

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumedienne



Institut de Génie Civil

THESE DE MAGISTER

Option: CONSTRUCTION

Présentée par

Akila MESSAOUDI

Ingénieur en Construction Civile et Industrielle (Juin 1996)

Pour obtenir le titre de

MAGISTER

en Génie Civil

THEME

INTERACTION SOL-STRUCTURE EN MILIEUX HETEROGENES

Soutenue publiquement le 05 mai 2001 devant le Jury composé de

A. CHELGHOUM	Professeur	USTHB	Président
N. LAOUAMI	Maître de Recherche	CGS	Directeur de thèse
M. K. BERRAH	Professeur	ENP	Examineur
H. AFRA	Maître de Recherche	CGS	Examineur
N. BOURAHLA	Maître de Conférences	USTB	Examineur
S. DJELLAB	Maître Assistant	USTHB	Invité

DEDICACES

A ma très chère maman.

A mon très cher papa.

A mes très chers : ma sœur Nacila et son mari Salim.

A ma très chère sœur Sabrina.

A mes très chers frères: Salim, Khaled et Amine.

A mon très cher Nourredine et toute sa famille.

A mon cher oncle Mustapha, sa femme et son fils Ramzy.

A toute la famille.

A mes chers amis.

A tous mes enseignants et à tous mes étudiants de l'EPAU.

A toutes les personnes qui m'ont aidé et encouragé.

A la mémoire de mon cousin Hakim et de son père Chouakri Salah.

Remerciements

Je dois tous d'abord remercier **Allah** de m'avoir donné le courage, la patience et la force de persévérer dans mon travail.

Je dois également remercier **ma maman, mon papa qui me sont les plus chers au monde, grâce à leur éternel dévouement, mes efforts ont abouti**, frères et sœurs ainsi que mon beau-frère pour leurs encouragements, leur soutien moral à chaque étape de ce modeste travail.

Aussi, je tiens à remercier vivement mon Directeur de thèse, **D^r N. LAOUAMI**, Maître de recherche au Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, lui qui été à l'origine du présent mémoire, pour les conseils fructueux et les suggestions combien judicieuses qu'il m'a prodigués, ainsi que pour la confiance et les encouragements qu'il m'a témoignés tout au long de ce travail et avec le souci de le voir achevé. Aussi, qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

J'adresse tous mes vifs remerciements à Monsieur **A. CHELGHOUM**, Professeur à *l'USTHB*, pour l'honneur qu'il me fait de présider le jury.

A l'intention de Monsieur **M.K. BERRAH**, Professeur à *l'ENP*, qu'il trouve ici tous mes remerciements pour avoir bien voulu examiner ce travail. Aussi, je tiens particulièrement à lui exprimer ma profonde reconnaissance pour l'opportunité qu'il m'a offerte en me permettant d'assister à son cours de vibrations aléatoires.

Tous mes vifs remerciements à Monsieur **H. AFRA**, *Maître de recherche* au CGS d'avoir accepté de siéger dans le jury comme examinateur. Je saisis cette occasion pour lui adresser également tous mes remerciements quant à sa gentillesse et son soutien moral lors de ces cours de post-graduation relatifs à la dynamique combien précieux.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur **N. BOURAHLA**, *Maître de Conférence* à *l'USTBlida*, qui a bien voulu faire partie de ce jury.

Mes remerciements s'adressent tout particulièrement à Monsieur **N. MEZOUER**, Chercheur au CGS, pour sa contribution sans réserves à l'élaboration de ce travail, ainsi que pour son soutien moral. Toutes mes grâtitudes.

Toute ma gratitude à mon cher oncle **M. CHERFAOUI**, pour son soutien moral, combien précieux en particulier dans les moments les plus difficiles.

A l'adresse de Madame et Monsieur **M.S.Fouila** qu'ils trouvent ici l'expression de mes vifs remerciements pour leurs gentillesse, leurs encouragements incessants qu'il m'ont témoignés tout au long de ce travail, soucieux de le voir achevé. Aussi je tiens à remercier chaleureusement ma chère tante **Mme CHOUAKRI MALIKA** qui m'a toujours témoigné beaucoup d'attention.

Je ne saurais oublier de remercier Monsieur **M. HADID**, Chercheur au CGS pour ses précieux conseils et fructueuses suggestions, sans oublier son soutien moral.

Messieurs **A NOUR**, **Y. BOUHADAD**, **A.SLIMANI** et **A. KAHIA** du CGS trouvent ici tous mes remerciements pour leurs aides, leurs sympathies, leurs encouragements et leurs impatiences de voir ce travail réalisé, sans oublier **M. A. RAHALI** du CGS.

Sans omettre toutes les personnes que je n'ai pu citées qui m'ont témoignées aide et soutien moral, de loin ou de près, à ceux-là, j'adresse mes sincères remerciements.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I **REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

I. INTRODUCTION	5
II ANALYSES PROBABILISTES DU COMPORTEMENT SISMIQUE D'UN SOL HETEROGENE	5
II.1 Effets de la variabilité spatiale des propriétés mécaniques sur le comportement du sol	5
II.2 Effets de la variabilité spatiale du mouvement sismique	8
III. ANALYSE DES EFFETS DE LA VARIABILITE SPATIALE DES CARACTERISTIQUES MECANQUES DU SOL SUR LA REPOSE DES STRUCTURES	13
III.1 Cas statique	13
III.2 Cas dynamique	14
IV. ANALYSE DES EFFETS DE LA VARIABILITE SPAIALE DU MOUVEMENT SISMIQUE SUR LA REPOSE DES STRUCTURES	17
V. CONCLUSION	22

CHAPITRE II **FORMULATION DES PROBLEMES D'INTERACTION SOL-STRUCTURE**

I. INTRODUCTION	24
II. MODELES D'INTERACTION SOL-STRUCTURE	26
II.1 Méthodes de résolution des problèmes d'interaction sol-structure	27
II.2 Frontières de transmission	28
III. PRESENTATION DU LOGICIEL DE CALCUL D'ISS "FLUSH"	30
III.1 Prise en compte des facteurs mis en jeu dans un problème d'interaction sol-structure par le programme FLUSH	30
III.2 Procédure de calcul du programme FLUSH	34

CHAPITRE III

SIMULATION DU MILIEU ALEATOIRE

I. INTRODUCTION	37
II. TECHNIQUES D'ANALYSES DE LA VARIABILITE SPATIALE DES PROPRIETES DES SOLS	38
III. PRINCIPES DE PROBABILITES	39
III.1 Définition des processus stochastiques (aléatoires)	39
III.2 Lois de distribution	40
III.3 Moments de variables aléatoires	40
IV. DESCRIPTION DE PROCESSUS ALEATOIRES	41
IV.1 Processus aléatoires gaussiens	41
IV.2 Processus aléatoires stationnaires	42
IV.3 Processus aléatoires stationnaires érgodiques	43
IV.4 Notions de fonction de Corrélation	43
IV.5 Description d'un processus aléatoire dans le domaine des fréquences : notions de densité spectrale	45
V. SIMULATION DE PROCESSUS ALEATOIRES	46
V.1 Simulation de champ unidimensionnel à une variable : (1D-1V)	46
V.2 Simulation aléatoire d'un profil de sol bidimensionnel	47
VI. CONCLUSION	50

CHAPITRE IV

REPONSES DU SYSTEME GLOBAL SOL-STRUCTURE EN MILIEU HOMOGENE

I. INTRODUCTION	51
II. DESCRIPTION DES MODELES SOL ET STRUCTURE	51
II.1 Sol	51
II.1.1 Modélisation	51
II.1.2 Signal d'entrée	52
II.1.3 Réponses en champ libre	54
II.2 Structure	58
III. EFFETS DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE	60
III.1 Effet de l'atténuation du mouvement sismique	61
III.2 Effet de filtrage de la fréquence fondamentale du système sol-structure	68
III.3 Mouvements verticaux	69
IV. ANALYSE	70
V. CONCLUSION	70

CHAPITRE V

REPONSES DU SOL EN MILIEUX HETEROGENES

I. INTRODUCTION	71
II. ANALYSE SISMIQUE D'UNE COUCHE DE SOL HETEROGENE QUELCONQUE	71
II.1 Représentation des modèles de sols aléatoires quelconques	72
II.2 Effets de l'hétérogénéité quelconque du sol sur la réponse en translation en champ libre	73
II.2.1 Effet d'atténuation de la réponse sismique	73
II.2.2 Effet de filtrage de la réponse sismique	74
II.3 Etude du mouvement de rotation induit par l'hétérogénéité du sol	76
III. ANALYSE SISMIQUE D'UN MULTICOUCHE A INTERFACES ALEATOIRES	77
III.1 Effets de l'hétérogénéité des interfaces sur la réponse en translation en champ libre	78
III.1.1 Effet d'amplification de la réponse sismique	78
III.1.2 Effet de filtrage de la réponse sismique	80
IV. CONCLUSION	81

CHAPITRE VI
**REPONSES DU SYSTEME GLOBAL SOL-STRUCTURE EN
MILIEU HETEROGENE ALEATOIRE**

I. INTRODUCTION	82
II. INFLUENCE DE L'HETEROGENEITE DU SOL SUR LES REPONSES DU SYSTEME GLOBAL SOL-STRUCTURE	82
II.1 Atténuation de la réponse sismique	82
II.2 Effet de filtrage de la réponse sismique	87
II.3 Mouvements différentiels à la base	89
II.4 Accélérations verticales au toit	90
III. CONCLUSION	90

