraction des ondes à une interface

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

- celui qui marque l'arrivée de l'ébranlement longitudinal. L'onde longitudinale étant la plus rapide, ce front d'onde est celui qui sépare la partie de solide encore au repos et la partie du solide en mouvement [3].

-celui qui marque l'arrivée de l'ébranlement transversal. Il correspond à un regain d'énergie.

Les trajectoires perpendiculaires aux fronts d'ondes sont appelées rais sismiques.

Lorsqu'un front d'onde heurte une surface de discontinuité des caractéristiques mécaniques séparant le milieu 1 du milieu 2, dans lequel les propriétés physiques changent brusquement, il

se produit des phénomènes de réflexion ou de réfraction semblables à ceux observés en optique ; une partie de l'énergie revient en arrière dans le premier milieu, on dit qu'il y a réflexion à l'interface des deux milieux. Une autre partie passe dans le deuxième milieu, on dit qu'il y a réfraction. De plus, il se produit des changements de mode, une onde incidente donnant en générale naissance à la fois à une onde longitudinale et à une onde de cisaillement s'appelle une onde convertible. Les ondes P et SV sont classées dans cette catégorie.

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

La loi de SNELLE s'écrit :

$$\frac{V_{P1}}{\sin \alpha} = \frac{V_{S1}}{\sin \beta} = \frac{V_{P2}}{\sin \alpha'} = \frac{V_{S2}}{\sin \beta'} = c \tag{4.11}$$

c : étant la vitesse apparente de propagation suivant la direction de la surface de séparation.

$V_{P1}, V_{S1}, V_{P2}, V_{S2}$ Sont les vitesses de propagation des ondes longitudinales et transversales dans le milieu 1 et dans le milieu 2 respectivement.

$\alpha, \beta, \alpha', \beta'$ Sont les angles des directions avec la surface de séparation des milieux.

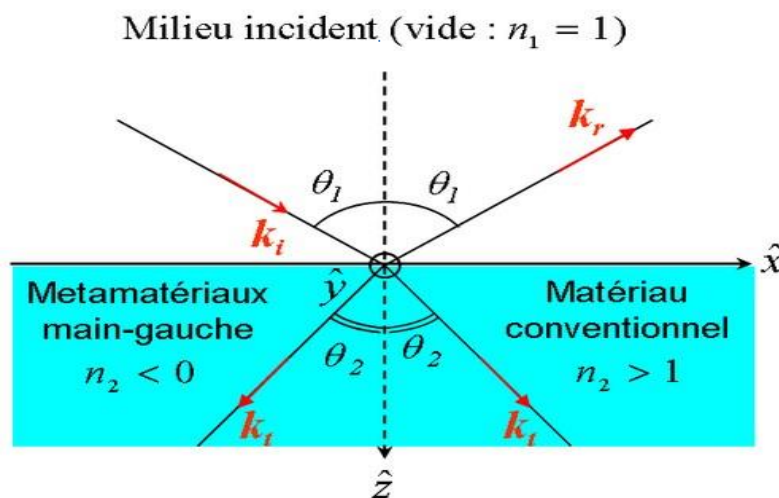


Figure 4.1 : réflexion et réfraction à une interface

4.4 Propagation des ondes planes en milieu élastique

Le problème de propagation d'ondes sismiques depuis une source est un problème essentiellement tridimensionnel. En considérant la source comme constituée d'une ligne (faille) et en se plaçant à une certaine distance de celle-ci, le problème devient bidimensionnel, toutes les ondes se propagent parallèlement à un plan (xoz) et le mouvement est indépendant de la coordonnée y. la solution générale pour une onde stationnaire plane s'écrit alors ($l_y = 0$) :

$$\begin{aligned} u_x &= A_P f_P l_x + A_{SV} f_S l_z \\ u_y &= A_{SH} \\ u_z &= A_P f_P l_z - A_{SV} f_S l_x \end{aligned} \quad (4.12)$$

Si l_x et l_y sont réels, inférieurs à 1, ils représentent les cosinus directeurs

($l_x = \sin \alpha, l_z = \cos \alpha$) De la direction de propagation. Les expressions de f_P et f_S sont obtenues à partir de l'équation (12) avec $l_y = 0$.

Les équations (24) montrent que, dans le cas d'onde plane, le déplacement suivant oy est fonction des coordonnées suivant ox et oz. Il ne résulte que de la propagation d'ondes SH

Alors que les déplacements des ondes P et SV sont suivant ox et oz .

Si la direction de propagation est verticale, parallèle à l'axe oz ($l_x = 1$), le problème devient unidimensionnel, chacune des composantes du mouvement est découplée des autres :

$$\begin{aligned} u_x &= A_{SV} f_S \\ u_y &= A_{SH} f_S \\ u_z &= A_P f_P \end{aligned}$$

Les expressions de f_P et f_S sont obtenues à partir de l'équation (12)

Avec : $l_x = 0, l_y = 0, l_z = 1$.

4.5 Plan de décomposition des ondes P-SV/SH

Les équations d'ondes (3.9) et (3.10) indiquent que pour un milieu élastique isotrope, l'onde plane de volume peut être décomposée en une onde longitudinale et une onde transversale de cisaillement.

La combinaison des équations (3.4), (3.9) et (3.10) nous permet d'écrire :

$$\underline{u}_1 = \underline{\nabla} \cdot \underline{\phi} = -\frac{i\omega}{V_P} A f_P \underline{l} = A_P f_A \underline{l} \tag{4.13}$$

$$\underline{u}_2 = \underline{\nabla} \wedge \underline{\psi} = \frac{i\omega}{V_S} f_S B \underline{\Lambda} \underline{l} \tag{4.14}$$

Avec
$$\begin{cases} f_P = \exp(i \frac{\omega}{V_P} (V_P t - l_x x - l_y y - l_z z)) \\ f_S = \exp(i \frac{\omega}{V_S} (V_S t - l_x x - l_y y - l_z z)) \end{cases} \tag{4.15}$$

L'expression (4.13) montre que le déplacement \underline{u}_1 a lieu dans le sens de la direction de propagation, ce type est dit de compression ou onde p. D'autre part, l'expression (4.14) indique que le déplacement induit est dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation, ce type d'onde est dit de cisaillement ou onde S.

Il est possible de décomposer le mouvement engendré par les ondes S en un mouvement dans un plan horizontal et un mouvement dans le plan vertical les ondes correspondant au mouvement horizontal sont dites SH et celles correspondant au mouvement vertical sont dites SV.

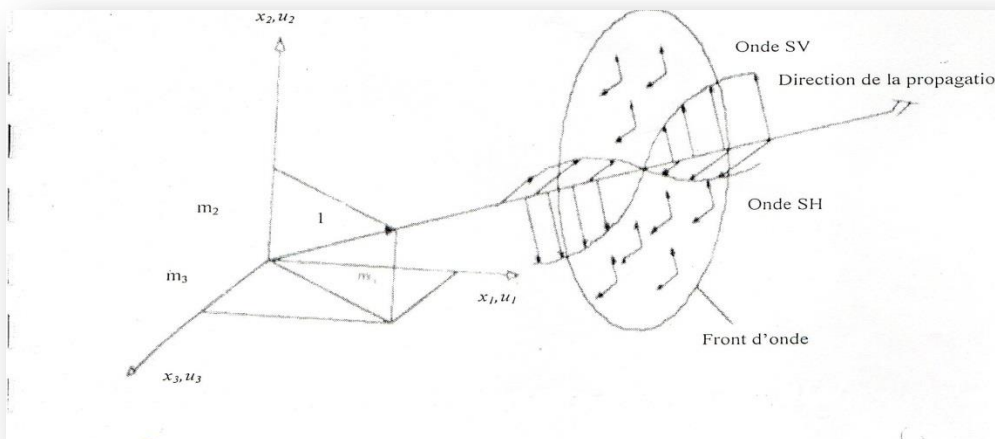


Figure 4-2 : Déplacements associés aux ondes SH, SV

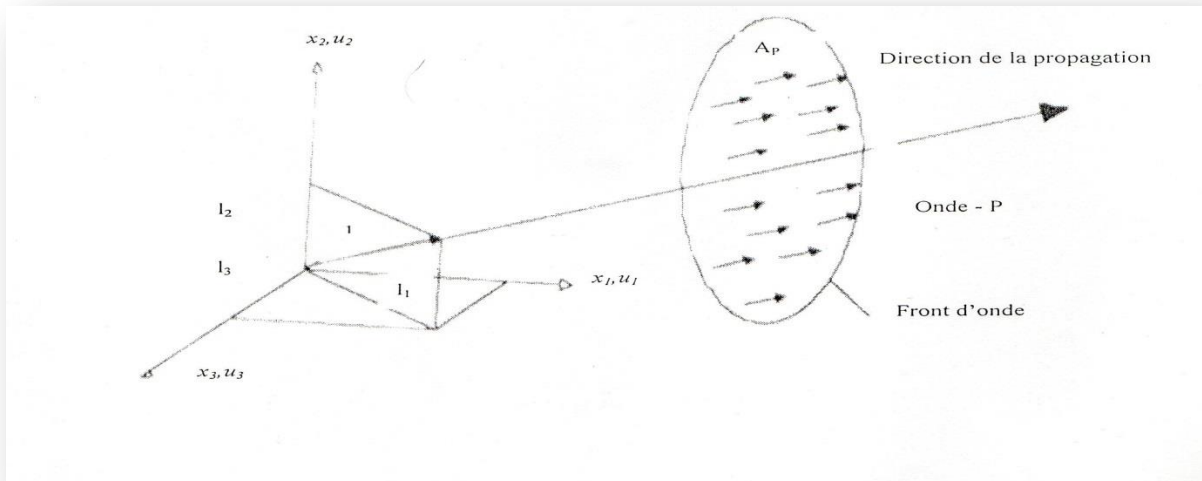


Figure 4- 3: Déplacement associé aux ondes P

4.6 Profil de sol monocouche

Considérons le cas d'une couche homogène d'épaisseur h , surmontant un semi espace représentant le rocher [3].

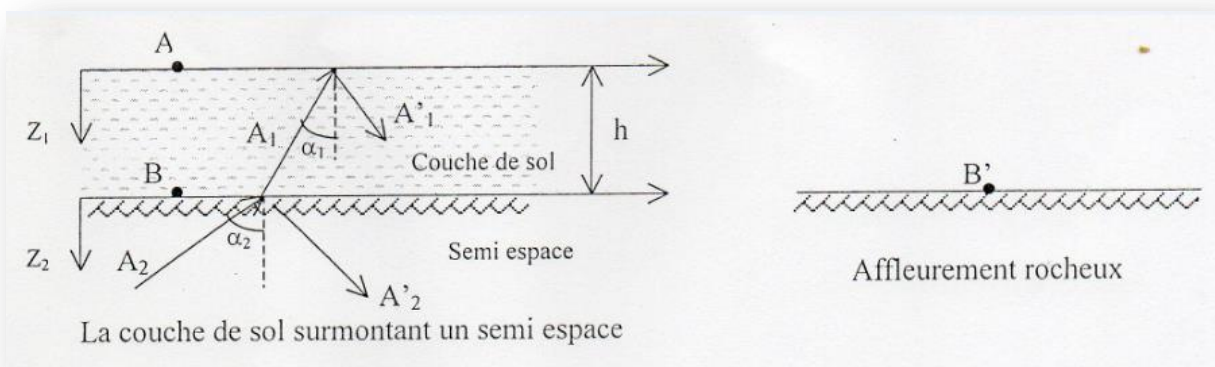


Figure 4-4 : Réflexion et réfraction d'une SH dans une monocouche

En considérant des repères liés à chaque milieu, le déplacement horizontal dans chaque couche est le résultat de deux déplacements, l'un associé à l'onde incidente et l'autre à l'onde réfléchie, produit lorsque l'onde incidente heurte la surface de discontinuité entre les deux milieux.

- Dans la couche de sol le déplacement s'écrit :

$$u_1 = (A_1 \exp(iP_1 z) + A'_1 \exp(-iP_1 z))f_1(x, t) \quad (4.15)$$

Avec $P_1 = \frac{\omega \cos \alpha_1}{V_{S1}}$ et $f_1(x, t) = \exp(i \frac{\omega}{V_{S1}} (V_{S1} t - x \sin \alpha_1))$

- Dans le semi espace :

$$u_2 = (A_2 \exp(iP_2 z) + A'_2 \exp(-iP_2 z))f_2(x, t) \quad (4.16)$$

Avec $P_2 = \frac{\omega \cos \alpha_2}{V_{S2}}$ et $f_2(x, t) = \exp(i \frac{\omega}{V_{S2}} (V_{S1} t - x \sin \alpha_1))$

On applique la condition aux limites à la surface libre ($\tau_1 = 0$ pour $z = 0$)

On aboutit :

$$iP_1 A_1 - iP_1 A'_1 = 0 \rightarrow A_1 = A'_1$$

Les conditions de compatibilité à l'interface des deux milieux qui doivent être vérifiées en tout (x, t) nous permettent d'écrire :

$$u_1(h) = u_2(0)$$

$$\tau_1(h) = \tau_2(0)$$

Ou : $\tau_k = \mu_k \frac{\partial u_k}{\partial z} \quad (k = 1, 2)$

On aboutit au système d'équation suivant :

$$\begin{cases} A_1(\exp(iP_1 h) + \exp(-iP_1 h)) = A_2 + A'_2 \\ \mu_1 P_1 A_1(\exp(iP_1 h) + \exp(-iP_1 h)) = \mu_2 P_2 (A_2 - A'_2) \end{cases} \quad (4.17)$$

En posant : $q = \frac{\mu_1 P_1}{\mu_2 P_2} = \sqrt{\frac{\rho_1 \mu_1 \cos \alpha_1}{\rho_2 \mu_2 \cos \alpha_2}}$

Les expressions de A_2 et de A'_2 en fonction de A_1 sont données par :

$$A'_2 = \frac{A_1}{2} [(1 - q) \exp(iP_1 h) + (1 + q) \exp(-iP_1 h)] \quad (4.18)$$

$$A_2 = \frac{A_1}{2} [(1 + q) \exp(iP_1 h) + (1 - q) \exp(-iP_1 h)] \quad (4.19)$$

Ces deux équations permettent de déterminer les amplitudes d'un semi espace.

Le module de la fonction de transfert reliant les déplacements des points A et B, situés sur un affleurement hypothétique du demi-espace, est donné par :

$$|T_{(1,2)}(\omega)| = \frac{|A'_1 + A_1|}{|A'_2 + A_2|} = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 P_1 h + q^2 \sin^2 P_1 h}} \quad (4.20)$$

Exemple de calcul de fonction de transfert

Considérons une couche de sol élastique de 150m d'épaisseur ($V_s = 750m/s, \rho = 2000kg/m^3$) surmontant sur un semi espace ($V_s = 1500m/s, \rho = 3000kg/m^3$). l'angle d'incidence est pris nul.