CHAPITRE VII
**REPONSES DU SYSTEME GLOBAL SOL-STRUCTURE EN
MILIEU A INTERFACES ALEATOIRES**

I. INTRODUCTION	92
II. INFLUENCE DE L'HETEROGENEITE DES INTETRFACES DU SOL SUR LA REPOSE DU SYSTEME GLOBAL SOL-STRUCTURE	92
II.1 Amplification de la réponse sismique	92
II.2 Effet de filtrage de la réponse sismique	97
II.3 Mouvements différentiels à la base	99
II.4 Accélérations verticales au toit	100
III CONCLUSION	101

CHAPITRE VIII
ETUDE PARAMETRIQUE

I. INTRODUCTION	102
II. EFFET DU NOMBRE D'ECHANTILLONS ALEATOIRES SUR LA REPOSE DE LA STRUCTURE	102
III EFFET DU RAPPORT ADIMENSIONNEL, LONGUEUR D'OUVRAGE SUR LONGUEUR DE CORRELATION	105
IV CONCLUSION	106

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

BIBLIOGRAPHIE

INTERACTION SOL-STRUCTURE EN MILIEUX HETEROGENES

Résumé :

Il est admis, à présent, que la prise en compte de la variabilité spatiale des caractéristiques mécaniques du sol, est une donnée incontournable à intégrer dans les méthodes actuelles de calcul des structures. En effet, les méthodes usuelles, basées sur des approches déterministes couplées avec l'hypothèse de milieu homogène, aussi sophistiquées soient-elles ne permettent pas de prédire, entre autres, le mouvement différentiel de la structure soumise au séisme, ou le problème du dévers des structures importantes et massives, dans le cas statique. Ce travail de recherche consiste à étudier l'interaction sol-structure en milieu hétérogène soumis à une excitation sismique. Deux types d'hétérogénéité sont considérés : une hétérogénéité due à la distribution aléatoire du module de cisaillement d'un profil de sol et une hétérogénéité des interfaces d'un multicouche de sol se traduisant par des épaisseurs de couches aléatoires.

Le premier point mis en exergue dans ce travail est l'effet de l'hétérogénéité sur la réponse sismique de profil de sol. Dans le premier type d'hétérogénéité, les résultats font apparaître :

- Une désamplification du mouvement moyen par rapport à la réponse d'un sol homogène.
- Un effet de filtrage de la fréquence fondamentale du milieu.
- Apparition de mouvements différentiels résultant de la variation spatiale des mouvements calculés en champ libre, en surface.

Dans le cas de multicouche à interfaces aléatoires, les résultats indiquent :

- Une amplification du mouvement moyen par rapport à la réponse d'un multicouche homogène
- Un décalage de la fréquence fondamentale vers une valeur supérieure.

Le deuxième point du travail traite l'interaction sol-structure en milieux hétérogènes. Dans le premier type d'hétérogénéité, les résultats font apparaître :

- Une atténuation de la réponse sismique à la base et au toit de la structure.
- Un effet de filtrage des hautes fréquences du système global sol-structure.
- Une amplification des mouvements verticaux au toit de la structure.

Par contre, l'hétérogénéité des interfaces du multicouche induit :

- Une amplification de la réponse sismique à la base et au toit de la structure.
- Un effet de filtrage des basses fréquences du système global sol-structure.
- Une amplification des mouvements verticaux au toit de la structure.

Dans la dernière partie, une étude paramétrique est menée, elle permet d'aboutir aux conclusions suivantes :

- L'analyse statistique des résultats de simulation montre une convergence au bout de 10 échantillons.
- Les effets de l'hétérogénéité du sol sont négligeables pour des longueurs de corrélation très faible et très importante.
- Les effets de l'hétérogénéité (atténuation du mouvement) sont importants pour des rapports (longueur d'ouvrage sur distance de corrélation) compris entre 1 et 5.

SOIL-STRUCTURE INTERACTION IN HETEROGENOUS MEDIA

Abstract:

It is well known that integrating the spatial variability of mechanical characteristics of the soil in structures analysis is important. Classical methods, based on deterministic approaches, can not predict, for example, differential motion at the base of structures in case of the seismic excitation or the static problem of slant. The aim of this work is to analyze the soil-structure interaction phenomena in heterogeneous media. Two kinds of heterogeneity are considered: soil with random shear modulus and multi-layer soil with random interfaces.

The first point in this work deals with the effect of heterogeneity of the soil on seismic responses at the free surface. The heterogeneity due to random shear modulus implies:

- Attenuation of the motions compared to homogeneous soil.
- Filtering effect or shifting of the frequency content to the low frequencies band.
- Differential motion (additionnal rotation) induced by the spatial variability of the seismic motion.

The heterogeneity due to random interfaces of multi-layered soil implies:

- Amplification of the motion.
- Shifting of the frequency content to the higher frequencies band.

The second part of this thesis deals with the effects of soil-structure interaction on structures responses. The results indicate for the first kind of heterogeneity:

- Attenuation of the seismic motion in the base and the top of the structure.
- Shifting of the global system fundamental frequency to lower one.
- Amplification of the vertical motion at the top of the structure.

Whereas, the heterogeneity due to random interfaces of multi-layered soil implies:

- Amplification of the seismic motion in the base and the top of the structure.
- Shifting of the global system fundamental frequency to higher one.
- Amplification of the vertical motion at the top of the structure.

Finally, a parametric study is also done, it concludes that :

- Statistic analyze show that the accuracy of the simulation results can be obtained from 10 samples.
- The effects of the heterogeneous medium with a very low or very large values of correlation distance, are negligible.
- The effects of the heterogeneous medium (attenuation of the motion) becomes important in the range [1 5] for values of the ratio between the foundation width and the correlation distance.

INTRODUCTION GENERALE

Il est admis, à présent, que la prise en compte de la variabilité spatiale des caractéristiques mécaniques du sol, est une donnée incontournable à intégrer dans les méthodes actuelles de calcul des structures. En effet, les méthodes usuelles, basées sur des approches déterministes couplées avec l'hypothèse de milieu homogène, aussi sophistiquées soient-elles ne permettent pas d'expliquer ou de prédire, par exemple, le mouvement différentiel de la structure soumise au séisme, dans le cas dynamique et le problème du dévers des structures importantes et massives, dans le cas statique.

L'aléa naturel du sol, d'une part au niveau de la sédimentation par couche, et d'autre part au niveau de l'hétérogénéité de ses constituants augmentent la complexité de la modélisation de l'action sismique et son interprétation. En fait, c'est la diversité des domaines liés à cette phénoménologie qui rend la compréhension difficile à cerner complètement dans son ensemble. En effet, elle nécessite des connaissances en mécanique des milieux continus, en mécanique des solides, en interaction sol-structure, en propagation d'onde, en sismologie, en mathématiques probabilistes, en statistique, etc. En particulier, la physique relative à la propagation des ondes sismiques dans le sol, dont les caractéristiques mécaniques présentent une forte variation spatiale, à l'origine du phénomène de la variabilité spatiale du mouvement sismique. Les conséquences de ce dernier sur les ouvrages sont mises en évidence par les observations post sismiques et les recherches de plusieurs auteurs de par le monde.

Pour améliorer les critères de conception des structures (niveaux de sécurité et de fiabilité) et ajuster leur dimensionnement au séisme, il est incontournable de bien comprendre les mécanismes et les répercussions d'une secousse sismique sur une structure. On réalise aussi pourquoi une définition déterministe des caractéristiques mécaniques du sol, risque d'être peu représentative compte tenu de cet ensemble de phénomènes complexes. En fait, une

approche probabiliste permet d'intégrer de manière quantitative les incertitudes et les dispersions associées aux valeurs de ces caractéristiques. Ainsi pour appréhender ces concepts, des statisticiens et géotechniciens contribuent à une meilleure connaissance des sites afin d'enrichir et de raffiner le modèle de comportement du sol sous séisme. Ainsi, si l'on considère l'hétérogénéité d'un sol réel, il est naturel que ce dernier possède des propriétés décrites et corrélées par des grandeurs probabilistes. Plus particulièrement, ces propriétés varient aléatoirement par rapport à l'espace et dans le temps pour constituer un champ aléatoire.

L'objectif de ce travail de recherche consiste à étudier l'interaction sol-structure en milieu (sol) hétérogène soumis à une excitation sismique. Deux types d'hétérogénéité sont considérés, ce sont :

- 1- Hétérogénéité du module de cisaillement d'un profil de sol ;
- 2- Hétérogénéité des interfaces d'un multicouche de sol.

Le caractère fortement aléatoire des caractéristiques mécaniques du sol justifie l'utilisation de l'approche stochastique pour une modélisation plus réaliste. Pour cela, l'étude consiste à analyser la propagation de l'onde sismique dans un milieu aléatoire à deux dimensions, représentatif d'un sol hétérogène, dont le module de cisaillement varie aléatoirement en chaque point de l'espace, en interaction avec un ouvrage long de type pont. La variation spatiale du module de cisaillement sera contrôlée par les trois paramètres suivants :

- la fonction d'inter - corrélation qui exprime la perte de corrélation ou de ressemblance du paramètre d'un point à un autre du milieu. On considère dans le cadre de cette étude une fonction usuellement utilisée dans la littérature; c'est la fonction exponentielle.
- la distance de corrélation qui donne l'ordre de grandeur de la taille de l'hétérogénéité. En d'autres termes, c'est la distance au delà de laquelle on considère qu'il n'y a plus de corrélation entre deux points considérés.
- l'écart type qui exprime le degré de fluctuation autour de la valeur moyenne du module de cisaillement du sol.

Plusieurs cas d'analyse sont considérés et qui sont :

- la nature du sol (rigide, mou).
- la nature de l'ouvrage (flexible, rigide).
- le degré de l'hétérogénéité (faible, forte).
- l'influence du rapport adimensionnel: dimension de l'ouvrage à la base/longueur de corrélation du sol.
- influence du nombre d'échantillons.

L'objectif principal de ces analyses est d'expliquer certains phénomènes, que les analyses basées sur l'hypothèse d'homogénéité du milieu (le sol dans notre cas) utilisées actuellement dans les méthodes de calcul de l'interaction sol-structure ne peuvent pas mettre en évidence, et qui sont :

Champ libre (en absence de structure):

- ❑ la variabilité spatiale du mouvement sismique en champ libre ;
- ❑ les composantes sismiques de lacet (rotation autour d'un axe vertical) ;
- ❑ les mouvements différentiels;
- ❑ l'atténuation où l'amplification du mouvement de translation ;
- ❑ l'effet de filtrage du contenu fréquentiel.

Interaction sol-structure

- ❑ atténuation de la réponse à la base et au toit de la structure;
- ❑ mouvements différentiels à la base de structure;
- ❑ filtrage du contenu fréquentiel des réponses du système sol-structure.

Le présent mémoire est divisé en deux principales parties, la première présente une synthèse bibliographique assez détaillée sur les différentes approches probabilistes traitant aussi bien la variabilité spatiale des propriétés du sol que celle des mouvements sismiques et leurs effets sur la réponse des structures. Ces approches incluent les modèles continus, discrets et empiriques. La deuxième partie présente la méthodologie, basée sur la théorie des vibrations aléatoires, adoptée pour la simulation aléatoire des deux types d'hétérogénéité, et traite:

- l'influence de l'hétérogénéité du sol sur la réponse au séisme en surface libre.
- l'influence de l'hétérogénéité du sol sur la réponse au séisme du système global sol-structure.

Dans les deux études, une analyse comparative est effectuée avec le cas de sol homogène.

Ce travail est accompli en utilisant et en modifiant le code de calcul de l'interaction sol structure "FLUSH".

Vu la complexité du problème d'interaction sol-structure en milieu hétérogène, celui-ci a peu de chance d'être traité de manière exhaustive dans le cadre du présent travail. La modélisation de l'aspect aléatoire lié au sol au niveau de l'hétérogénéité de ces constituants, et la physique relative à la propagation des ondes sismiques dans un milieu dont les propriétés varient de façon stochastique, engendrent des calculs souvent lourds à gérer. Il faudra donc cibler le problème à considérer. En effet au cours de notre projet, nous nous limiterons à calculer la réponse dynamique d'une structure en interaction avec un sol hétérogène entaché uniquement d'un effet d'incohérence dû à la géologie du sol (hétérogénéité du milieu). Le calcul de la réponse de la structure se fera en utilisant le programme universel «FLUSH», basé sur une modélisation globale du système sol-structure par éléments finis.

Le présent travail est résumé dans les chapitres suivant:

- Le chapitre II, concerne la représentation du problème d'interaction sol-structure, son interprétation phénoménologique, les méthodes de calcul et leur discussion, ainsi qu'un rappel des différentes frontières de transmission utilisées dans ce cas de problèmes. Nous exposons par la suite les différentes équations qui régissent les mouvements dans le modèle global sol-structure.
- Au chapitre III, nous discutons des différentes méthodes qui existent dans la littérature concernant les méthodes statistiques et probabilistes en Mécanique des Sols, permettant la simulation de la variation spatiale des caractéristiques mécaniques, suivit d'un exposé sur les notions fondamentales de : statistiques, probabilités et notions de simulation de champs aléatoires.
- Les résultats (accélérations, spectres de réponses et fonctions de transfert) du système global sol-structure dans un milieu homogène sont exposés au chapitre IV. Nous résumons dans cette partie les réponses du sol en champ libre et celles du système sol-structure.
- Au chapitre V, nous introduisons la notion d'hétérogénéités du milieu, où nous analysons les réponses à la surface libre du sol d'une part dans le cas de milieu hétérogène aléatoire et d'autre part en procédant au réarrangement de la distribution du module de cisaillement où nous étudions les réponses d'un multicouches à interfaces aléatoires.
- Au chapitre VI nous analysons les réponses du système global sol-structure en milieu hétérogène aléatoire en les comparant au cas où le sol est modélisé par un monocouche homogène.
- Au chapitre VII nous analysons les réponses du système global sol-structure en un milieu à interfaces aléatoires en les comparant au cas où le sol est modélisé par un multicouches homogène par couche.
- Au chapitre VIII, nous introduisons la notion de rapport distance entre appuis/longueur de corrélation pour pouvoir mener une étude quantitative.
- Enfin, une conclusion générale de toute la thèse, ainsi que des recommandations pour des travaux futurs sont exposés dans une dernière partie.

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I. INTRODUCTION

Depuis le début des années soixante-dix, le développement des études liées aux ouvrages dont les impératifs de sécurité sont particulièrement stricts (ponts, centrale nucléaire, barrages, etc.) et l'apparition d'outils informatiques de plus en plus puissants ont donné une impulsion remarquable aux applications sismiques du calcul dynamique. En effet, de nombreux problèmes, dont la solution apparaissait autrefois comme pratiquement hors de portée, ont pu faire l'objet de recherches et être traités. La recherche bibliographique que nous exposons ci-dessous s'articule autour de la variabilité spatiale des caractéristiques mécaniques du sol et de la variabilité spatiale des mouvements sismiques, et leurs effets sur la réponse de structures.

II. ANALYSES PROBABILISTES DU COMPORTEMENT SISMIQUE D'UN SOL HETEROGENE

II.1 Effets de la variabilité spatiale des propriétés mécaniques sur le comportement du sol

Il est habituellement considéré dans les méthodes d'analyse sismique des systèmes sol ou sol-structures, un milieu déterministe. En effet, il n'est traité comme stochastique que la sollicitation sismique. Cependant, les expériences et les observations ont montré que les propriétés élastiques du sol, masse et module de cisaillement, se caractérisent par une variabilité spatiale prononcée, et ne sont pas toujours connues avec une précision suffisante pour justifier une modélisation déterministe du milieu. Néanmoins, depuis le développement des méthodes de calcul se basant sur les théories de la statistique et des probabilités, des travaux de géotechnique ont permis la modélisation stochastique du sol, et l'analyse de la variabilité spatiale des caractéristiques mécaniques de ce dernier. L'approche consiste à simuler des champs aléatoires de module de cisaillement ou de masse volumique à partir de leurs propriétés statistiques (moyenne, écart type,...etc.) et d'un modèle de corrélation (Gaussien, Exponentiel, Von Karmen).

a) Modèles discrets à caractéristiques aléatoires

a.1) Cas statique: Les approches probabilistes concernant le calcul des tassements dans le cas du comportement statique des structures sont regroupées comme suit :

On peut citer les modèles à paramètres aléatoires projetés dans des équations déterministes Wu et Kraft (1967), Ramos (1976). Un modèle plus développé proposé par Hilldale (1971), qui décrit le tassement monodimensionnel dans lequel le module de cisaillement du sol est un processus aléatoire stationnaire d'ordre 2. Les propriétés du sol étaient supposées indépendantes d'une couche à l'autre et la variance constante à l'intérieur d'une couche. Puis, viennent les travaux de Resendiz (1969), Diaz et Vanmarcke (1974) qui intègrent l'autocorrélation intra-couche.

Ditlevsen (1980) développe une technique d'éléments finis stochastiques pour les tassements bidimensionnels ou tridimensionnels, suggérée autrefois par Cornell (1971). L'application de cette méthode à la mécanique des sols a été menée par Su et Paraseau. Ces derniers utilisent des simulations de Monté Carlo pour générer des propriétés d'éléments finis. Cambou (1975) a appliqué les approximations du moment d'ordre 2 aux solutions linéaires de la méthode des éléments finis en incluant l'autocorrélation à travers les propriétés.

En fait, ces premières approches de calcul de tassement sont une extension de la technique déterministe, seulement les paramètres intrinsèques du modèle peuvent varier. Cependant, cette technique probabiliste se penche sur la variabilité des caractéristiques du sol et ignore les erreurs des estimations et l'incertitude du modèle.

a.2).Cas dynamique : Il a été admis pour longtemps que les systèmes dynamiques possédaient des caractéristiques bien connues, et que seules les excitations sismiques étaient aléatoires (la variation des propriétés des systèmes dynamiques était faible devant celle des forces). Cependant, plusieurs recherches scientifiques ont été menées pour l'évaluation de l'imprécision et la variation des résultats à des incertitudes sur les paramètres connus.