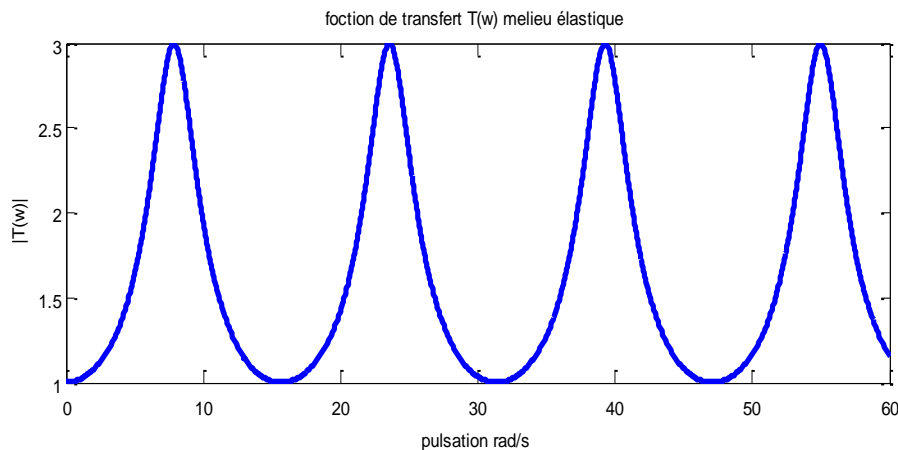


Figure 4.5 : Fonction de Transfert $|T(\omega)|$ -milieu élastique

La figure (4.5) montre que dans le cas d'une couche de sol surmontant un semi espace élastique, l'amplitude de la fonction prend des pics successifs qui caractérisent les modes de vibration de la couche de sol. Les maxima ont tous la même valeur, atteignent l'ordre de 3.

4-7 Profil de Sol Multicouches

4--1Présentation de la méthode de THOMSON HASKELL

Cette méthode consiste à introduire un vecteur \underline{S}_n ayant pour composantes toutes les quantités scalaires qui figurent dans les conditions de continuité (composantes de \underline{u} et $\underline{\sigma}$) qui s'exercent sur la frontière d'une couche [10].

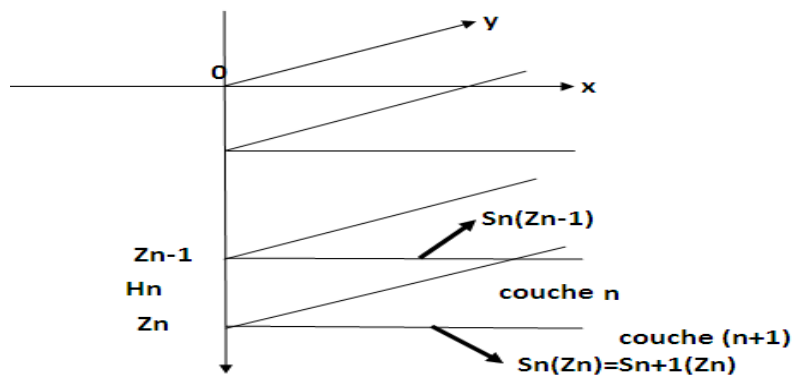


Figure 4-6 Milieu Stratifié

Soit \underline{S}_n le vecteur correspondant à la couche de rang n

En passant du sommet de la couche $n(z = z_{n-1})$ au sommet de la couche $n + 1 (z = z_n)$, on obtient pour le vecteur \underline{S}_n et \underline{S}_{n+1} une relation linéaire défini par la matrice de transfert G_n tel que :

$$\underline{S}_{n+1}(z_n) = G_n \underline{S}_n(z_{n-1}) \tag{4.21}$$

Posant $H_n = z_n - z_{n-1}$

Le déplacement suivant y résulte de la superposition de deux ondes

- L'une qui se propage vers le haut :

$$u'' = A \left(i \frac{\omega}{V_s} (V_s t - x \sin \alpha + z \cos \alpha) \right) \tag{4.22}$$

L'autre qui se propage vers le bas :

$$u' = B \left(i \frac{\omega}{V_s} (V_s t - x \sin \alpha - z \cos \alpha) \right) \tag{4.23}$$

En posant $P = \frac{\omega \sin \alpha}{V_s}$ et $s = \frac{\omega \cos \alpha}{V_s}$

Les deux équations du déplacement deviennent :

$$\begin{aligned} u'' &= A \exp(i(\omega t - Px + sz)) \\ u' &= B \exp(i(\omega t - Px - sz)) \end{aligned} \tag{4.24}$$

Le vecteur \underline{S}_n à la profondeur z_{n-1} s'écrit :

$$\underline{S}_n(z_{n-1}) = \begin{cases} u_n \\ \mu_n \frac{\partial u_n}{\partial z} \end{cases} = \begin{cases} u_n'' + u_n' \\ i\mu_n s_n (u_n'' - u_n') \end{cases} \tag{4.25}$$

Avec μ_n : le module de rigidité de la couche de rang n.

1-Etude de la continuité des déplacements à l'interface $z = z_n$

Dans la couche (n), le déplacement est donné par :

$$\begin{aligned} u_n &= u_n'' + u_n' \\ \text{Avec : } u_n'' &= A \exp(i(\omega t - P_n x + s_n z)) \\ u_n' &= B \exp(i(\omega t - P_n x - s_n z)) \end{aligned}$$

Ou :

$$\begin{aligned} u_n'' &= A \exp(i(\omega t - P_n x + s_n(z_{n-1} + H_n))) = u_n''(z_{n-1}) \exp(is_n H_n) \\ u_n' &= B \exp(i(\omega t - P_n x - s_n(z_{n-1} + H_n))) = u_n'(z_{n-1}) \exp(-is_n H_n) \end{aligned} \tag{4.26}$$

Dans la couche(n + 1), le déplacement est donnée par :

$$u_{n+1} = u_{n+1}'' + u_{n+1}'$$

La continuité de déplacement à l'interface $z = z_n$ nous impose la condition suivante :

$$u_{n+1} = u_n$$

Où on sépare la partie réelle et la partie imaginaire et on trouve :

$$u_{n+1} = u_{n+1}'' + u_{n+1}' = (u_n'' + u_n') \cos(s_n H_n) + i(u_n'' - u_n') \sin(s_n H_n) \tag{4.27}$$

2-Etude de la continuité des contraintes à l'interface $z = z_n$

Dans la couche (n, l'expression de la contrainte est donnée par :

$$i\mu_n s_n (u_n'' \exp(is_n H_n) - u_n' \exp(-is_n H_n)) \quad (4.28)$$

Dans la couche (n+1), la contrainte est donnée par :

$$\mu_{n+1} \frac{\partial \mu_{n+1}}{\partial z} = i\mu_{n+1} s_{n+1} (u_{n+1}'' - u_{n+1}') \quad (4.29)$$

La condition de continuité des contraintes à l'interface $z = z_n$ s'exprime par :

$$\begin{aligned} \mu_{n+1} \frac{\partial \mu_{n+1}}{\partial z} &= i\mu_{n+1} s_{n+1} (u_{n+1}'' - u_{n+1}') \\ &= i\mu_n s_n (u_n'' \exp(is_n H_n) - u_n' \exp(-is_n H_n)) \end{aligned} \quad (3.30)$$

En séparant les parties réelle et imaginaire de l'expression :

$$i\mu_{n+1} s_{n+1} (u_{n+1}'' - u_{n+1}') = \mu_n s_n [(u_n'' - u_n') \cos(s_n H_n) + i(u_n'' + u_n') \sin(s_n H_n)] \quad (4.31)$$

La matrice de transfert :

$$G_n = \begin{bmatrix} \cos(s_n H_n) & i(\mu_n s_n)^{-1} \sin(s_n H_n) \\ i\mu_n s_n \sin(s_n H_n) & \cos(s_n H_n) \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Pour une couche d'ordre n avec une épaisseur infinie et $i=1$ et le rang de la couche à la surface libre on obtient :

$$\begin{vmatrix} u_n' + u_n'' \\ \mu_n s_n (u_n' - u_n'') \end{vmatrix} = G_{n-1} \times G_{n-2} \times \dots \times G_1 \quad * \begin{vmatrix} u_1 \\ 0 \end{vmatrix} \quad (4.33)$$

Et soit A est le produit matriciel G_i

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = G_{n-1} \times G_{n-2} \times \dots \times G_1 \quad (4.34)$$

4-3-2 Expression de la fonction de transfert entre la surface libre et un point du profil de sol

La fonction d'amplification entre la surface libre ($i=1$) et un point localisé sur une couche du demi espace ($i=n$)

$$- a_{21} \frac{u_1}{\mu_n s_n} = -u'_n + u''_n \tag{4.35}$$

Ce qui nous donne

$$H_{(1,n)}(\omega) = \left| \frac{u_1}{2u''_n} \right| = \frac{1}{\left| \left(a_{11} - a_{21} \frac{1}{\mu_n s_n} \right) \right|} \tag{4.36}$$

Cette fonction dépend des propriétés du semi espace.

Exemple de calcul de fonction de transfert avec la méthode de THOMSON HASKELL

Considérons une couche de sol élastique d'épaisseur $h = 150$, $V_s = 750 \text{ m/s}$, $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$, surmontant sur un semi espace ($V_s = 1500 \text{ m/s}$, $\rho = 3000 \text{ kg/m}^3$), l'angle d'incidence est pris nul.

La fonction de transfert est donnée par :

$$H_{(1,2)}(\omega) = \left| \frac{u_1}{2u''_2} \right| = \frac{1}{\left| \left(a_{11} - a_{21} \frac{1}{\mu_2 s_2} \right) \right|} \tag{4.36. a}$$

$$H_{(1,2)}(\omega) = \frac{1}{\left| \cos(s_1 H) - i \frac{\mu_1 s_1}{\mu_2 s_2} \sin(s_1 H) \right|} \tag{4.36. b}$$

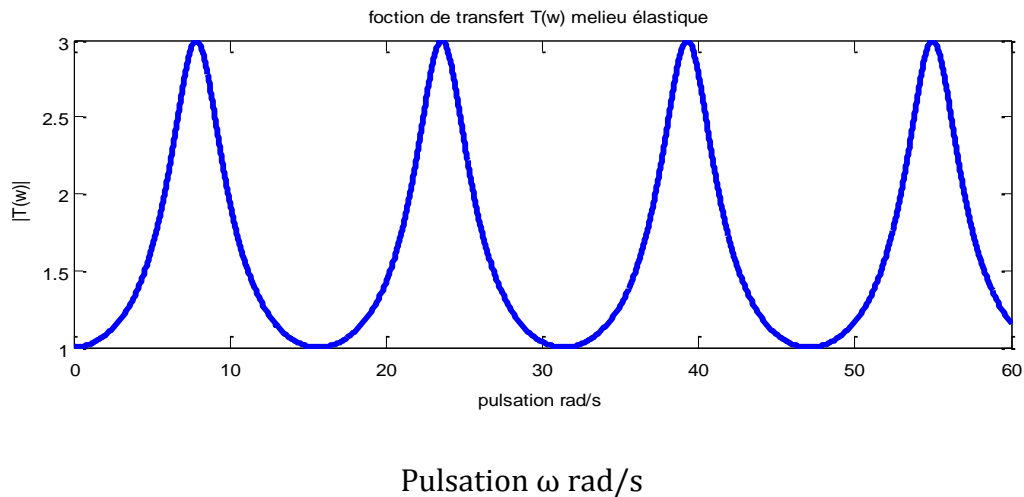


Figure 4-7 Fonction de transfert avec la méthode de HASKELL

La figure (4-7) donne un même résultat que l'exemple précédant (Figure (4.5)). Elle représente l'amplitude de la fonction de transfert qui prend des pics successifs caractérisant les modes de vibration de la couche de sol. Les maximas ont tous la même valeur de l'ordre de 3.

4.4 Calcul de la fonction de transfert dans un milieu viscoélastique

4.1 Milieu viscoélastique

Dans les milieux viscoélastiques, les courbes contraintes-déformation sont liées linéairement, la vitesse de déformation jouant un rôle important. Elle agit sur les relations de déformation viscoélastique et s'exprime par des modules complexes, les parties réelles représentent le comportement purement élastique et les parties imaginaires correspondent au comportement inélastique.

Une partie d'énergie se transforme en chaleur par l'effet de frottement interne, et la fonction interne de solide s'exprime par la relation suivant :

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2\pi}{Q} \tag{4.37}$$

E : énergie totale emmagasinée dans le solide.

Q : est le facteur de qualité.

Dans le cas où on l'on ne considère que l'atténuation spatiale

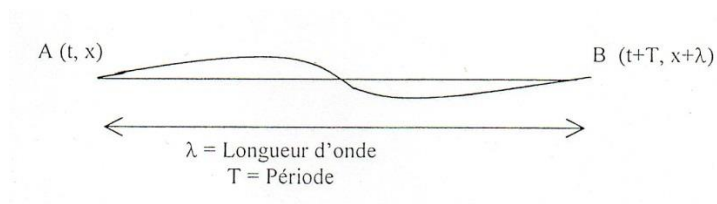


Figure 4-8 Atténuation Spatiale

L'expression de déplacement est donnée par :

$$u = u_0 e^{-\xi x} e^{i(kx - \omega t)} \tag{4.38}$$

ξ : Taux d'amortissement et λ : La longueur d'onde

La variation relative de l'énergie entre le point A et le point B s'écrit :

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{E - E'}{E} = 1 - e^{-2\xi\lambda} \quad (4.39)$$

Par le développement limité on obtient :

$$\xi = \frac{\omega}{2QV} \quad (4.40)$$

D'où le déplacement s'écrit sous la forme

$$u = u_0 e^{i(\bar{k}x - \omega t)} \quad (4.41)$$

Par analogie au cas non amorti, \bar{k} , vecteur d'onde complexe, \bar{V} : la vitesse complexe et Q le facteur de qualité :

$$\bar{k} = k + i\xi \quad (4.42)$$

$$\bar{V} = \frac{\omega}{\bar{k}} = \frac{\omega}{k + i\xi} \quad (4.43)$$

$$Q = \frac{\omega}{2V\xi} \quad (4.44)$$

Pour les ondes de cisaillement :

$$Q = \frac{V_s}{2V_s^*} \quad (4.45)$$

4.4.2 Fonction de transfert dans un milieu viscoélastique

L'amortissement est une grandeur fondamentale dans l'étude des phénomènes vibratoires en particulier au voisinage de la résonance. Il permet à un système physique, mis en vibration à une fréquence égale à sa fréquence de résonance, de maintenir une amplitude de déplacement limitée

En complétant la fonction d'amplification par l'effet d'amortissement, on introduit un module de cisaillement complexe de la forme :

$$G^* = G(1 + 2iD) \quad (4.45)$$

Où : D désigne le coefficient d'amortissement de la couche du sol considérée, il est exprimé en fonction du facteur de qualité Q_s :

$$D = \frac{1}{2Q_s} \quad (4.46)$$

Les équations donnant la fonction d'amplification relative à un cas amorti s'obtiennent à partir des équations précédemment établies pour un cas non amorti, en remplaçant le module de cisaillement réel par un autre complexe V_s à $V_s(1 - 2iD)$

4.4.2.1 Application

On prend un profil de sol monocouches dont les caractéristiques sont :

$$V_S = 750\text{m/s}, V_R = 1500\text{m/s}, \rho_S = 2\text{g/cm}^3, \rho_R = 3\text{g/cm}^3, h = 150\text{m} \text{ et } Q = 30$$

La fonction de transfert à la même écriture formelle que celle de l'élasticité linéaire mais en remplaçant V_S par V_S^* et en utilisant le modèle de Pecker [3].