Prasthofer et Beadle (1975), énumèrent deux sources d'incertitude : une première de nature statistique due aux imprécisions des conditions aux limites et conditions initiales d'excitations ; régies par des fonctions statistiques, et une seconde non statistique qui est due aux hypothèses introduites aux niveaux de la modélisation mathématique pour restituer le caractère physique du phénomène.

En effet des expériences menées par Mok et Muray (1965) montrent que la valeur mesurée d'une pulsation propre varie aléatoirement, car les propriétés physiques des éléments sont entachées d'erreurs. Ces valeurs s'expriment en terme d'aléa sur la rigidité ou la masse. Bogdanoff (1972) a calculé les incertitudes liées aux valeurs propres d'un système à deux degrés de liberté lorsque l'aléa se situe au niveau de la rigidité, à partir des deux premiers moments statistiques. Les fluctuations de rigidité ne sont pas corrélées entre elles. Ceci étant, Soung (1973), introduit alors la corrélation entre les caractéristiques mécaniques et étudie les moyennes des pulsations propres d'un système à (n) degrés de liberté, et les calcule à l'aide d'une méthode de perturbation au 1^{er} ordre. Il apparaît que l'introduction de l'aléa engendre des modes complexes, la partie réelle de ces valeurs est toujours plus faible.

b) Modèles continus à caractéristiques aléatoires

b.1) Méthodes analytiques

Dans ce cas d'approche, on peut citer les travaux de Hryniewicks (1984, 1987, 1989, 1993). Celui ci utilise une méthode analytique, et s'intéresse au déplacement cinématique moyen en chaque couche de sol. Pour cela, il adopte un modèle aléatoire d'une couche de sol surmontant un substratum rocheux excité à sa base par une force harmonique.

L'équation de propagation de l'onde de cisaillement s'écrit:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} \quad \text{I-1}$$

Avec les conditions aux limites suivantes:

$$W(x,t)|_{x=0} = a \exp(i\omega t) \quad \text{I-2}$$

$$\sigma(x,t)|_{x=d} = 0 \quad \text{I-3}$$

où d est l'épaisseur de la couche, ρ est la densité massique. x est la variable espace et t est le temps.

La contrainte σ est reliée au déplacement W par:

$$\sigma = \mu \frac{\partial W}{\partial x} + \xi \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial t} \quad \text{I-4}$$

Avec : ξ est le coefficient d'amortissement, μ est le module de cisaillement.

La densité et le module de cisaillement sont des fonctions aléatoires de x et s'écrivent de la façon suivante:

$$\rho(x) = \rho_0 + \rho_1(x) \quad \text{I-5}$$

$$\mu(x) = \mu_0 + \mu_1(x) \quad \text{I-6}$$

Avec : ρ_0 et μ_0 respectivement la densité et le module de cisaillement moyen. ρ_1 et μ_1 sont les dispersion autour de la moyenne respectivement de la densité et le module de cisaillement.

Les résultats exprimés en terme de racine carrée de l'intensité de la réponse de la couche de sol montrent une atténuation de l'énergie par rapport au cas homogène. Cela est interprété par une dissipation d'énergie liée à la réfraction de l'onde due à l'hétérogénéité du milieu. Ce résultat est fort intéressant, néanmoins, cette approche reste très limitée car ne considérant qu'une seule variable cinématique, elle ne permet pas de mettre en évidence d'autres phénomènes importants (mouvement de torsion, mouvements différentiels, modification du contenu fréquentiel). Aussi, elle ne peut refléter les effets défavorables dus aux phénomènes d'interaction sol- structure, qui peuvent être néfastes pour les ouvrages.

D'autres auteurs considèrent l'aléa lié à l'irrégularité des interfaces entre les couches de sol. Le premier qui a développé cette approche est Rayleigh, puis Zerva et Harada (1987) où l'aléa est considéré sur la géométrie du profil des couches et sur leurs caractéristiques mécaniques. Ils considèrent pour cela, un profil multicouches d'épaisseur totale constante H , et l'épaisseur de chaque couche varie aléatoirement le long de la direction horizontale:

$$H_j(x) = H_j [1 + fH_j(x)] \quad \text{I-7}$$

avec: H_j est la valeur moyenne de l'épaisseur de la couche j et $fH_j(x)$ désigne un champ aléatoire à moyenne nulle de $H_j(x)$ le long de l'axe des coordonnées.

b.2) Méthodes numériques

Dans l'impossibilité de surmonter des difficultés en résolvant analytiquement les problèmes de propagation d'onde dans un milieu aléatoire, des chercheurs, Aki et Richards (1980), Frankel et Clayton (1984, 1986), Popescu (1995, 1996), Deodatis et al. (1995), Takemura et al. (1992), Sato et Kawase (1994) ont opté pour une modélisation numérique du problème. L'approche permet d'évaluer les effets de la variabilité spatiale des propriétés du sol sur la réponse de ce dernier, soumis à des sollicitations sismiques.

En effet, Frankel et Clayton (1984) ont pu quantifier, à une échelle sismologique, l'effet de la diffraction (atténuation apparente de l'onde sismique) en adoptant trois types de fonctions de corrélation (Gaussienne, Von Karman et Exponentielle). Cette méthode leur a permis l'élaboration d'accélérogrammes synthétiques en chaque point du milieu, en discrétisant ce dernier et en utilisant la méthode des différences finies. Il a été observé à partir de ces accélérogrammes une atténuation apparente dans le cas de sol hétérogène (avec une dispersion de la vitesse de 10%), indépendamment de l'atténuation intrinsèque due à la présence de l'amortissement physique dans le milieu. Les résultats obtenus montrent qu'il s'agit d'une relation du type [Attenuation=f(ka)] où k est le nombre d'onde et a est la longueur de corrélation.

A une échelle qui intéresse le génie parasismique, popescu et al. (1996) ont utilisé la méthode des éléments finis pour étudier l'effet de la variation spatiale des propriétés du sol sur la résistance à la liquéfaction de ce dernier. L'analyse effectuée sur des sols saturés sujets à des excitations sismiques montre que la non prise en compte du caractère hétérogène du sol mène à des résultats non conservatifs.

II.2 Variabilité spatiale du mouvement sismique

Afin de comprendre la physique qui gouverne le phénomène de la variabilité spatiale du mouvement sismique, il a été procédé à l'installation de plusieurs réseaux d'enregistrement de mouvements forts. On peut citer le réseau d'El Centro situé au sud de la Californie, formé de 7 stations disposées linéairement sur une distance totale de 312,6m et les réseaux Chiba et Kushio City au Japon. Cependant les études les plus poussées et les plus récentes sur la variabilité spatiale proviennent des réseaux SMART-1 et LSST-Lotung (Large Scale Seismic Test) installés à Taiwan. Le réseau LSST-Lotung présente un grand intérêt pour l'analyse de la variabilité spatiale du mouvement sismique à l'échelle parasismique. Il a été installé par EPRI (Electric Power Research Institute) et TAIPOWER dans le cadre d'un programme international de recherche sur les problèmes de la variabilité spatiale et d'ISS. L'instrumentation en champ libre et en surface du réseau LSST-Lotung est constituée de 15

accelerographes triaxiaux, déployés en 3 branches équi-espacées de 120 degrés à l'intérieur d'un cercle de 100 mètres de diamètre environ.

La caractérisation de la variabilité spatiale du mouvement du sol ainsi que la nature de cette variabilité peut se faire soit par la corrélation soit par la cohérence. La corrélation est une mesure dans le domaine des temps tandis que la cohérence est une mesure dans le domaine des fréquences. Plusieurs études, Loh et al (1982), Harada (1984), Abrahamson (1985,1991) ont montré que la variabilité spatiale du mouvement sismique dépend fortement de la fréquence en plus de la distance de séparation

Pour les processus stochastiques stationnaires, la fonction de cohérence est le rapport de l'inter densité spectrale de puissance en deux stations k et l et la racine carrée du produit des auto densités spectrales de puissance correspondant. Pour deux accélérations $a_k(t)$ et $a_l(t)$, la fonction de cohérence est définie par:

$$\gamma_{kl}(\omega) = \begin{cases} \frac{S_{a_k a_l}(\omega)}{\sqrt{S_{a_k a_k}(\omega) S_{a_l a_l}(\omega)}} & \text{pour } S_{a_k a_k}(\omega) S_{a_l a_l}(\omega) \neq 0 \\ 0 & \text{pour } S_{a_k a_k}(\omega) S_{a_l a_l}(\omega) = 0 \end{cases} \quad \text{I-8}$$

où ω : fréquence angulaire.

$S_{a_k a_k}(\omega)$: l'auto densité spectrale de puissance du processus $a_k(t)$.

$S_{a_k a_l}(\omega)$: l'inter densité spectrale de puissance des processus $a_k(t)$ et $a_l(t)$.

En général, $\gamma_{kl}(\omega)$ est complexe, son module est borné entre zéro et l'unité, c'est une mesure de la dépendance statistique entre les deux processus. ($\gamma_{kl}(\omega)=1$ signifie qu'il y a une dépendance parfaite entre les deux processus, $\gamma_{kl}(\omega)=0$ signifie que les deux processus sont statistiquement indépendant).

L'expression de la fonction de cohérence peut s'écrire:

$$\gamma_{kl}(\omega) = |\gamma_{kl}(\omega)| \exp[i\theta_{kl}(\omega)] \quad \text{I-9}$$

où: $i = \sqrt{-1}$ et $\theta_{kl}(\omega) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[\gamma_{kl}(\omega)]}{\text{Re}[\gamma_{kl}(\omega)]}$ est la phase.

Im : partie imaginaire d'une fonction complexe.

Re : partie réelle d'une fonction complexe.

Il est difficile d'établir un modèle géophysique du processus sismique pour la caractérisation du phénomène de la variabilité spatiale de l'input sismique. Pour des considérations pratiques, le mouvement sismique, de nature aléatoire, peut être modélisé d'une manière probabiliste par un champ aléatoire. Par conséquent, il est raisonnable de supposer que chaque composante de l'accélération sismique constitue un champ aléatoire spatio-temporel homogène. A l'origine de la variabilité spatiale des mouvements sismiques, plusieurs phénomènes sont attribués:

1. Effets d'incohérence regroupant le mécanisme de la rupture de la faille, hétérogénéité du sol et la superposition des ondes arrivant d'une source étendue. Il s'agit de la perte de cohérence que subissent les ondes sismiques au cours de leurs trajet du foyer au site considéré. Cet effet peut être attribué aux différentes réflexions et réfractions (dispersions) qui affectent les ondes sismiques dans le sol, ainsi qu'à la géométrie de la source: principalement, lorsque les ondes sont issues d'une source étendue (faille).
2. Effets de site dus au fait que les conditions locales des profils de sols varient spatialement; par conséquent, les enregistrements correspondant montrent des amplitudes spectrales et des contenus fréquentiels différents.
3. Effets de passage d'onde: il s'agit de la différence des temps d'arrivée de l'onde sismique à deux stations séparées. En général, cet effet est représenté par un modèle dépendant de la fréquence, de la distance entre stations et de la vitesse apparente de propagation de l'onde sismique.
4. L'atténuation due à la géométrie, l'amortissement du sol ainsi que la dissipation réduisent l'amplitude de l'onde sismique. En général, ces effets sont traduits par une fonction liée à la fréquence et la distance parcourue par l'onde à partir de la source.

Der Kiureghian et al (1992) ont développé un modèle théorique de fonction de cohérence qui intègre les différents effets de variabilité spatiale:

$$\gamma_{kl}(\omega, d) = \gamma_{kl}(\omega, d)^{\text{incohérence}} \cdot \gamma_{kl}(\omega, d)^{\text{passage d'onde}} \cdot \gamma_{kl}(\omega, d)^{\text{effet de site}} \cdot \gamma_{kl}(\omega, d)^{\text{atténuation}} \quad \text{I-10}$$

où $\gamma_{kl}^{\text{incohérence}}$:est l'amplitude de la fonction de cohérence tenant compte des effets d'incohérence, obtenue à partir de plusieurs modèles empiriques et théoriques.

$\gamma_{kl}^{\text{passage d'onde}}$:est une phase spectrale décrivant le déphasage des ondes entre deux points du site distants de d . Ce déphasage est estimé, d'une manière déterministe par

$$\gamma_{kl}(\omega, d)^{\text{passage d'onde}} = \exp\left(\frac{-i\omega d}{v_{app}}\right)$$

v_{app} est la vitesse apparente des ondes sismiques

$\gamma_{kl}^{\text{effet de site}}$: est une phase spectrale définie complètement en terme des deux fonctions de transfert $H_k(\omega)$ et $H_l(\omega)$, lesquelles dépendent de la fréquence d'excitation et des caractéristiques géométriques et physiques de la colonne de sol associée à chaque station k et l .

$$\gamma_{kl}(\omega, d)^{\text{effet de site}} = \frac{H_k(\omega)H_l^*(\omega)}{|H_k(\omega)||H_l(\omega)|}$$

Plusieurs investigations théoriques et empiriques ont été menées pour l'étude de la cohérence des ondes. L'installation de denses réseaux d'accélérographes a permis d'étudier et d'analyser le phénomène. En analysant ces données, des modèles stochastiques des fonctions de cohérence ont pu être établis. Il a été remarqué que la cohérence entre deux enregistrements en deux points distincts diminue avec l'augmentation de la distance et la

fréquence. Dans ce contexte, plusieurs modèles de fonctions de cohérence ont été développés, nous citons ci-dessous certains d'entre eux.

Modèle d'Harichandran et Vanmarcke (1986)

Les auteurs ont développé un modèle stochastique isotrope composé d'une somme de deux fonctions exponentielles, et basé sur le facteur décrivant le degré de fluctuation spatiale :

$$\gamma(d, \omega) = A \exp\left[-\frac{2d}{\alpha\theta(\omega)}(1-A+\alpha A)\right] + (1-A) \exp\left[-\frac{2d}{\theta(\omega)}(1-A+\alpha A)\right] \quad \text{I-11}$$

où : $\theta(\omega)$ est le facteur décrivant le degré de fluctuation spatiale, donné par :

$$\theta(\omega) = k \left[1 + (\omega/\omega_0)^b\right]^{-1/2}.$$

Ce modèle possède cinq paramètres empiriques A , α , k , ω_0 et b .

Modèle de Luco et Wong (1986)

En se basant sur le modèle théorique de la cohérence établi par Ulscinski, concernant la propagation des ondes de cisaillement dans un milieu aléatoire, les auteurs ont proposé un modèle simplifié ayant la forme suivante :

$$\gamma(d, \omega) = \exp\left[-\left(\frac{\alpha\omega d}{V_s}\right)^2\right] \quad \text{I-12}$$

où α : est un facteur d'incohérence qui varie entre 0.1 et 0.5.

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

Modèle de Loh et Yeh (1982)

Les auteurs ont proposé un modèle de forme similaire à celui de Luco et Wong (1986) ayant une atténuation relativement faible que ce soit en distance ou en fréquence.

$$\gamma(d, \omega) = \exp\left[-\beta\left(\frac{\omega d}{2\pi V}\right)\right] \quad \text{I-13}$$

avec V : la vitesse de phase (vitesse apparente) de l'onde prédominante.

β : est un paramètre d'incohérence.

Modèle de Somerville et al (1991)

Ce modèle de cohérence présente une décroissance plus importante avec la fréquence qu'avec la distance, et est donné par :

$$\gamma(d, \omega) = \exp\left[-(a + b\omega^2)d\right] \quad \text{I-14}$$

où : a et b sont des constantes caractérisant l'allure de la fonction de cohérence.

Modèle de Hao et al (1989)

En faisant le traitement des accélérogrammes pour deux événements sismiques, Hao et al ont proposé un modèle de forme anisotrope pour la fonction de cohérence. Ce modèle a pour expression :

$$\gamma(\omega, d^L, d^T) = \exp[-(\beta_1 d^L + \beta_2 d^T)] \exp[-(\alpha_1 \sqrt{d^L} + \alpha_2 \sqrt{d^T}) \omega^2] \quad \text{I-15}$$

avec: d^L et d^T sont les distances entre deux points projetées, respectivement, suivant la direction épacentrale et la direction qui lui est orthogonale.

- β_1 et β_2 sont des paramètres pouvant être estimés au voisinage de la fréquence nulle.
- α_1 et α_2 sont des paramètres qui varient plus fréquemment avec la fréquence.

Modèle de Abrahamson et al (1982)

Les auteurs ont analysé plusieurs événements sismiques enregistrés par le réseau d'accélérographes L.S.S.T. (large scale seismic test) dans le but d'examiner les effets de la magnitude et de la distance épacentrale sur la cohérence des ondes. Le réseau L.S.S.T. a permis l'évaluation de la fonction de cohérence pour des distances variant de 6 à 85m. Ils ont remarqué que pour les fréquences inférieures à 5Hz, les événements sismiques de faible magnitude admettent une cohérence relativement faible par rapport à celle des événements sismiques de forte magnitude, alors qu'aux fréquences variant de 6 à 10Hz, c'est le contraire qui apparaît. De plus, la fonction de cohérence montre une décroissance plus rapide avec la fréquence qu'avec la distance. Le modèle empirique développé a la forme suivante :

$$\gamma(d, \omega) = \text{Tanh}\left\{(a_1 + a_2) \left[\exp[(b_1 + b_2 d)\omega] + \omega^c / 3 \right] + k \right\} \quad \text{I-16}$$

où: a_1, a_2, b_1, b_2 et c sont les paramètres du modèle.

k est un paramètre caractérisant le niveau du bruit parasite existant lors du traitement et peut être estimé à partir des valeurs de la fonction de cohérence aux hautes fréquences ($f > 50\text{Hz}$).