On obtient :

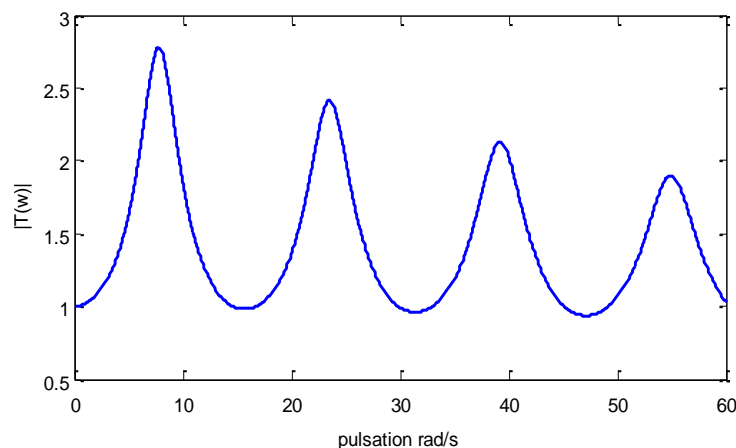


Figure 4-9 Fonction de transfert milieu viscoélastique

4.4.2.2 Cas de sol multicouches (méthode de THOMSON HASKELL)

On utilise les mêmes données que l'exemple précédent.

Avec la méthode de HASKELL s^* représente le vecteur d'onde en milieu viscoélastique :

$$s_1^* = \frac{\omega}{V_s^*} = \frac{\omega}{V_s(1-i\xi)}$$

$$H_{(1,2)}(\omega) = \frac{1}{\left| \cos(s_1^* h) - i \frac{\mu_1 s_1^*}{\mu_2 s_2} \sin(s_1^* h) \right|}$$

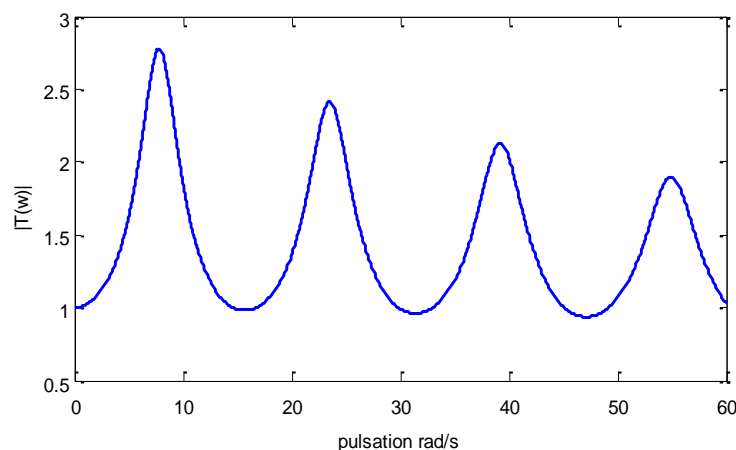


Figure 4-10 Fonction de transfert dans un milieu viscoélastique

La figure (4-9) et La figure (4-10) montrent que les amplitudes de la fonction de transfert $|H|$ diminuent lorsque les fréquences augmentent. Les amplitudes maximales sont inférieures à celles de la même fonction pour un amortissement nul. L'amplitude maximale se situe à la fréquence de 7.43Hz. Cette fréquence correspond à la fréquence fondamentale de vibration du sol.

4-5 Exemple de calcul de la réponse sismique d'un profil de sol soumis à une onde SH (le modèle élastique et viscoélastique)

On considère une couche de sol surmontant un substratum du côté droit (B) et un affleurement rocheux du côté gauche (A) Figure 4-11.

Du côté droit (B), les ondes incidentes SH se propagent verticalement vers le haut à partir du rocher, traversant une couche de sol, qui servira de filtre.

Du côté gauche (A), le même mouvement issu de la roche atteignant la surface libre sans aucune modification.

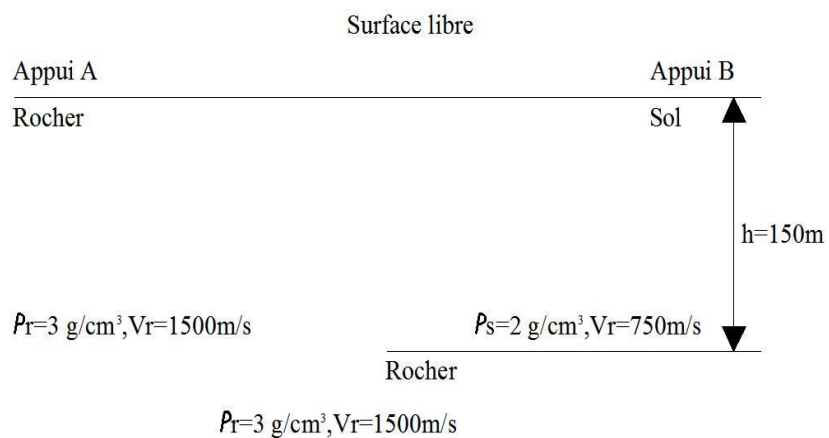


Figure 4-11 Caractéristiques du profil de sol

Remarque

La réponse à la surface libre du sol, soumise à sa base à un signal d'entrée estimé selon le modèle KANAI- TAJIMI modifié par CLOUGH ET PENZIEN. [Voir chapitre 5]

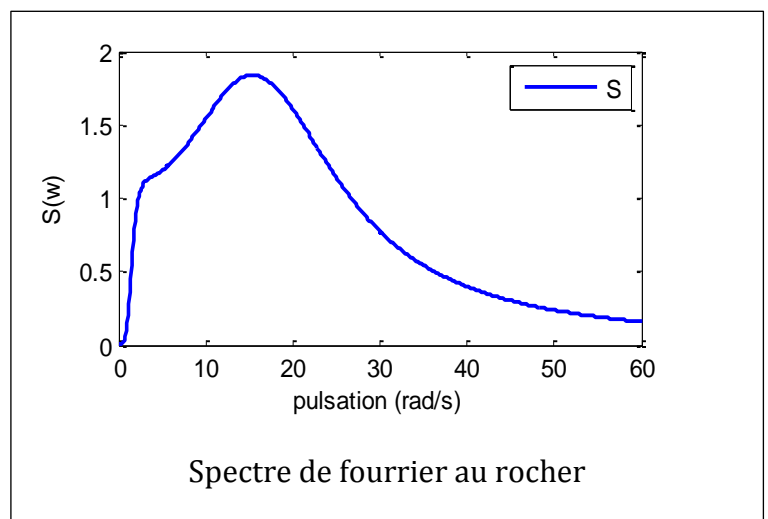
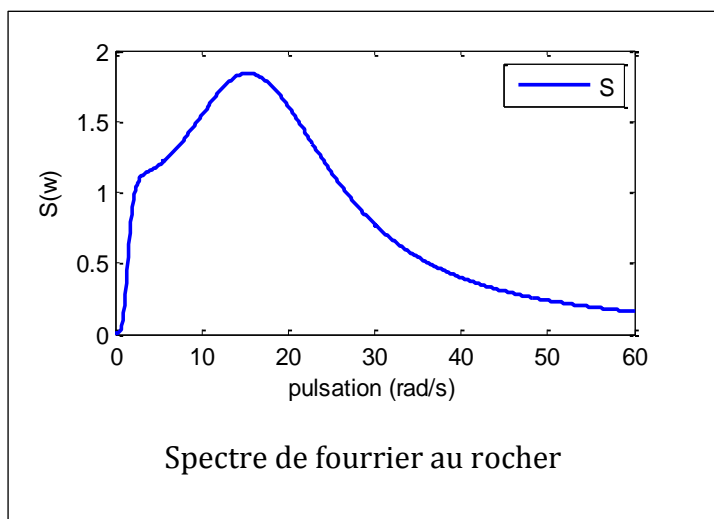
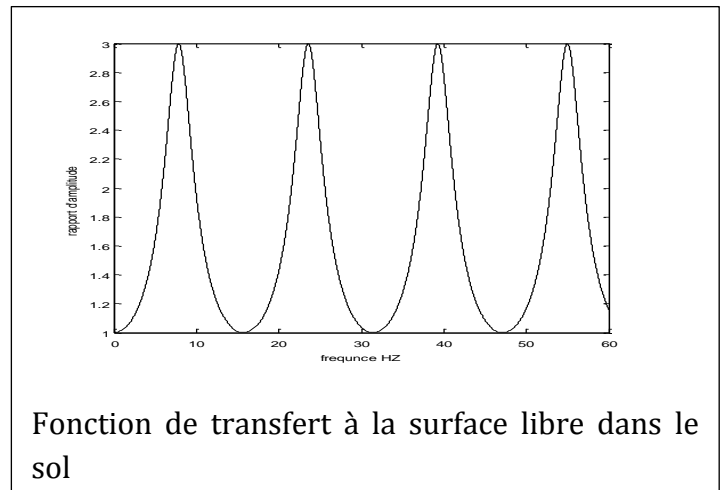
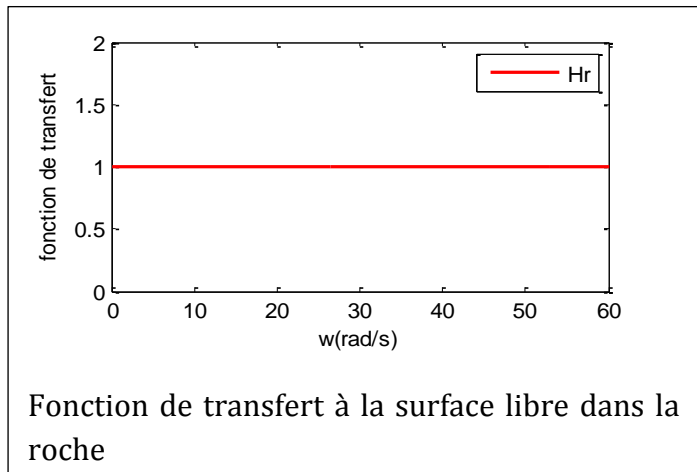
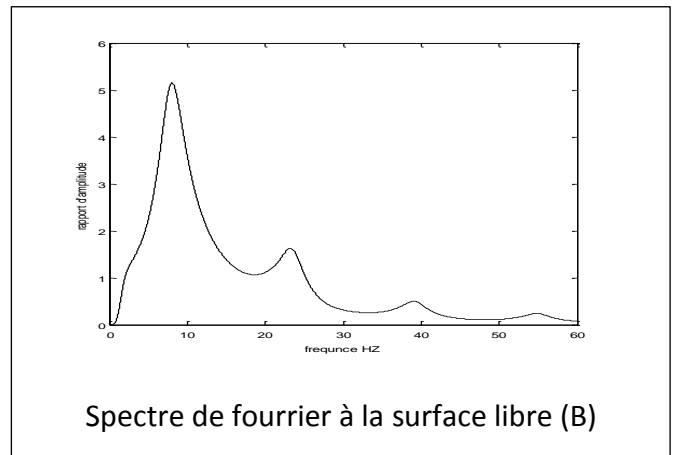
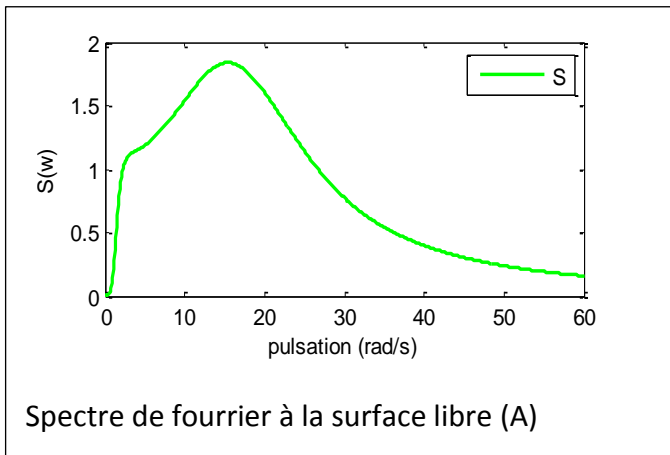
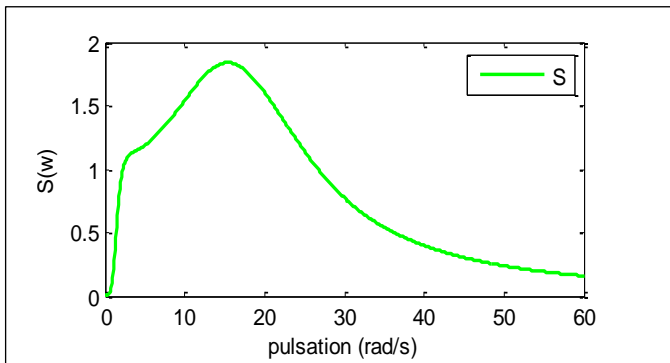
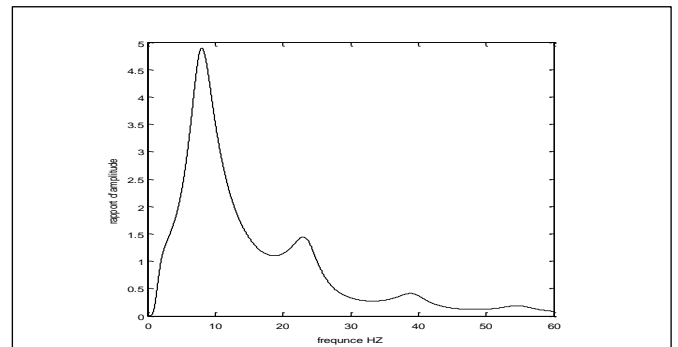


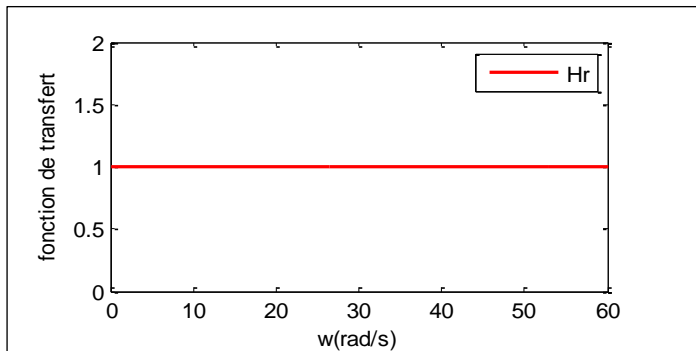
Figure 4-12 Réponses sismiques d'un profil de sol, utilisant la loi de comportement élastique linéaire



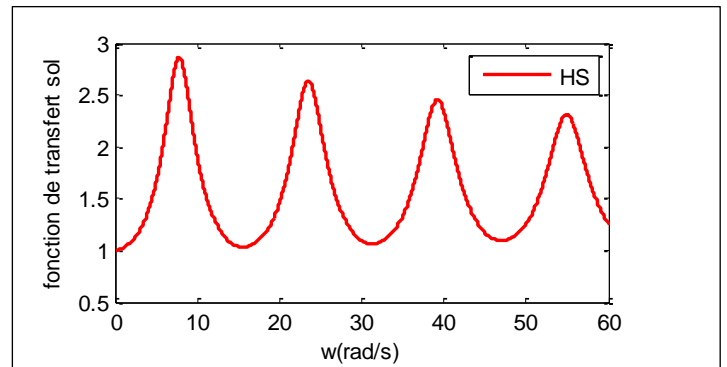
Spectre de fourrier à la surface libre (A)