Menke et al (1991)

$$\gamma(d, \omega) = \exp(-\alpha f d) \quad 0.4 \leq \alpha \leq 0.7 \cdot 10^{-3} \text{ (s.m}^{-1}\text{)} \quad \text{I-17}$$

Nadim et al (1991)

$$\gamma(d, \omega) = \exp\left(-\frac{\beta f d}{V_s}\right) \quad \beta = 0.48 \quad \text{I-18}$$

Zerva et Harada (1987) ont proposé une formulation basée sur une modélisation aléatoire du sol pour identifier le paramètre d'incohérence α , généralement calculé à partir des enregistrements sur le site. Ils trouvent:

$$\alpha = \sigma_{ff} \frac{P}{\xi_0 \omega_0 b} \sqrt{\frac{3(1 + 4\xi_0^2)}{2(\beta^2 + 4\xi_0^2)}} \quad \text{I-19}$$

Avec P : facteur de participation, ξ_0 : facteur d'amortissement de la couche, b : longueur de corrélation, ω_0 : fréquence propre moyenne de la couche, σ_{ff} : écart type de la fréquence propre du sol.

III ANALYSE DES EFFETS DE LA VARIABILITE SPATIALE DES CARACTERISTIQUES MECANQUES DU SOL SUR LA REPOSE DES STRUCTURES

III.1 Cas Statique

La prévision des tassements et dévers des ouvrages est une opération délicate. A titre d'exemple, des études sur la sécurité des centrales nucléaires en France ont montré que le tassement mesuré est trouvé quatre fois supérieur aux prévisions. La surestimation du tassement et du dévers cause d'importants surcoûts, et leur sous-estimation peut provoquer de graves désordres, et dans certains cas l'arrêt de l'exploitation des ouvrages.

Quelques auteurs ont publié des travaux concernant l'intégration de la variabilité spatiale dans l'estimation du tassement ou de la capacité portante des fondations. Nous classifions ces travaux suivant les thèmes traités :

Estimation du tassement par la méthode des éléments finis stochastiques, Beacher (1981) : L'auteur discrétise un radier par un maillage d'éléments finis bidimensionnels. Il étudie le cas où la moyenne du module élastique du milieu est constante suivant la profondeur et le cas où elle varie avec le carré de la profondeur. L'auteur suit l'évolution du coefficient de variation du tassement et du dévers en fonction de la distance d'autocorrélation normalisée par rapport à la dimension du radier. Il remarque une augmentation de la dispersion des tassements calculés lorsque la distance d'autocorrélation augmente et une dispersion maximale du dévers pour une distance d'autocorrélation comprise entre 50 et 100% de la longueur du radier.

Rôle de la variabilité spatiale des paramètres du sol sur la capacité portante des fondations superficielles, Genevois (1984) : L'auteur s'intéresse à l'effet de la variabilité spatiale des paramètres du sol, module élastique E et angle de frottement ρ , sur la capacité portante des fondations superficielles. Les valeurs moyennes, la dispersion et les distances de corrélation de ces paramètres suivent des lois normales. L'évolution de la dispersion de la capacité portante en fonction de celle de E et du coefficient de corrélation entre E et ρ met en évidence une augmentation considérable de la dispersion de la capacité portante.

Influence de la variabilité des propriétés des sols sur les calculs des tassements de fondations, Boulefkhad (1986) : Dans le cadre des travaux de thèse de Doctorat, l'auteur calcule le tassement d'un radier circulaire. Il étudie entre autre l'influence de la distance d'autocorrélation sur la dispersion du tassement. Quatre cas ont été distingués en fonction de la méthode de tirage des nombres aléatoires (linéarisation ou simulation) et du rapport de la distance d'autocorrélation horizontale par rapport à la distance d'autocorrélation verticale.

Approche probabiliste en mécanique des sols avec prise en compte de la variabilité spatiale, Bolle (1988) : Les travaux de l'auteur s'articulent autour du calcul du tassement et du basculement d'une pile de pont fondée sur un massif rocheux. L'approche probabiliste a permis de mettre en évidence l'effet de la dispersion des caractéristiques mécaniques sur le comportement de la pile. A partir des résultats obtenus, l'auteur conclut que la variation

spatiale du module élastique a un effet prépondérant sur les rotations de la semelle.

Intégration de la variabilité spatiale dans l'estimation probabiliste du tassement et du dévers de grands ouvrages, Antoinet (1995) : Pour cerner l'influence de la variabilité spatiale sur l'estimation du tassement, l'auteur s'intéresse au tassement et au dévers de la centrale de Nogent sur Seine (en France). Il intègre les deux formes principales de la variabilité spatiale, celle relative à la position et à la forme des horizons (variabilité stratigraphique), et celle des propriétés mécaniques à l'intérieur de ces horizons (variabilité mécanique), la deuxième forme est intégrée quand les propriétés mécaniques sont fortement variables dans l'espace, où la première forme s'avère insuffisante pour une bonne analyse des risques de tassement et dévers. L'auteur utilise les données de campagne de reconnaissances géologiques et géotechniques et estime une loi de comportement élastique isotrope pour chaque matériau. Il utilise des méthodes de simulations géostatistiques pour construire des champs des modules de cisaillement. Il calcule alors à l'aide d'un code de calcul de tassement par éléments finis 3D, le tassement et le dévers en fonction de la longueur de corrélation, il démontre aussi, l'influence de cette longueur sur ces paramètres (tassement et dévers). Une étude de sensibilisation sur les paramètres des simulations conclut sur l'influence de la portée sur la dispersion des tassements et dévers. Le cas le plus défavorable pour le dévers correspond à une longueur de bâtiment égale à trois fois la longueur de corrélation du sol. Le nombre de simulations nécessaire pour que les résultats (moyennes de tassement et dévers) se stabilisent, varie en fonction des paramètres structuraux. Il est en général de l'ordre de 50 à 70 simulations.

Ces différents travaux démontrent l'intérêt d'intégrer la variabilité spatiale dans l'estimation du tassement. Cependant, ces travaux sont limités dans le cas d'ouvrages importants comme les îlots nucléaires, étant donné que: (i) la modélisation de la variabilité est faite à partir de modèles simples basés sur la variabilité verticale mesurée in-situ; ces campagnes de reconnaissance sont limitées et ne permettent pas de déterminer les caractéristiques mécaniques dans la direction horizontale ; (ii) les simulations utilisées pour les calculs de tassement ne sont pas conditionnées aux mesures, cependant, il est nécessaire de ne retenir, parmi les simulations possibles, que celles qui retrouvent les valeurs expérimentales en leurs points d'implantation, on parle de Simulation Conditionnelle.

III.2 Cas dynamique

Durant notre étude bibliographique, nous avons constaté un manque dans la littérature concernant les analyses sur les effets de la variabilité spatiale des caractéristiques mécaniques du sol sur les réponses des structures. Néanmoins, nous pouvons citer les travaux fort intéressants de F.Toubalem (1996). Dans le but d'établir et de valider des modèles d'interaction sol-structure, intégrant l'aspect hétérogène du sol, et d'en faire ressortir des paramètres clefs influants sur le phénomène en ce milieu, l'auteur élabore l'étude d'un ouvrage, représentatif d'un bâtiment réacteur à l'échelle 1/4, sur le site d'Hulian à Taiwan (site instrumenté par un réseau dense). La démarche porte sur les modèles de systèmes discrets et continus.

a) Modèles discrets

Le système sol-structure est modélisé par une fondation de Winkler, dont les propriétés mécaniques varient aléatoirement dans l'espace. Ce modèle déjà utilisé [Chen et Wada (1977), L.Meirovitch et G.Ryland (1980), Y.H.Song (1993), A.K.Chopra (1984)], consiste en une fondation qui repose sur un continuum de ressorts. Celle-ci est soumise à une

excitation verticale. L'auteur suppose que les rigidités du modèle proposé fluctuent autour d'une valeur moyenne et sont rattachées à des données statistiques (écart type et fonction d'inter corrélation). Il utilise les deux fonctions d'inter-corrélation fréquemment employées dans la littérature, les fonctions de corrélation de type Exponentielle et Gaussienne.

L'étude consiste à exprimer analytiquement les moments statistiques de la réponse en fréquence et les modes propres du système en fonction des paramètres stochastiques du problème. L'auteur introduit alors un paramètre adimensionnel 'u', rapport de la longueur de la fondation sur la longueur de corrélation, $u = \frac{L}{r_0}$ (r_0 : longueur de corrélation du milieu, L : longueur de la fondation).