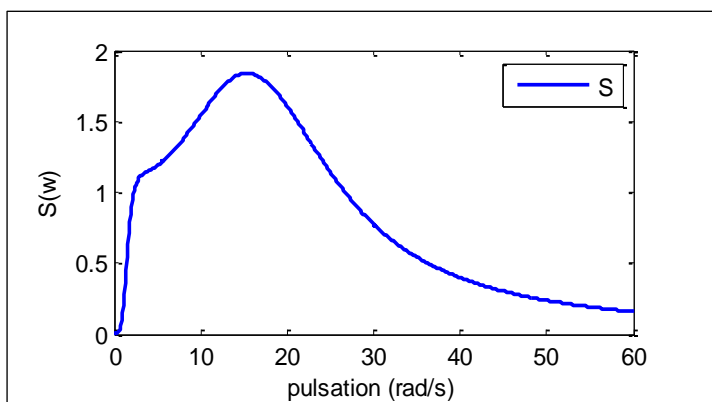
Spectre de fourrier à la surface libre (B)



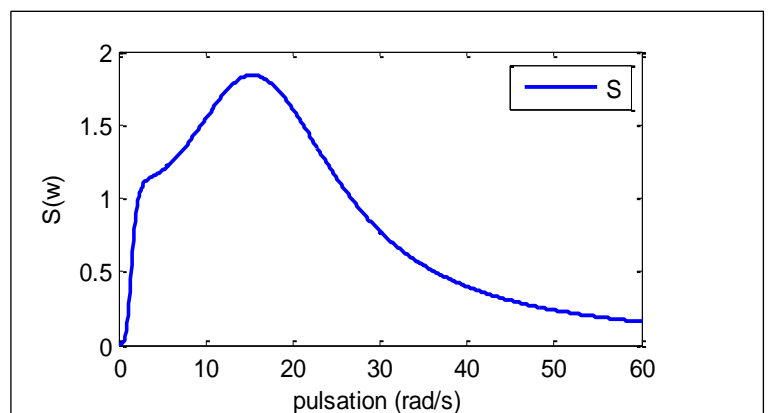
Fonction de transfert à la surface libre dans la roche



Fonction de transfert à la surface libre dans le sol



Spectre de fourrier au rocher



Spectre de fourrier au rocher

Figure 4-13 réponses sismiques d'un profil de sol, avec la loi de comportement viscoélastique linéaire avec $Q=30$

4.5 Conclusion

Lorsque que la fonction de transfert est déterminée, par conséquence la connaissance de réponse du sol en champ libre en découle.

La réponse temporelle spécifique au mouvement du substratum rocheux peut être facilement obtenue en utilisant l'analyse de Fourier

CHAPITRE 5 SPECTRE DE REPONSE SPATIALE ET EFFETS D'AMPLIFICATION

5.1 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** [13] 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**)[14], ainsi que la fonction de cohérence spatiale de Der **Kiureghian** [15], sont intégrés en appliquant une formulation en vibrations aléatoires

5.1 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 [16]:

- 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

Chapitre 5 Spectre de Réponse Spatiale et Effet D'amplification

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 γ_{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 .

$$\gamma_{AB} = \frac{S_{AB}}{\sqrt{S_A S_B}} \quad (5.1)$$

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.

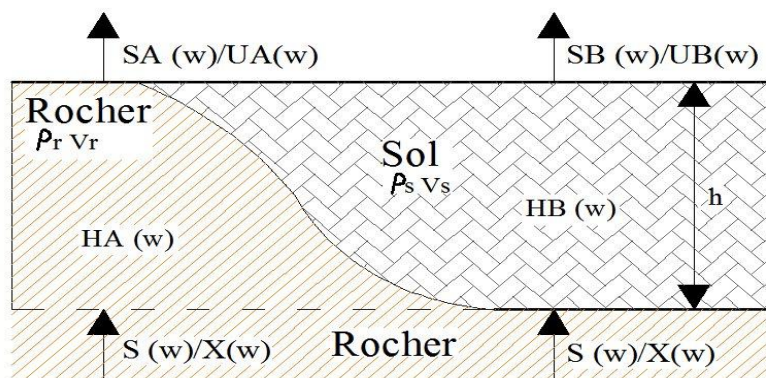


Figure. 5.1: Transformation du mouvement du substratum à la surface pour une couche de sol (côté droit) et un affleurement rocheux (côté gauche)

5.2 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** (ω).

$$S(\omega) = \frac{\omega_g^4 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2} S_0 \quad (5.6)$$

$\begin{cases} \omega_g \\ \xi_g \end{cases}$: 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 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 : 2π à $6\pi \text{ rad/s}$.

Pour ξ_g : 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 :

$$S(\omega) = \frac{(\omega_g^4 + (2\xi_g\omega_g\omega)^2)\omega^4}{((\omega_g^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_g\omega_g\omega)^2)((\omega_b^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_b\omega_b\omega)^2)} S_0 \quad (5.7)$$

Dans laquelle $\omega_b=1.636$ et $\xi_b=0.619$ sont des constantes proposés par **CLOUGH** et **PENZIEN** [17]

5.3 Modèle de DER KIUREGHIAN [15]

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.

$$\gamma_{AB}(\omega) = \gamma_{AB}^{(i)}(\omega)\gamma_{AB}^{(w)}(\omega)\gamma_{AB}^{(S)}(\omega) \quad (5.2)$$

$$\gamma_{AB}(\omega) = \gamma_{AB}^{(i)} \exp[i(\theta_{AB}^{(w)}(\omega) + \theta_{AB}^{(S)}(\omega))] \quad (5.3)$$

Chapitre 5 Spectre de Réponse Spatiale et Effet D'amplification

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 $S_{AB}^{(r)}(\omega)$.

$$S_{AB}^{(r)}(\omega) = H_A(\omega) \cdot H_B^*(\omega) S_{AB}^{(b)}(\omega) \quad (5.4)$$

$H_B^*(\omega)$ 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 :

$$S_{AA}^{(r)}(\omega) = |H_A|^2 \cdot S_{AA}^{(b)}(\omega), \quad S_{BB}^{(r)}(\omega) = |H_B|^2 \cdot S_{BB}^{(b)}(\omega) \quad (5.5)$$

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

$$\gamma_{AB} = \gamma_{AB}^{(S)}(\omega) = \exp\left(i\theta_{AB}^{(S)}(\omega)\right) \quad (5.6)$$

Avec la différence de phase $\theta_{AB}^{(S)}$ donnée par :

$$\theta_{AB}^{(S)} = \tan^{-1} \frac{\text{Im} \left[\frac{H_A(\omega) \cdot H_B^*(\omega)}{H_A(\omega) \cdot H_B^*(\omega)} \right]}{\text{Re} \left[\frac{H_A(\omega) \cdot H_B^*(\omega)}{H_A(\omega) \cdot H_B^*(\omega)} \right]} \quad (5.7)$$

- 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.5.1.

- $\tau_s = \frac{h}{V_s}$ 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** [18]

$$r = \frac{\rho_R V_R - \rho_S V_S}{\rho_R V_R + \rho_S V_S} \quad (5.8)$$

Les fonctions de transfert prennent la forme suivant :

$$H_A(\omega) = \exp\left(-\frac{i\omega h}{V_R}\right) \quad (5.11)$$

$$H_B(\omega) = \exp\left(-\frac{i\omega h}{V_S}\right) / \left| \cos(S_1 H) - i \frac{\mu_1 S_1}{\mu_2 S_2} \sin(S_1 H) \right| \quad (5.12)$$

➤ Propagation d'ondes avec atténuation:

Une méthode approximative a été a proposé [13] 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:

$$r^* = \frac{\rho_R V_R - \rho_S V_S^*}{\rho_R V_R + \rho_S V_S^*} \quad (5.9)$$

- temps de propagation complexe dans le sol est défini :

$$\tau^* = \frac{h}{V_S^*} = h / V_S(1 - i\xi) \quad (5.10)$$

Les fonctions de transfert prennent la forme suivante

$$H_A(\omega) = \exp\left(-\frac{i\omega h}{V_R}\right) \quad (5.11)$$

$$H_B(\omega) = \exp\left(-\frac{i\omega h}{V_S^*}\right) / \left| \cos(S_1^* H) - i \frac{\mu_1 S_1^*}{\mu_2 S_2} \sin(S_1^* H) \right| \quad (5.12)$$

5.4 Variation de la fonction de transfert avec τ , Q et r

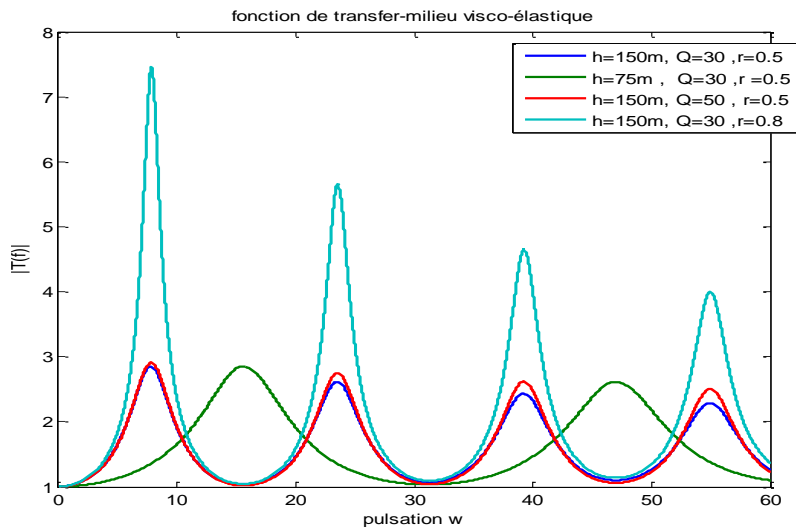


Fig. 5.2: Variation de la fonction de transfert avec τ , Q et r

Le coefficient de réflexion (r) et le déphasage temporel τ 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.

5. 5 REPONSE DE L'OSCILLATEUR A L'EXCITATION VARIANT SPATIALEMENT

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 :

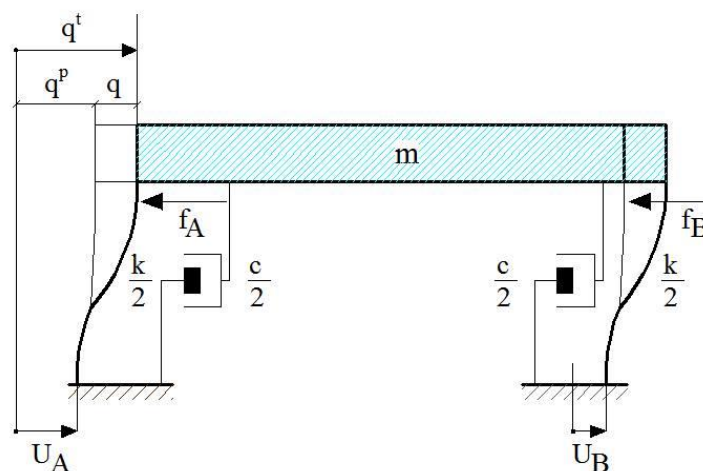


Figure. 5.3: Système dynamique 1ddl

L'équation du mouvement pour l'oscillateur simple :

$$\ddot{q} + 2\xi\omega_0\dot{q} + \omega_0^2q = -\frac{1}{2}[\ddot{u}_A(t) + \ddot{u}_B(t)] \quad (5.8)$$

Avec :

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

$\xi = c/2m\omega_0$ Est le coefficient d'amortissement.

Le déplacement total égal est à la somme du déplacement pseudo-statique q^P et dynamique q c à d :

$$q^t = q^P + q \quad (5.8)$$

$$\text{Avec: } q^P = \frac{u_A + u_B}{2} \quad (5.9)$$

Les forces de cisaillement dans les colonnes :

$$f_A(t) = \frac{k}{2}(q^t - u_A) = \frac{k}{2}\left(\frac{u_B(t)}{2} - \frac{u_A(t)}{2} + q(t)\right) \quad (5.10)$$

$$f_B(t) = \frac{k}{2}(q^t - u_B) = \frac{k}{2}\left(\frac{u_A(t)}{2} - \frac{u_B(t)}{2} + q(t)\right) \quad (5.11)$$

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. (5.8), (5.10) et (5.11) peuvent être formulées dans le domaine fréquentiel de la manière suivant []

$$q(t) = -\frac{1}{2} \int_{+\infty}^{-\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\ddot{u}_A(\omega) - \frac{1}{2} \int_{+\infty}^{-\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\ddot{u}_B(\omega) \quad (5.12)$$

Telle que :

$$d\ddot{u}_A(\omega) = \ddot{u}_A(\omega) d\omega \quad \text{et} \quad d\ddot{u}_B(\omega) = \ddot{u}_B(\omega) d\omega \quad (5.13)$$

Alors

$$q(t) = -\frac{1}{2} \int_{+\infty}^{-\infty} H(\omega) \ddot{u}_A(\omega) e^{i\omega t} d\omega - \frac{1}{2} \int_{+\infty}^{-\infty} H(\omega) \ddot{u}_B(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (5.14)$$

Et

$$\begin{aligned} f_A(t) = \frac{k}{4} & \left(\int_{+\infty}^{-\infty} e^{i\omega t} d\ddot{u}_B(\omega) - \int_{+\infty}^{-\infty} e^{i\omega t} d\ddot{u}_A(\omega) \right. \\ & \left. - \int_{+\infty}^{-\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\ddot{u}_A(\omega) - \int_{+\infty}^{-\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\ddot{u}_B(\omega) \right) \end{aligned} \quad (5.15)$$

Et

$$\begin{aligned} f_B(t) = \frac{k}{4} & \left(\int_{+\infty}^{-\infty} e^{i\omega t} d\ddot{u}_A(\omega) - \int_{+\infty}^{-\infty} e^{i\omega t} d\ddot{u}_B(\omega) \right. \\ & \left. - \int_{+\infty}^{-\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\ddot{u}_A(\omega) - \int_{+\infty}^{-\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\ddot{u}_B(\omega) \right) \end{aligned} \quad (5.16)$$

Alors

$$f_A(\omega) = u_B(\omega) - u_A(\omega) - H(\omega) \cdot \ddot{u}_A(\omega) - H(\omega) \cdot \ddot{u}_B(\omega) \quad (5.17)$$

$$f_B(\omega) = u_A(\omega) - u_B(\omega) - H(\omega) \cdot \ddot{u}_A(\omega) - H(\omega) \cdot \ddot{u}_B(\omega) \quad (5.18)$$

5.5 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 (voir chapitre 3) donc :

A partir l'équation (5.16) on pose :

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

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

$$\leftrightarrow q(\omega) = -\frac{H(\omega)\ddot{u}_A(\omega)}{2} - \frac{H(\omega)\ddot{u}_B(\omega)}{2} \quad (5.19)$$

$$\leftrightarrow S_q(\omega) = q^*(\omega) \cdot q(\omega) \quad (5.20)$$

$$S_q(\omega) = \frac{|H|^2}{4} (S_A + S_B + S_{AB} + S_{AB}^*) \quad (5.21)$$

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

$$S_q(\omega) = \frac{|H|^2}{2} \left(\frac{|H|_A^2 + |H|_B^2}{2} + \text{Re}\gamma_{AB} \cdot H_A \cdot H_B \right) \cdot S \quad (5.22)$$

$H(\omega) = -(\omega_0^2 - \omega^2 + i2\xi\omega_0\omega)^{-1}$ 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.

Et pour les forces:

$$S_f(\omega) = f^*(\omega) \cdot f(\omega) \quad (5.23)$$

$$Sf_A^B(\omega) = (\pm(u_B^*(\omega) - u_A^*(\omega)) - H^*(\omega) \cdot \ddot{u}_A^*(\omega) - H^*(\omega) \cdot \ddot{u}_B^*(\omega)) \cdot (u_B(\omega) - u_A(\omega) - H(\omega) \cdot \ddot{u}_A(\omega) - H(\omega) \cdot \ddot{u}_B(\omega)) \quad (5.24)$$

Alors :

$$S_f(\omega, \omega_0) = \frac{k^2}{16} \left(\frac{1}{\omega^4} (S_A + S_B - S_{AB} - S_{AB}^*) + -S_{AB}^* \right) + \frac{1}{\omega^2} (H(\omega)(-S_A + S_B + S_{AB} - S_{AB}^*) + H(\omega)^* \cdot (-S_A + S_B - S_{AB} + S_{AB}^*)) + |H|^2 \cdot (S_A + S_B + S_{AB} + S_{AB}^*) \quad (5.25)$$

Les densités spectrales pour les forces f_A et f_B :

$$Sf_A^B(\omega_0, \omega) = \frac{k^2}{8} \left(\frac{1}{\omega^4} \cdot \left(\frac{|H_A|^2 + |H_B|^2}{2} - |H_A| \cdot |H_B| \text{Re}\gamma_{AB} \right) \right. \\ \left. \pm \frac{2}{\omega^2} \left(\frac{|H_A|^2 + |H_B|^2}{2} \text{Re}H + |H_A| |H_B| \text{Im}H \cdot \text{Im}\gamma_{AB} \right) \right. \\ \left. + |H|^2 \left(\frac{|H_A|^2 + |H_B|^2}{2} + |H_A| |H_B| \text{Re}\gamma_{AB} \right) \right) S \quad (5.26)$$

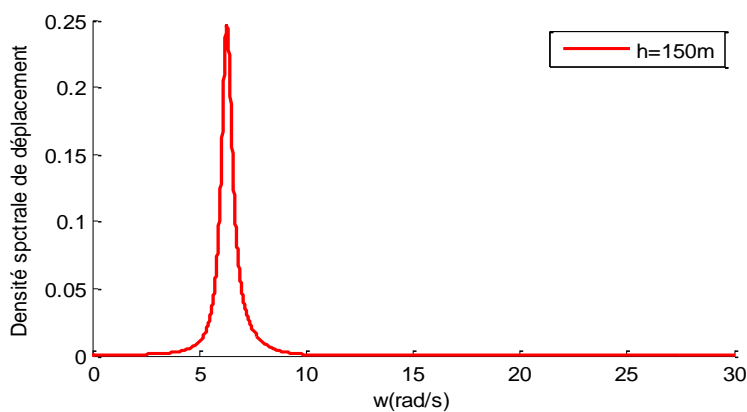
Application numérique : détermination des densités spectrales de déplacement et des forces

On considère le site (B) possédant les caractéristiques suivantes : $\xi_{sol} = 0.017$

$\rho_s = 2g/cm^2$, $V_s = 750m/s$ et $h=150m$.

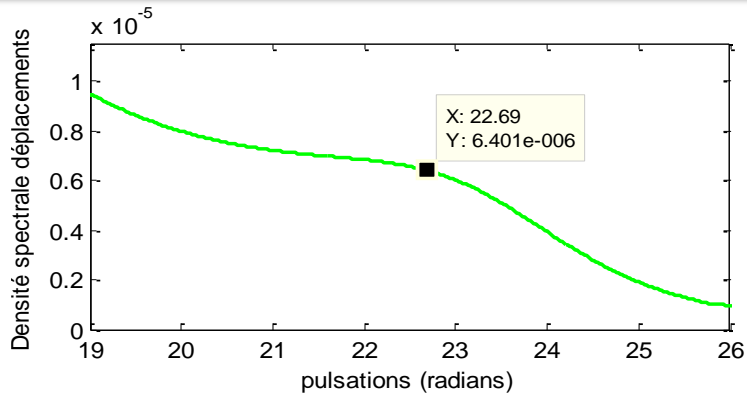
La figure (1(a)) : montre l'allure des densités spectrales des déplacements dynamiques et La figure (1(b)) montre l'allure des densités spectrales des forces f_A et f_B pour les valeurs des paramètres suivantes : $\omega_0 = 2\pi \text{ rad/s}$ et $\xi = 0.05$.

Les figures (1(a') et (b')) montrent les détails du 2^{ème} pic



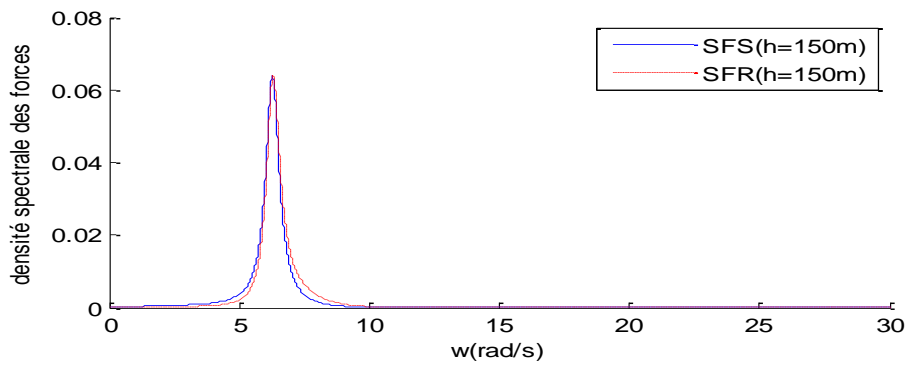
(a)

Chapitre 5 Spectre de Réponse Spatiale et Effet D'amplification

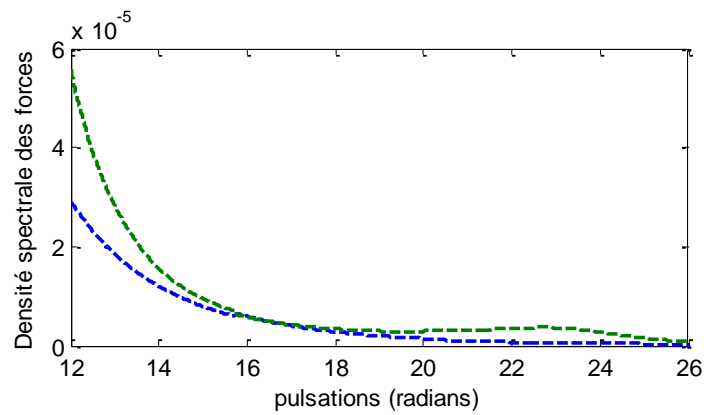


(a')

Figure 5-6 Densité spectrale de déplacement (a', a)



(b)



(b')

Figure 5-4: La densité spectrale : (b,b') : forces

$$\omega_0 = 2\pi \text{rad/s}, \xi = 0.05, \rho_r = 3 \text{g/cm}^2, V_r = 1500 \text{m/s}, \rho_s = 2 \text{g/cm}^2, V_s = 750 \text{m/s}$$

$$h = 150 \text{m}, r = 0.5, \xi_{sol} = 0.017$$

Figure (a1) : 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 $\omega_0 = 2\pi \text{ rad/s}$.

Figure (b1) : Pour les densités spectrales des forces f_A et f_B sont quasiment identiques et la différence est pratiquement négligeable.

Figures (1a', 1b') A $\omega = 23 \text{ rad/s}$ la présence d'un pic, ne peut pas être discerné dans la densité spectre de déplacement, et même pour les densités spectrales des forces ; il est détecté difficilement

5.6 Le 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).

$$\sigma^2(\omega_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega, \omega_0) d\omega \quad (5.27)$$

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:

$$\frac{\sigma}{\sigma_R} = \frac{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega, \omega_0) d\omega}}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} S_R(\omega, \omega_0) d\omega}} \quad (5.28)$$

$S(\omega, \omega_0)$ Représente la densité spectrale des déplacements et des forces dynamique.

$S_R(\omega, \omega_0)$ 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 va

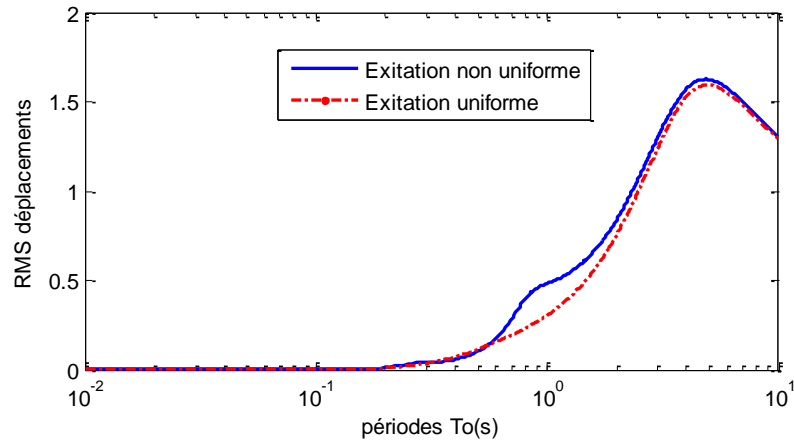


Figure 5-6 (a) RMS de déplacement

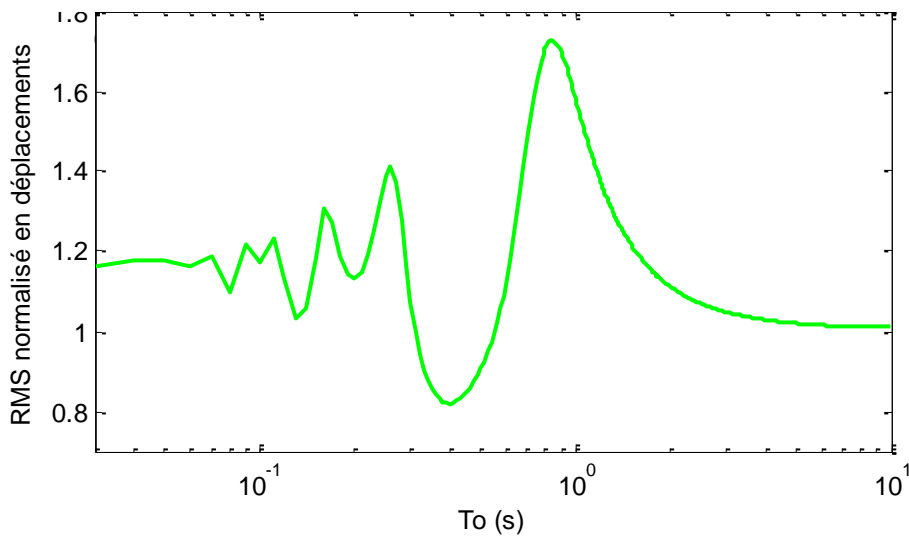


Figure 5-6 (b) RMS Normalisé de déplacement relatif

Figure (5-6a) : La figure 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 $t_0=4.53s$ puis diminue.

Chapitre 5 Spectre de Réponse Spatiale et Effet D'amplification

Figure (5-6b) 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)

L'écart type est également calculé pour les forces f_A et f_B dans les deux cas uniforme et non uniforme, montré dans la figure 6

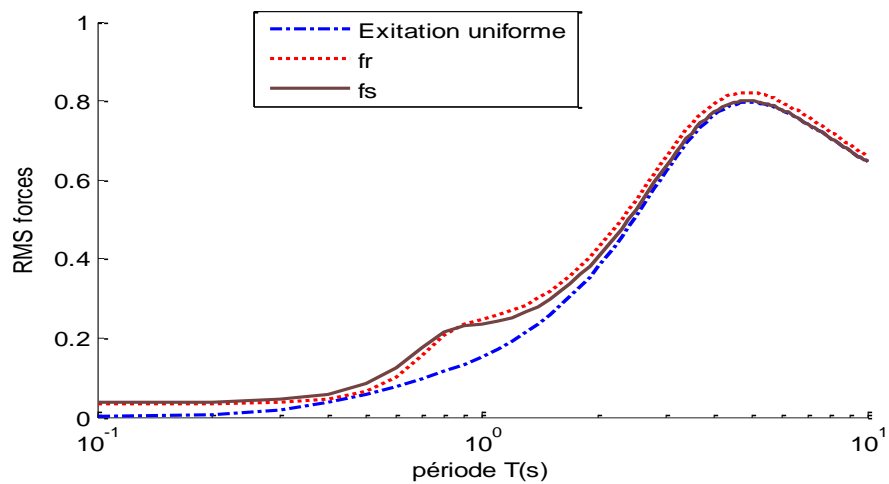


Figure 5.6-a RMS forces

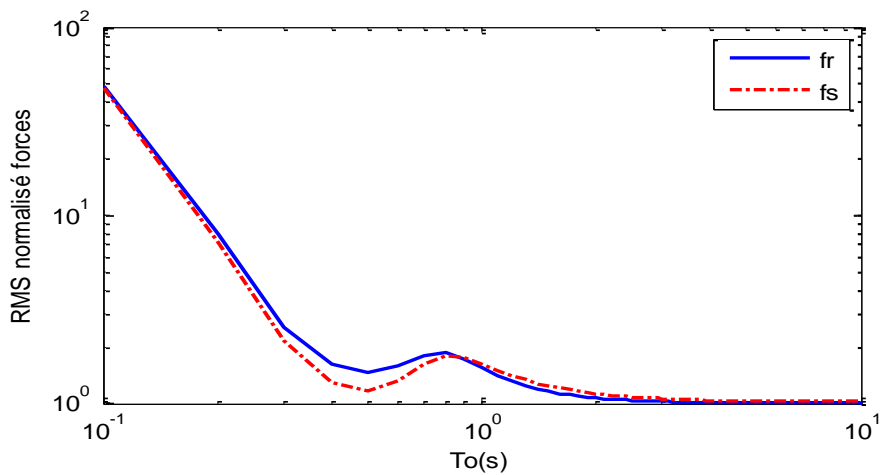


Figure 5.6-b : RMS forces Normalisés

Chapitre 5 Spectre de Réponse Spatiale et Effet D'amplification

Les RMS forces sont très importantes dans le cas où le site B est considéré non rocheux et précisément dans les structures rigides (T_0 faible) ceci est dû à la prédominance de l'effet pseudo-statique par rapport à l'effet dynamique

Ainsi les RMS normalisés des forces sont très importants dans la gamme de petites périodes.