Dans le cas hétérogène, les modes propres sont donnés au moyen de la méthode de perturbation développée au premier ordre. Cette méthode a l'avantage de donner des expressions explicites des valeurs et vecteurs propres. La dispersion de la rigidité du milieu est exprimée comme suit :

$$\underline{\underline{K}} = \underline{\underline{K}}_0 + \underline{\underline{\Delta K}} \quad \text{I-20}$$

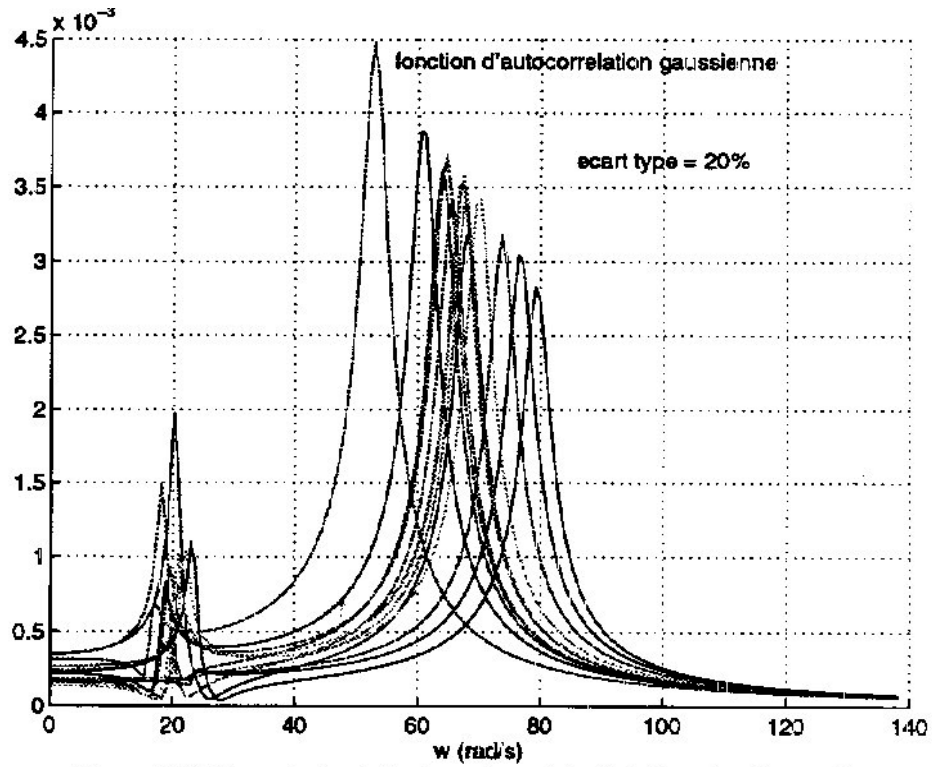
Avec k_0 : moyenne des rigidités aléatoires, et Δk est la dispersion autour de la moyenne.

Après calculs, l'auteur constate que la prise en compte de l'aléa dans les caractéristiques mécaniques du sol a pour effet d'établir un couplage au niveau des modes ; le facteur de participation associé au mode de balancement n'est plus nul, contrairement au cas du continuum homogène. Dans ce dernier cas, le substratum rocheux est soumis à une excitation verticale, et les facteurs de participation correspondant respectivement au mode de pompage et de balancement sont alors $P_{01} = 1$ et $P_{02} = 0$. L'auteur retrouve tout comme en statique la valeur particulière de u , proche de 3 qui rend maximum l'effet du pic de balancement inexistant pour un modèle de continuum homogène. Il constate aussi qu'il n'y a pas de différences sensibles selon le choix de la fonction d'autocorrélation.

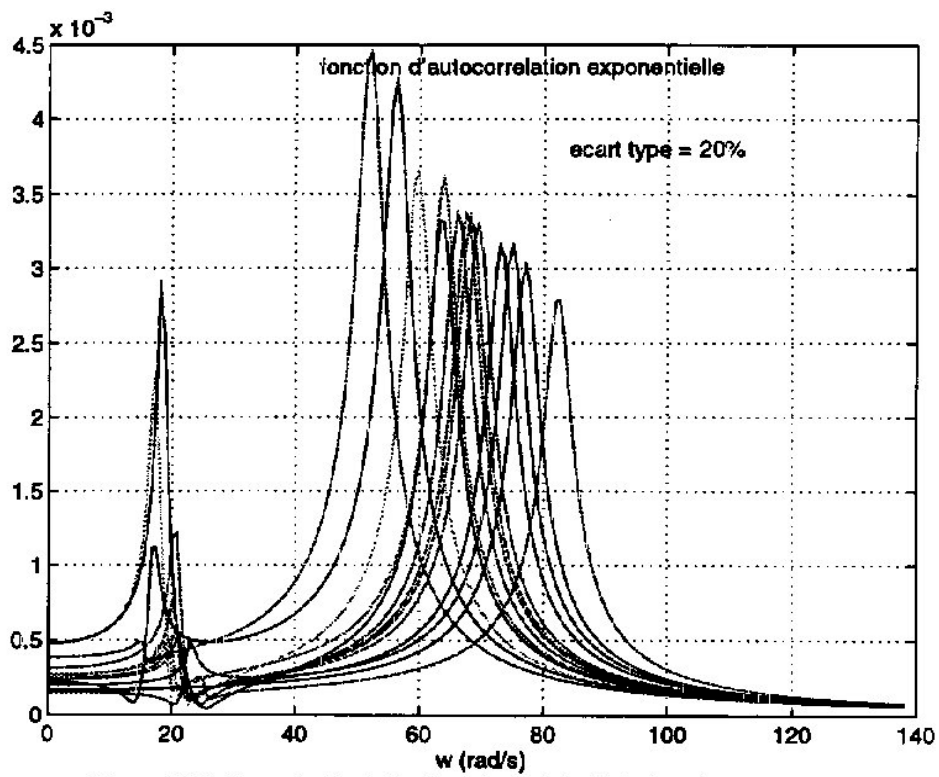
Pour finir l'auteur s'intéresse à une approche de simulation de fonctions de transfert. Il génère des matrices de rigidité pour chaque réalisation du milieu, et calcule la fonction de transfert entre l'accélération absolue à la base du continuum de ressorts et la structure. Les courbes de la figure (I-1) représentent quelques modules de fonctions de transfert choisies arbitrairement, respectivement pour une fonction d'autocorrélation Exponentielle et Gaussienne. L'auteur retrouve aussi un effet de couplage entre les deux modes bien que la sollicitation soit verticale. Il calcule par la suite la moyenne et l'écart type pour chaque pulsation ; il constate que, en comparant la moyenne des fonctions de transfert avec la courbe associée à un milieu homogène, l'amplitude est nettement plus abaissée (de près de 40%).

b) Modèles continus

Pour établir un lien entre le modèle de fondation de Winkler et le modèle du continuum de colonnes, l'auteur considère un modèle d'interaction sol-structure constitué par un continuum de colonnes hétérogènes. Dans ce modèle, l'auteur retrouve encore une fois la notion d'amortissement équivalent interprété par un effet d'atténuation. Cependant, l'auteur se demande si la seule explication de ce phénomène d'atténuation n'est pas purement statistique.



(a)



(b)

Figure (I-1): Exemple de réalisations de module de fonction de transfert (F. Toubalem, 1996)
 (a) fonction d'autocorrelation exponentielle, (b) fonction d'autocorrelation Gaussienne.

IV ANALYSE DES EFFETS DE LA VARIABILITE SPATIALE DU MOUVEMENT SISMIQUE SUR LA REPOSE DES STRUCTURES

Dans le paragraphe précédent, nous avons exposé des études théoriques concernant la prise en compte de l'aspect stochastique, intrinsèques aux caractéristiques mécaniques du sol, de modèles discrets et continus très simples. Cette démarche a permis à ses initiateurs de retrouver, à moindre coût numérique, des résultats considérables sur le plan physique, notamment le rapport critique de la longueur de corrélation du sol et la longueur de la fondation. Cependant d'autres travaux se sont intéressés à la variabilité des mouvements sismiques et à ses effets sur la réponse de la structure qui n'est en fait que le résultat d'une variabilité spatiale des caractéristiques mécaniques du sol.

Cependant l'une des difficultés majeures pour l'analyse sismique des structures soumises à des excitations d'appuis multiples est la caractérisation de l'input sismique. La caractérisation de chaque excitation passe par l'analyse de plusieurs phénomènes de modification du signal sismique par des conditions de site, d'effet de passage d'onde, et de perte de cohérence. Cette analyse donnera l'excitation qui animera chaque appui.

Des enregistrements de mouvements forts dans des réseaux denses [Tamura et al (1977), Tsuchida et al (1977), Bycroft (1980), Smith et al. (1982), King (1981), Tucker (1982), Bolt et al. (1981, 1982), Hoshiya et Ishii (1982, 1983)] révèlent l'existence d'une variabilité spatiale du mouvement sismique même sur des distances faibles. Celle-ci peut avoir des effets importants sur les réponses des structures sur fondations suffisamment étendues. La prise en compte des effets associés à la variabilité spatiale du mouvement sismique peut conduire à une réduction de la translation au niveau de la fondation et à l'apparition de mouvement de rocking et de torsion.

Le mouvement sismique varie d'un point à un autre à la surface libre. Cette variabilité est due: (i) à l'incidence inclinée (non verticale) de l'onde sismique ou effet de passage d'onde, (ii) au mécanisme à la source et au phénomène de génération de l'onde sismique (les ondes arrivent de plusieurs points d'une source étendue avec des amplitudes et des directions différentes), (iii) à l'hétérogénéité du milieu sol. Les effets du premier facteur cité (effet de passage d'onde) sur les réponses des fondations et les structures ont fait l'objet de plusieurs études [Newmark (1969), Luco (1976), Luco et Wong (1971) et (1982), Wong et Luco (1978), Luco et Sotiropoulos (1980)].

Plusieurs approches ont été proposées pour estimer les effets de la variabilité spatiale du mouvement sismique sur la réponse des fondations étendues. L'ensemble des résultats [Smith et al (1982), King (1981), King et Tucker (1982), Luco (1976), Luco et Wong (1977) et Wong et Luco (1978), Luco et Wong (1986)] montrent une réduction du mouvement de translation, et des mouvements additionnels de rotation et enfin un filtrage des hautes fréquences de la composante de translation du mouvement.