5.7-Traitement d'ouvrage

L'exemple que nous allons traiter, considère un type de pont assez répandu, que ce soit en Europe ou bien en Algérie. Le pont comporte 3 travées, dont la longueur de la travée de rive est de 10m, et la centrale de 16m de longueur. Chaque pile est composée d'un fût de section 2.50×0.80 m, et de hauteur 5.50m. La figure -5.3 résume les principales caractéristiques du pont.

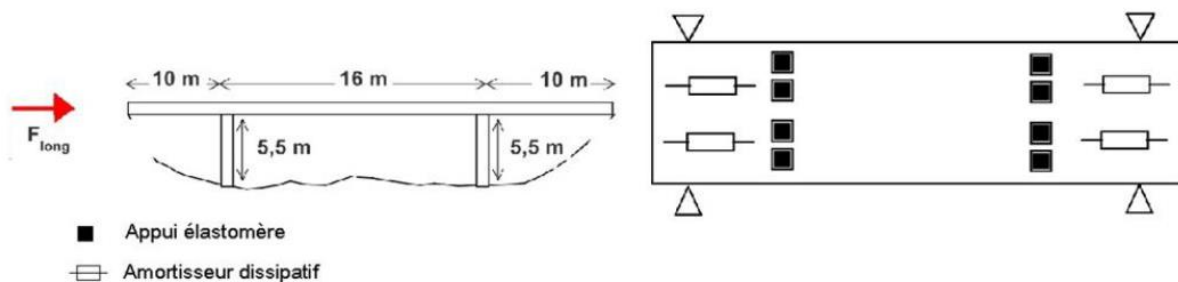


Figure 5-7 Représentation du pont

Masse tablier : $M_{tab} = 850t$

Raideur du système d'appui : $K_{appuis} = 23400KN/m$

$\omega_0 = 5.25rad/s$ Et $T_0 = 1.2 s$.

Pour étudier la densité spectrale de déplacement et de forces et aussi les RMS et le coefficient sismique on utilise le modèle de CLOUGH et PENZIEN au niveau de substratum avec $S_0 = 0.0063ft^2/sec^3$ ($S_0 = 0.0016m^2/sec^3$) [19] qu'on multiplie par 2.7 [le facteur de HOUSNER (El Centro 1940)].

5.7.1 Étude des densités spectrales de déplacements et les forces (l'ouvrage traiter)

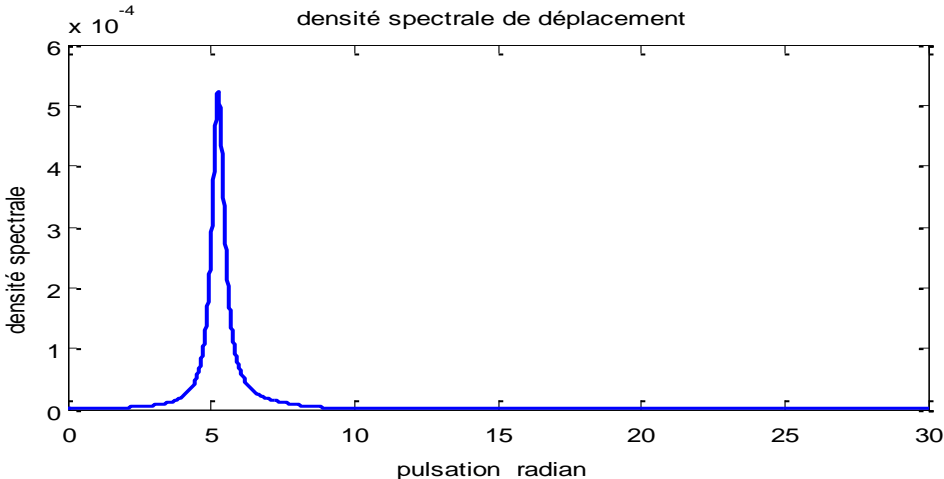


Figure 5.8 – (a) Densité spectrale de déplacement relatif

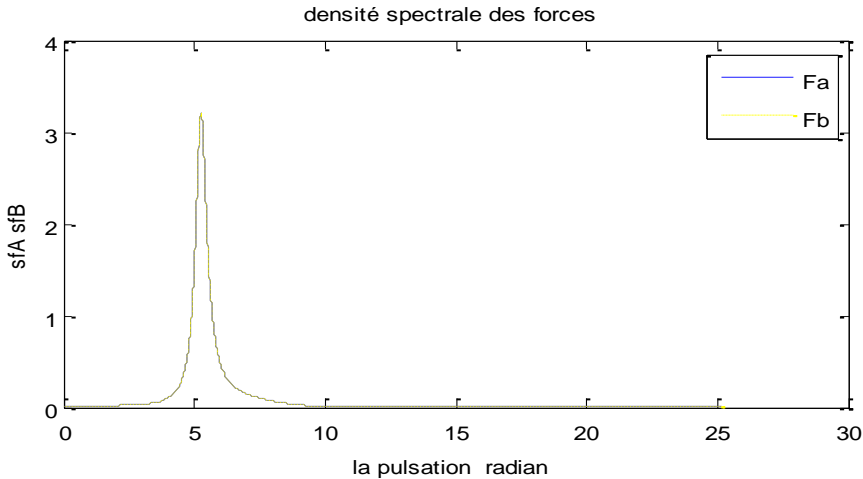


Figure 5.8 – (b) Densité spectrale des forces f_A et f_B

5.7.2 Étude des RMS de Déplacement Relatif et des Forces

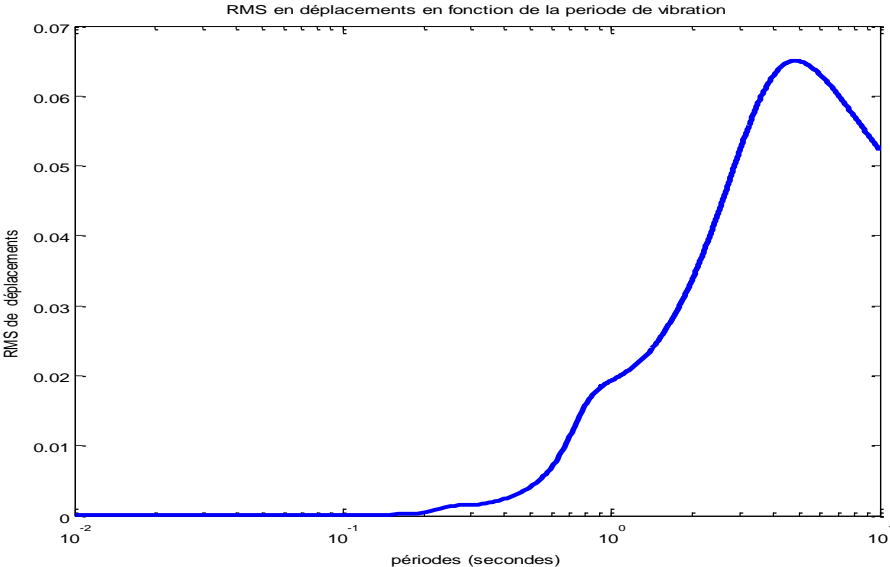


Figure 5.9 –(a) RMS de déplacement relatif

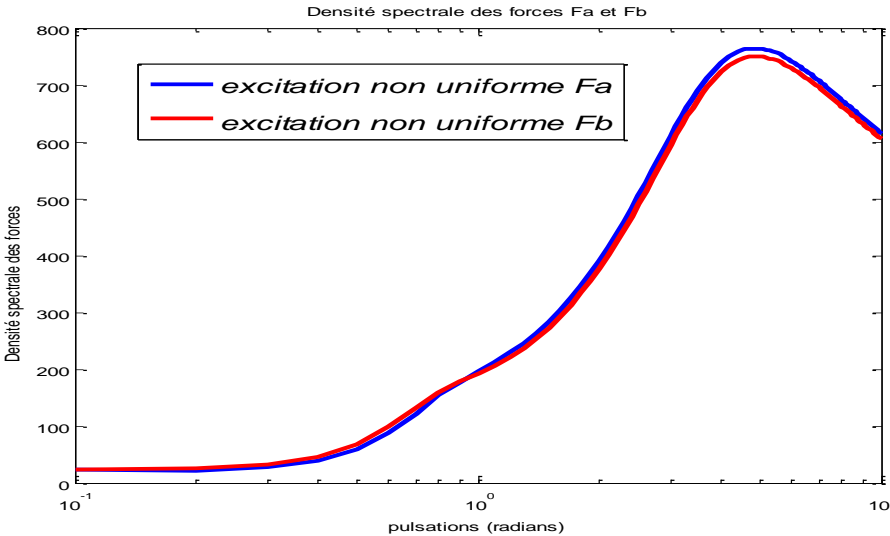


Figure 5.9 –(b) RMS des forces f_A et f_B

5.7.3 Estimation probabiliste de déplacement et des forces à partir le RMS

On peut estimer le déplacement de structure (exemple traité) avec la relation suivante :

$$q_{Tsm,P} = r_{s,P} \sigma_q(Tsm) \quad (5.29)$$

$r_{s,P}$ Représenté le facteur de pic

$\sigma_q(Tsm)$: RMS de déplacement

On a :

$$r_{s,P} = [2 \log(2n[1 - \exp(-\sigma_y(s)\sqrt{\pi} \log(2n))])]^{1/2} \quad (5.30)$$

$$n = \frac{\Omega_y(s)s_0}{2\pi} \left| \frac{1}{-\log(P)} \right| \quad (5.31)$$

$$s_0 = s \exp \left[-2 \left(\frac{\sigma_y^2(s)}{\sigma_y^2\left(\frac{s}{2}\right)} - 1 \right) \right] \quad (5.32)$$

$$\frac{\sigma_y^2(s)}{\sigma_y^2\left(\frac{s}{2}\right)} = \frac{1 - \exp(-2\xi\omega_n s)}{1 - \exp(-\xi\omega_n s)} \quad (5.33)$$

$$\sigma_y(s) = \sqrt{\frac{4\xi_s}{\pi}} \quad (5.34)$$

$$\xi_s = \frac{\xi}{1 - \exp(-2\xi\omega_n s)} \quad (5.35)$$

Avec :

p = la probabilité à ne pas dépasser

ξ Coefficient d'amortissement de structure

$$\Omega_y(s) = \omega_n$$

s_0 Durée de la réponse stationnaire équivalente

$\Omega_y(s)$ Masse spectrale de la réponse de la réponse $q(t)$.

$Tsm = s$: Durée de mouvement.

$\Omega =$ masse du l'enregistrement accelometrique .

Chapitre 5 Spectre de Réponse Spatiale et Effet D'amplification

δ Dispersion autour de la fréquence centrée de la DSP(de l'enregistrement accélérométrique (EL CENTRO)

On prend la composante accélérométrique EW enregistrée à la station 117 du réseau n^o=9 EL CENTRO lors de séisme d'Imperial Valley du 19 /05/1940 (04 :37) de magnitude $M_s = 7.2$

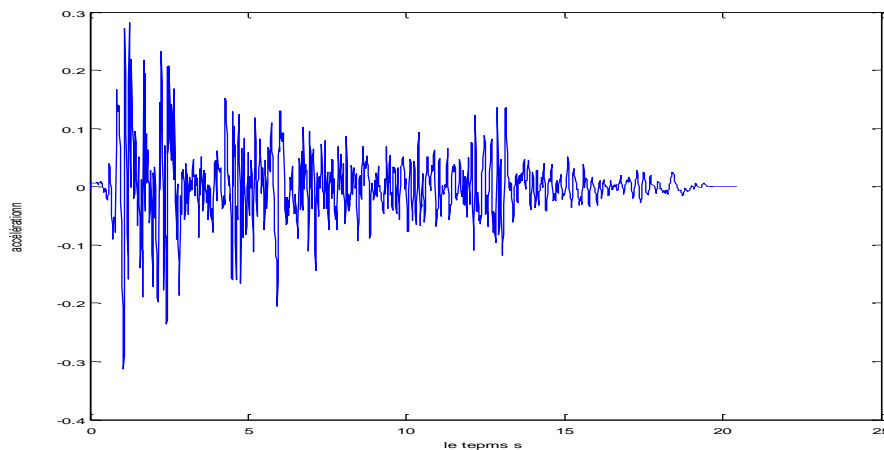


Figure5-10 : Accélérogramme d'EL CENTRO

- Pour une probabilité de 50 % on aura :

$$P = 0.5 \text{ et } \omega_n = 5.25 \text{ rad/s et } T_{sm} = 18.48 \text{ s}$$

$$\text{Alors } r_{s,P} = 2.53 \leftrightarrow \begin{cases} q(t) = 0.0533m \\ f_A = 556.03 \text{ kN et } f_B = 575.15 \text{ kN} \end{cases}$$

- Pour une probabilité de 90 % on aura

$$P = 0.9$$

$$\text{Alors } r_{s,P} = 3.38 \leftrightarrow \begin{cases} q(t) = 0.0719m \\ f_A = 742.803 \text{ kN et } f_B = 768.381 \text{ kN} \end{cases}$$

5.8 Conclusion

Le tremblement de terre est un processus aléatoire caractérisé par sa moyenne ($m=0$) et son écart type (σ), une fois le RMS calculé on peut déduire les déplacements et les forces d'une structure donnée qu'on ne peut pas dépasser pour une probabilité donnée soumise une excitation sismique.

CHAPITRE 6 ETUDE PARAMETRIQUE

6.1 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

6.2 Etude 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 V_s , de la roche V_R , les masses volumiques respectives ρ_s et ρ_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) $I_{R/s}$:

$$I_{R/s} = \frac{\rho_R V_R}{\rho_s V_s} \quad (6.1)$$

On prend les valeurs suivantes :

Pour le Rocher :

$$\rho_R = 3 \text{ g/cm}^2 \text{ et } V_R = 1500 \text{ m/s} .$$

Pour le sol :

$$\rho_s = 1.5 - 2 \text{ g/cm}^2 \quad , \quad V_s = 100 - 750 \text{ m/s} . \text{ Et } h = 50, 150 \text{ et } 500 \text{ m}$$

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 ξ_{sol} avec $Q = 1/(2\xi_{sol})$.

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

Remarque : Si on considère un les deux points (A et B) 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.

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

1. Pour commencer cette étude paramétrique, on va étudier l'effet de la hauteur de la couche de sol sur les densités spectrales du déplacement, de la force en (A) et en (B). On prendra les valeurs de l'exemple donné dans le chapitre 5, pour $h = 50\text{m}$, 150m et 500m

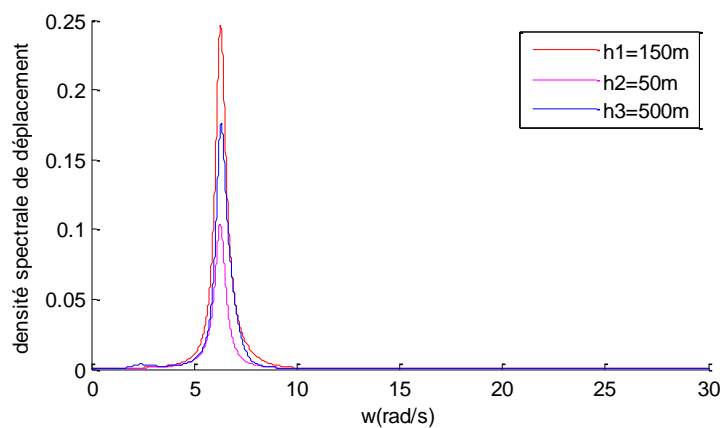


Figure .6.1-a Densité spectrale du Déplacement relatif

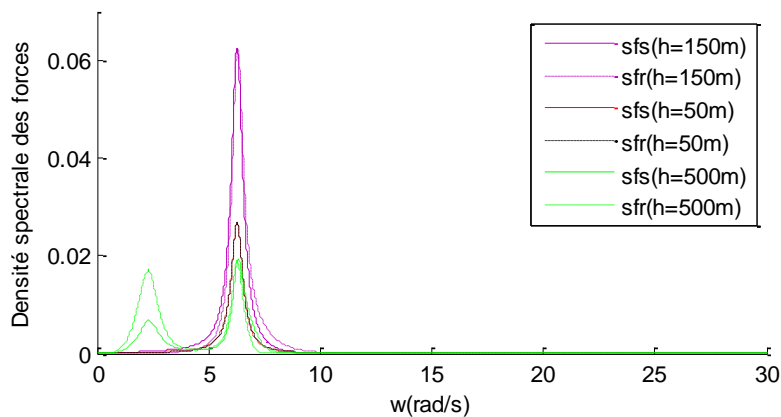


Figure .6.1-b Densité spectrale des forces en A et B

La figure (6.1a) représente les densités spectrales du déplacement relatif pour $h = 50\text{m}$ et 500m qui sont presque identiques, tandis que celle calculée pour une valeur intermédiaire $h = 150\text{m}$ 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 $\omega_0 = 2\pi\text{rad/s}$.

La figure (6.1b) représente l'allure des courbes de la densité spectrale des forces f_A et f_B qui est semblable à celle du déplacement relatif. Cependant, la courbe présente un deuxième pic à $\omega = 2.35\text{ rad / s}$, correspondant au mode fondamental du sol pour $h = 500\text{ m}$. Dans ce contexte, on va étudier la variation du pic de la densité spectrale du déplacement et 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 $\omega_0 = 2\pi\text{rad/s}$.

2. on va étudier l'influence de la hauteur de la couche de sol sur l'écart type RMS et sur le coefficient sismique (RMS normalisé) du déplacement, Les valeurs sont identiques à l'exemple précédant

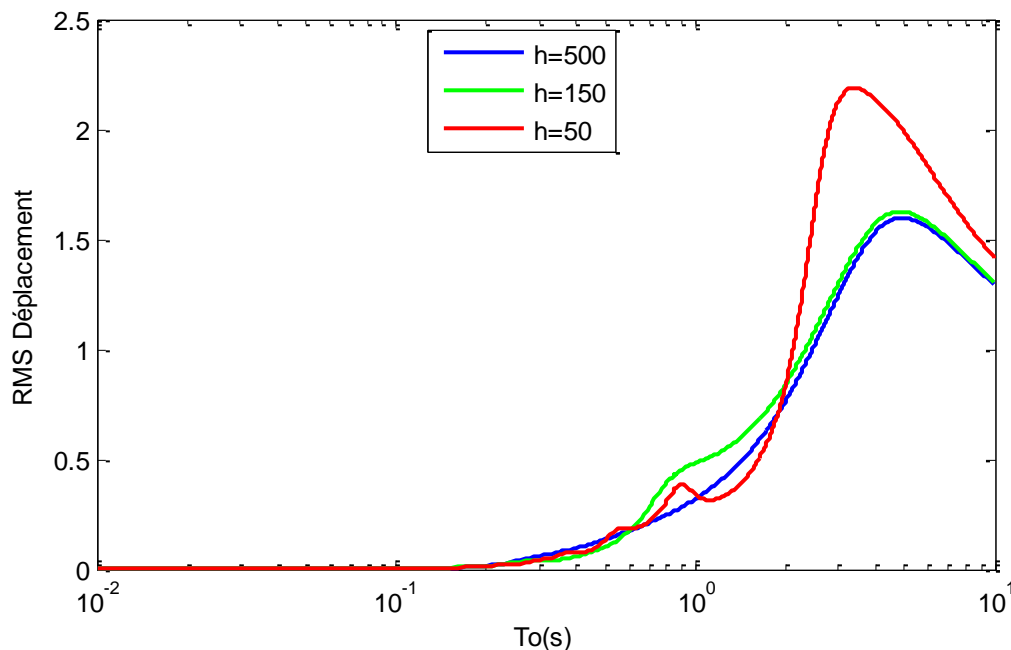


Figure 6.2 -a Représentation du RMS Déplacement

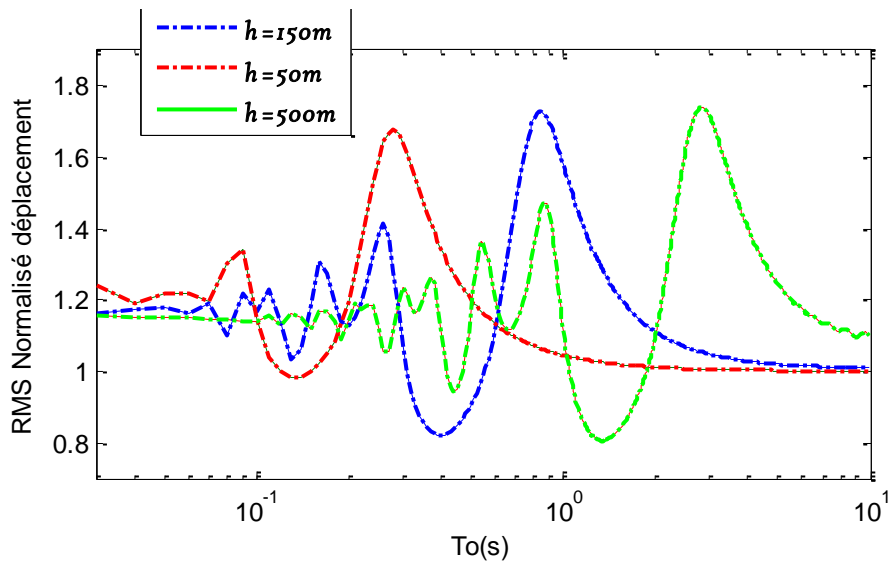


Figure 6.2 -b Représentation du RMS Déplacement Normalisé

Sur la figure (6.2a) il apparaît clairement que l'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 $To \approx 3.84s$ (en $w = w_b$), reflète directement la résonance sol-structure

Sur la figure (6.2b), on remarque que les amplitudes maximales des RMS normalisés du déplacement ont quasiment 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-on va étudier l'influence de la hauteur de la couche de sol sur l'écart type RMS et sur le coefficient sismique (RMS normalisé de la force en (A) et en (B)). Les valeurs sont identiques à l'exemple précédant

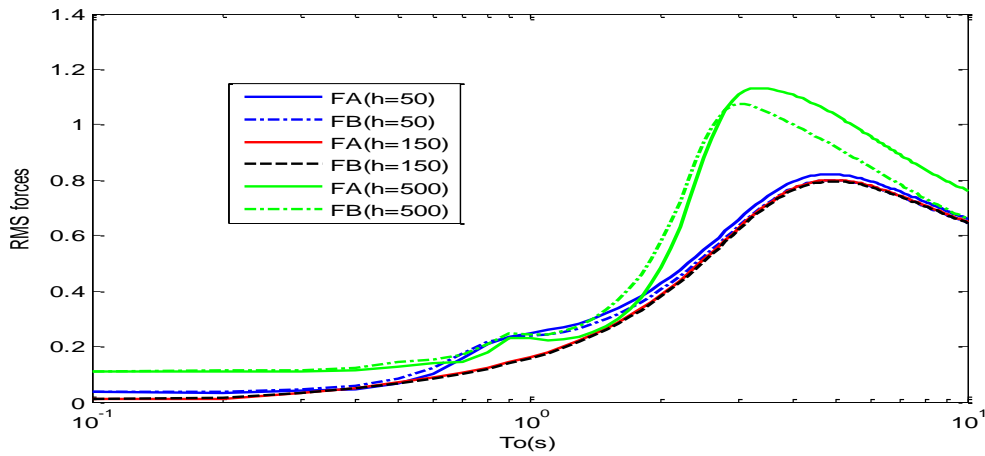


Figure 6.3-a Représentation du RMS forces

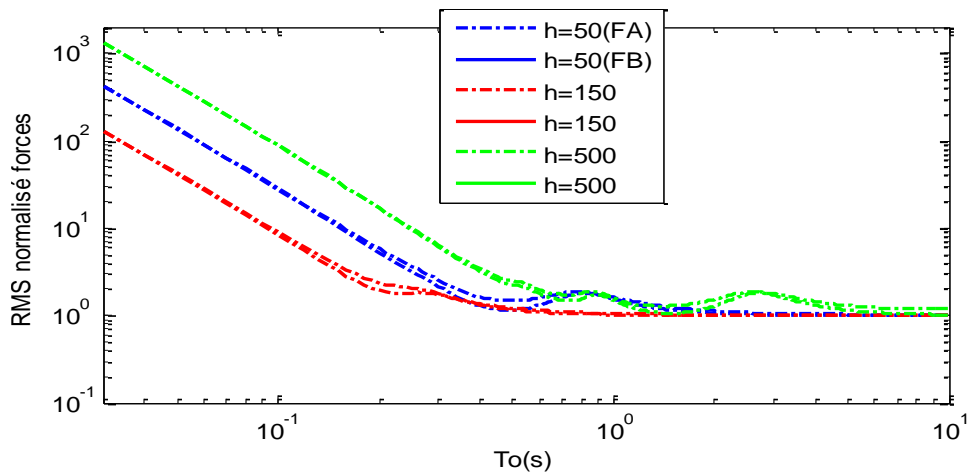


Figure 6.3-b Représentation du RMS forces Normalisé

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.

On va étudier l'effet du facteur de qualité du sol sur l'écart type RMS et sur le coefficient sismique (RMS normalisé de la force en (A) et en (B)). Les valeurs sont identiques à l'exemple précédant, pour des valeurs de $Q=10, 30, 50, 100$.

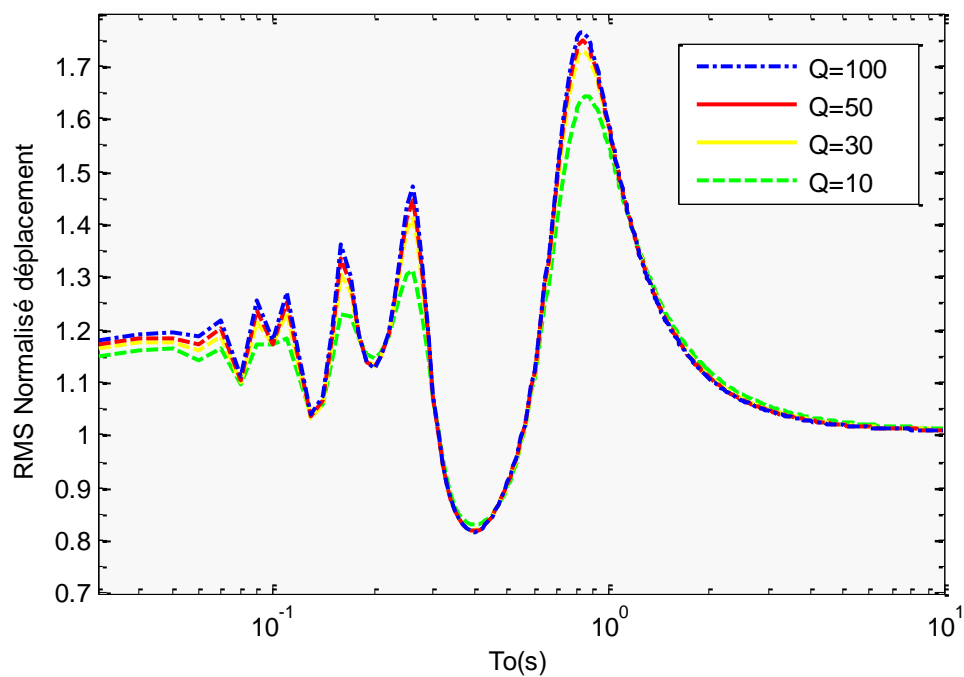


Figure 6.4 a : l'effet du facteur de qualité ' Q '
Sur les RMS normalisé déplacement

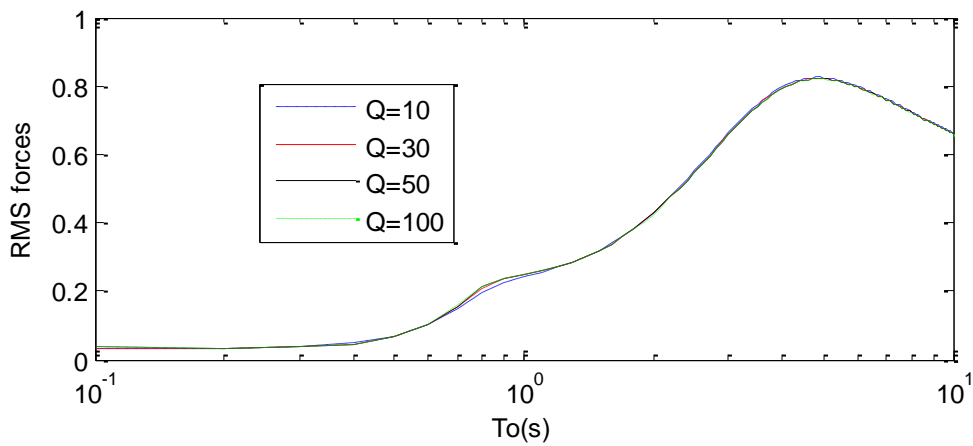


Figure 6.4 b : l'effet du facteur de qualité 'Q'
Sur les RMS forces

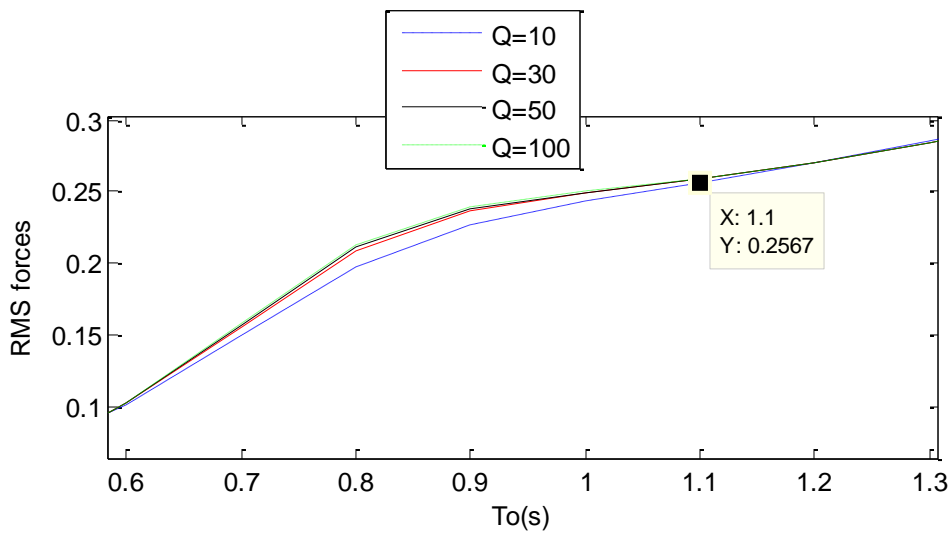


Figure 6.4 c : l'effet du facteur de qualité 'Q'
Sur les RMS forces en petit intervalle $To \in [0.6 \text{ à } 1.1]$

Sur la figure (6.4a) on voit que lorsque les facteurs de qualité augmentent, les amplitudes des RMS normalisés du déplacement s'amplifient, et les valeurs maximales pour chaque facteur de qualité coïncident avec une même valeur de fréquence

($To \sim 0.8s$). L'influence des facteurs de qualité Q devient négligeable lorsque To converge en 10s.

Sur la figure (6.4b), l'effet des facteurs de qualité Q sur les RMS normalisés des forces est pratiquement invisible (nul), sauf dans un petit intervalle $T_o \in [0.6 \text{ à } 1.1]$ (s) voir figure (6.4c).

On remarque aussi que l'effet de facteur de qualité Q sur les RMS forces est beaucoup plus faible par rapport aux RMS déplacements,

On va étudier l'effet de la vitesse d'onde de cisaillement ' V_S ' sur le RMS normalisé de déplacement et de la force en (A) et en (B). On considère les quatre valeurs de la vitesse d'onde de cisaillement : $V_S = 100, 200, 400$ et 750 m/s .

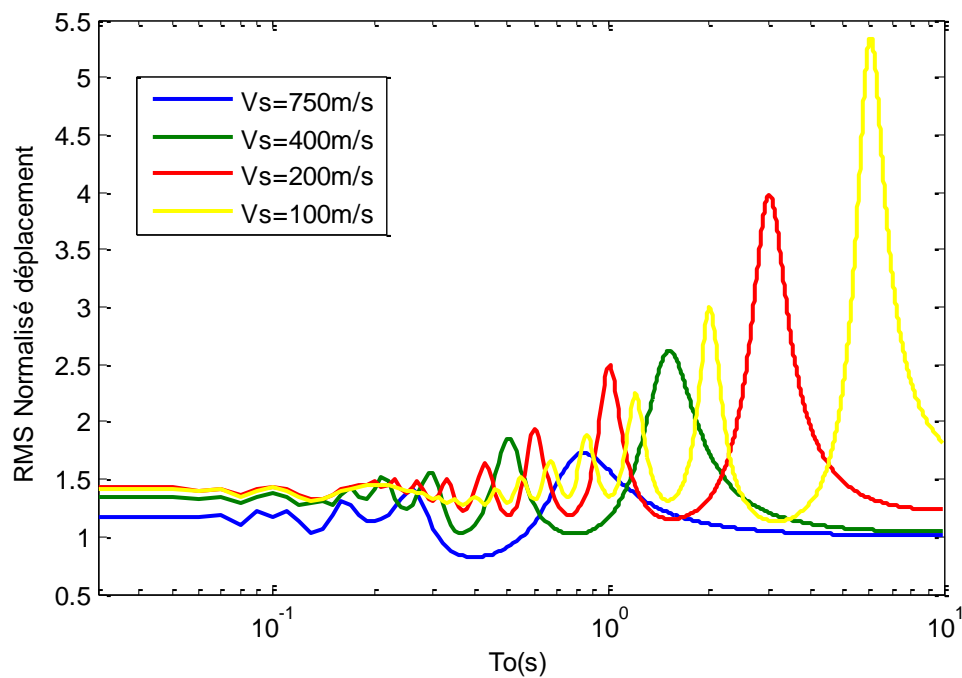


Figure 6.5-a RMS normalisé déplacement pour différentes valeurs de V_S

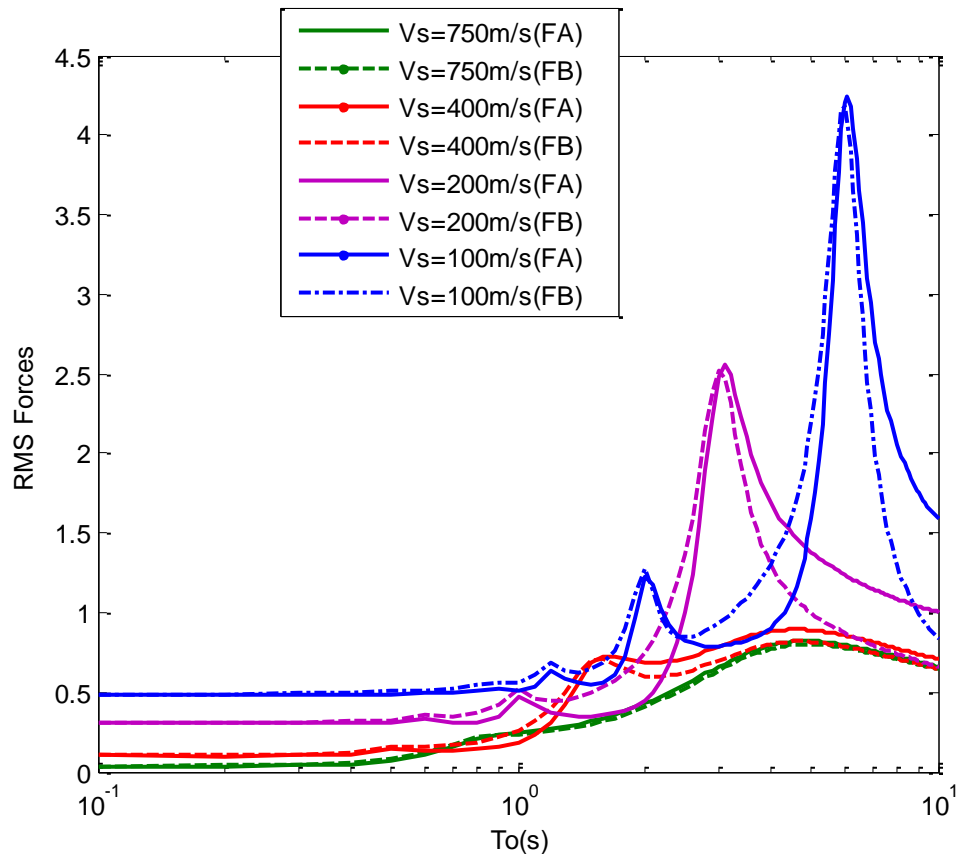


Figure 6.5-b RMS forces pour différentes valeurs de V_S

Sur les figures 6.5, on voit que:

Les amplitudes RMS normalisé de déplacement et RMS forces s'amplifiant 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 RMS de forces se concentrent dans les domaines des basses fréquences

Lorsque T_0 augmente c'est-à-dire pour les basses fréquences la différence entre RMS forces en (A) et (B) sont remarquables, comme sont indiqués clairement pour les vitesses plus basses

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

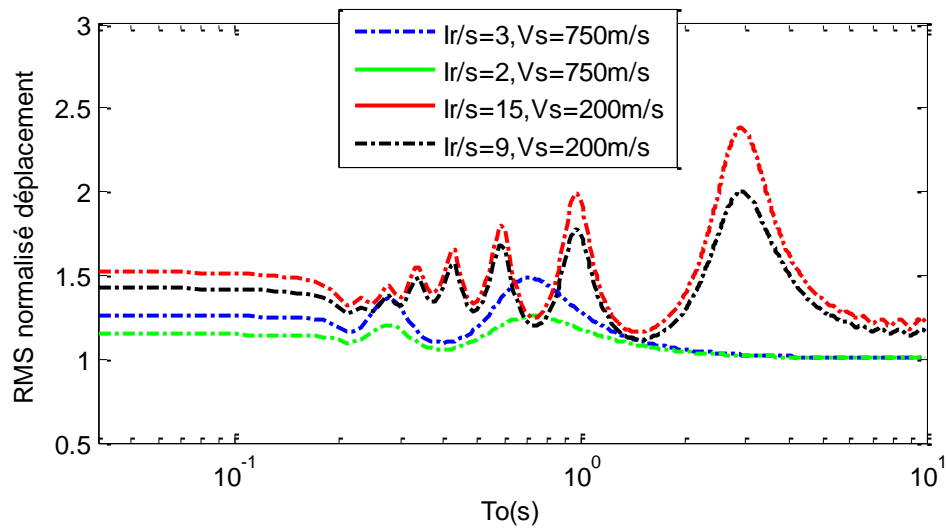


Figure 5.7-a RMS normalisé déplacement pour différentes valeurs de $I_{R/S}$ en fonction de V_s

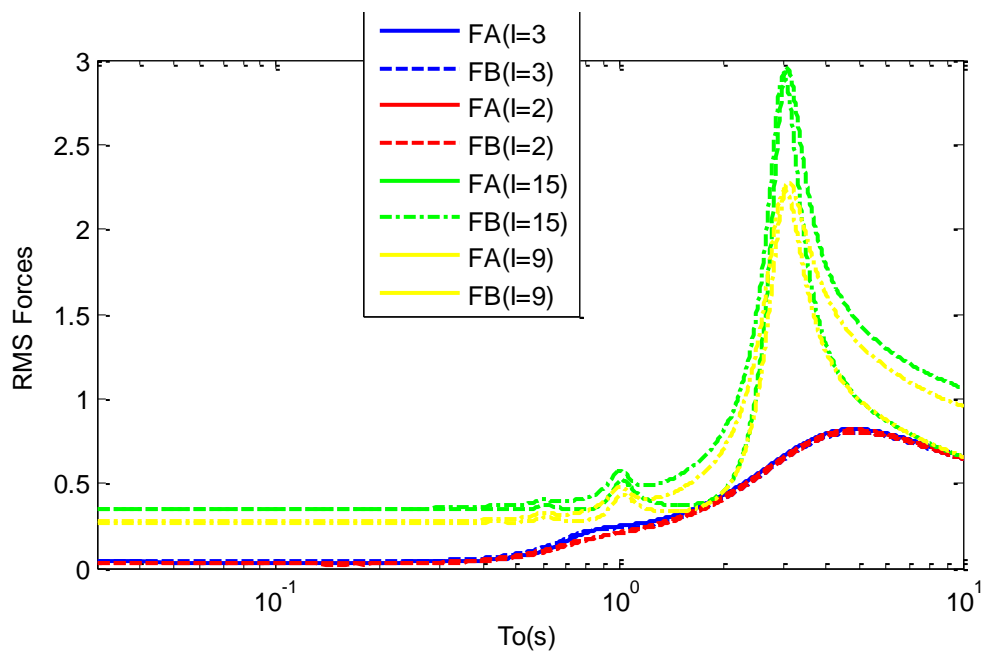


Figure 5.7-b RMS forces pour différentes valeurs de $I_{R/S}$ en fonction de V_s

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

Dans la figure (5.7a), on remarque que les amplitudes maximales du RMS normalisé de déplacement pour la vitesse de cisaillement $V_s = 200\text{m/s}$ sont plus grands par-rapport $V_s = 750\text{m/s}$.

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

6.4 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 :

- Le RMS de déplacement augmente en fonction de la flexibilité de la structure jusqu'à une valeur de T_0 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.
- 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. La différence entre les RMS forces en A et B augmentent avec la diminution de la vitesse et la croissance de la période T_0
- 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_0 . La variation induite est négligeable comparée à celle des déplacements

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Cette étude traite un pont de 3 travées, dont la longueur de rive est de 10m, et la centrale de 16m, avec une pile ancrée dans une couche de sol et l'autre dans de la roche.

Pour cela, des notions de sismologie, d'élasto-dynamique et de vibrations aléatoires ont été présentées. Ces dernières sont des outils de base qui vont nous permettre d'étudier l'effet de site induit par la propagation verticale des ondes SH et évaluation des fonctions de transfert.

Par ailleurs une 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 contraste d'impédance entre la couche de sol et le sol rocheux (I_s/r).

.Les résultats obtenus montrent :

- Le RMS de déplacement augmente en fonction de la flexibilité de la structure jusqu'à une valeur de T_0 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'une 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.
- 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. La différence entre les RMS forces en A et B augmentent avec la diminution de la vitesse et la croissance de la période T_0

Conclusion Générale

- 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_0 . La variation induite est négligeable comparée à celle des déplacements.
- Une fois le RMS calculé on peut déduire les déplacements et les forces de cisaillement appliquées aux appuis d'une structure donnée qu'on ne peut pas dépasser pour une probabilité donnée soumise une excitation sismique

REFERENCE

- [1] **Abbiss, C.P.**, 1989: "Seismic Amplification. Mexico City". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 17.
- [2] **D-Rahab.**, Effet des paramètres de source sur le mouvement sismique cas du séisme de Boumerdes du 21 mai 2003, JUIN 2005, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger
- [3] **Pecker, A.**, 1984:"Dynamique des sols". Presse de l'Ecole Nationale des ponts et Chaussées.
- [5] **S. Belhadj-mostefa.**, analyse expérimentale de la distribution des contraintes dynamiques à l'interface sol fondation, université mentouri consrtantine
- [6] **Berrah, M.K.**, 2006-2007:"Cours des Vibrations aléatoires".Ecole Nationale Polytechnique
- [7] **H.ventsel.**, 1973 Théorie des probabilités
- [8] **M'CHEL Del Pefro.**, 1990. VIBRATION Aléatoires et analyse spectrale, L'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
- [9] **Saddika MOHAMADI.**, influence de l'effet de site local sur les parametres de mouvement de sol, université de Boumerdes.
- [10] **Coulom et Georges Jobert.**, 1953. Traité de geophysique internet.
- [11] **Samia Louadje.**, 2001. Mémoire de Magister.
- [12] **DIF DJAMEL.**, influence des conditions de sol sur l'analyse sismique des structures
- [13] **Safak, E.**, 1995: "Discrete-time analysis of seismic site amplification". J. Eng. Mech., ASCE, Vol.121 (7), pp. 801-9.
- [14] **Zembaty, Z.**, 1996:"Spatial seismic coefficients, some sensitivity resultants". Journal of Engineering Mechanics, Vol. 122, No. 4, pp. 379-382.
- [15] **Der Kiureghian A.**1996: "A coherency model for spatially varying ground motions". Earthquake Eng. Struct. Dyn, Vol.25, pp.99111.

- [16] **M. Michel KAHAN.**, juin 1996. These de doctorat de l'ecole nationale des ponts et chaussees.
- [17] **Clough RW, Penzien J.**, 1975: "Dynamics of Structures". McGraw-Hill Book Co., New York, NY., USA.
- [18] **Aki and Richards, P.G.**, 1980:"Quantitative Seismology", Vol.II, W.H. freeman and Co., San Francisco.USA.
- [19] **N.OUDAI et A.SMAOUI**, Juin 2013.
- [20] **R. L., Wiegel.**, 'Earthquake Engineering', Prentice – Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1970
- [21] **D. A., Gasparini and E. H., Vanmarcke.**, 'Evaluation of seismic safety of buildings', Report N°2, SIMQKE, Department of Civil Engineering, Maassachusetts Institut of Technology (MIT), 1976.
- [22] **Zermout.**, Mémoire de Magister.