Durant ces dix dernières années, plusieurs auteurs [Harichandran (1988), Berrah et Kausel (1992), Hao (1996), Laouami et Labbé (1996), Der Kiureghhan et Neuenhoffer (1992), Hao (1991), Pais et Kausel (1990)] ont investi l'étude et le développement de modèles de la variabilité spatiale des mouvements sismiques et son influence sur la réponse de la structure. Certains calculs numériques ont été établis pour examiner l'amplitude de cette réduction, et d'autres se sont concentrés sur l'influence des phénomènes d'incohérence et de passage d'ondes sur les mouvements de rotation (rocking et torsion).

Harichandran (1988) considère un modèle de structure à un degré de liberté, soumis à un champ aléatoire $X(x_1, x_2, t)$ défini à la surface du sol. l'auteur conclut que la réduction de la translation (au niveau de la structure) est beaucoup plus importante pour les structures à hautes fréquences. Pour des vitesses de propagation importantes ($v=3600\text{m/s}$), la réduction du mouvement est due principalement à l'incohérence du mouvement sismique. Cependant, pour des faibles vitesses (1000 m/s), aussi bien l'effet d'onde que l'effet d'incohérence sont responsables de la réduction du mouvement sismique.

D'autres auteurs se sont intéressés aux effets induits par la variabilité spatiale du mouvement sismique, tels que les mouvements de torsion et de rocking à la surface du sol et l'analyse de leurs effets sur la réponse des structures. Newmark (1969), Tsao et Tsu (1978) ont proposé des méthodes pour l'estimation de la torsion induite par l'effet de passage d'onde seulement. Oliviera et Bolt (1989) ont estimé les mouvements de torsion à partir des mouvements de translation enregistrés par le réseau SMART-1. Hao (1996), se basant sur le réseau SMART-1 et une formulation stochastique (Figure I-2), a proposé un spectre de torsion qui prend en compte l'incohérence du mouvement sismique. Cette dernière influe d'une façon significative sur l'amplitude du spectre.

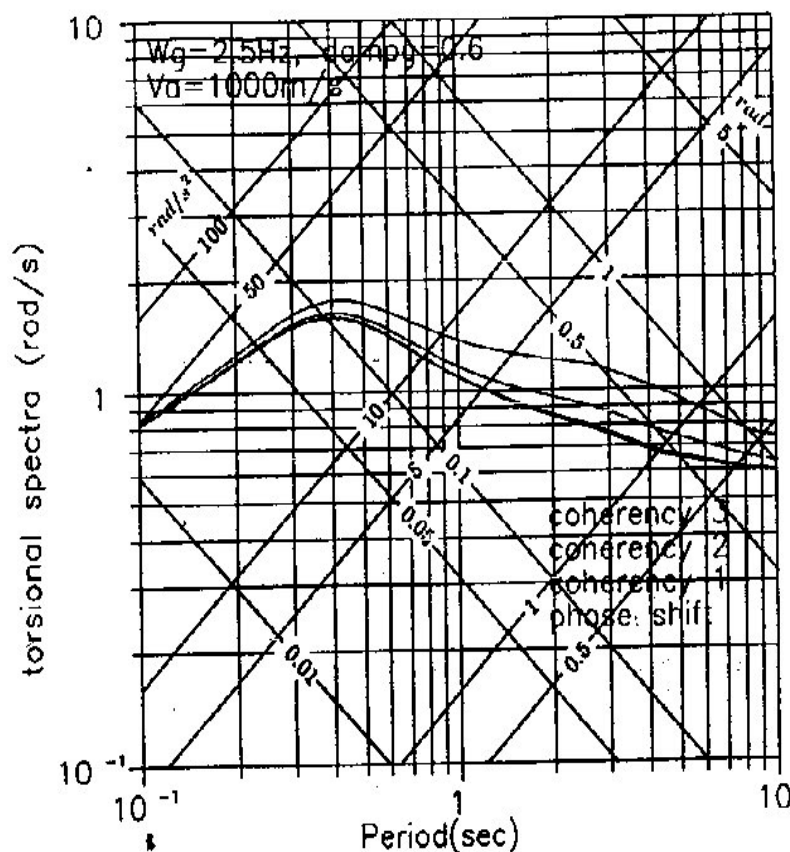


Figure (I-2): Spectre de réponse en torsion correspondant à différentes fonctions de cohérence (Hao, 1996)

Dans le cadre du programme expérimental, LSST-Lotung, N.Laouami (1996) considère l'étude de la réponse d'une structure sur ce site. La structure qui fait l'objet de cette étude est une maquette de bâtiment cylindrique représentative d'une centrale nucléaire à l'échelle 1/4. Le couplage entre le sol et la structure est modélisé par le biais d'impédances. Pour une excitation horizontale, le système possède deux degrés de liberté, le déplacement latéral et l'amplitude de rocking. L'étude est menée dans le cas d'événement fort et le cas d'événement faible. L'auteur applique le modèle de lacet (rotation autour d'un axe vertical) adimensionnel obtenu en champ libre comme sollicitation à la base de la structure. Néanmoins, pour tenir compte de la présence de la fondation dans le sol, il introduit la notion d'empattement équivalent. Les résultats montrent que l'effet de lacet produit une réponse en torsion de la structure, aussi bien dans le cas d'événements faibles que dans le cas d'événements forts. Pour l'étude de l'effet de roulis, des spectres de réponse calculés à la base et au toit de la structure, sous la sollicitation horizontale seule ont été déterminés. D'autres spectres ont été calculés en superposant les deux composantes, horizontale et de roulis. Il a été montré (figures I-3et I-4) que la composante de roulis apporte une contribution significative à la réponse de la structure en rocking dans le cas de l'événement faible. Cette contribution devient négligeable dans le cas d'événements forts. Cela est interprété par le fait que l'amplitude de la sollicitation sismique de translation horizontale, dans le cas des événements forts, provoque une amplitude de rocking au niveau de la structure supérieure à celle provoquée par la composante de roulis. L'auteur conclut que les effets de rocking induits par la composante de roulis ne sont pas proportionnels à l'amplitude de l'événement sismique, alors que ceux induits par la composante sismique de translation le sont. En d'autres termes, les effets de rocking associés aux événements faibles ne sont pas extrapolables aux événements forts.

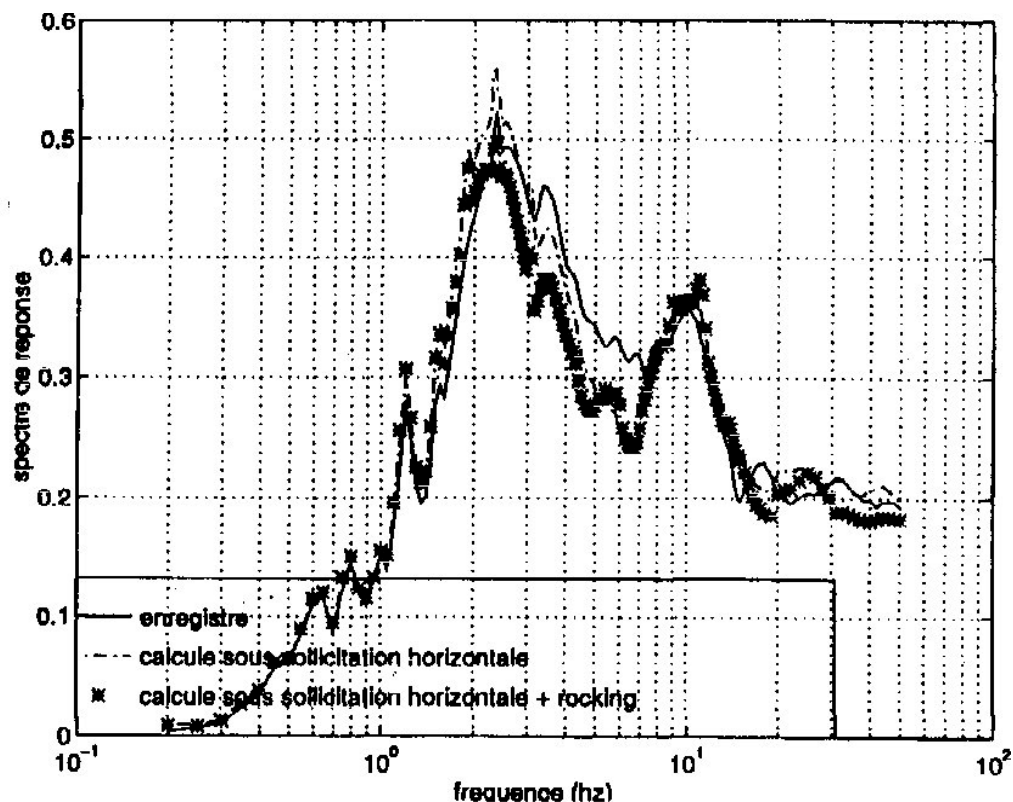


Figure I-3 : Comparaison entre le spectre de réponse à la base de la structure dans le cas de l'événement fort : (a) calculé sous sollicitation horizontale, (b) calculé sous sollicitation horizontale et de roulis, et (c) enregistré. (N.Laouami,1996)

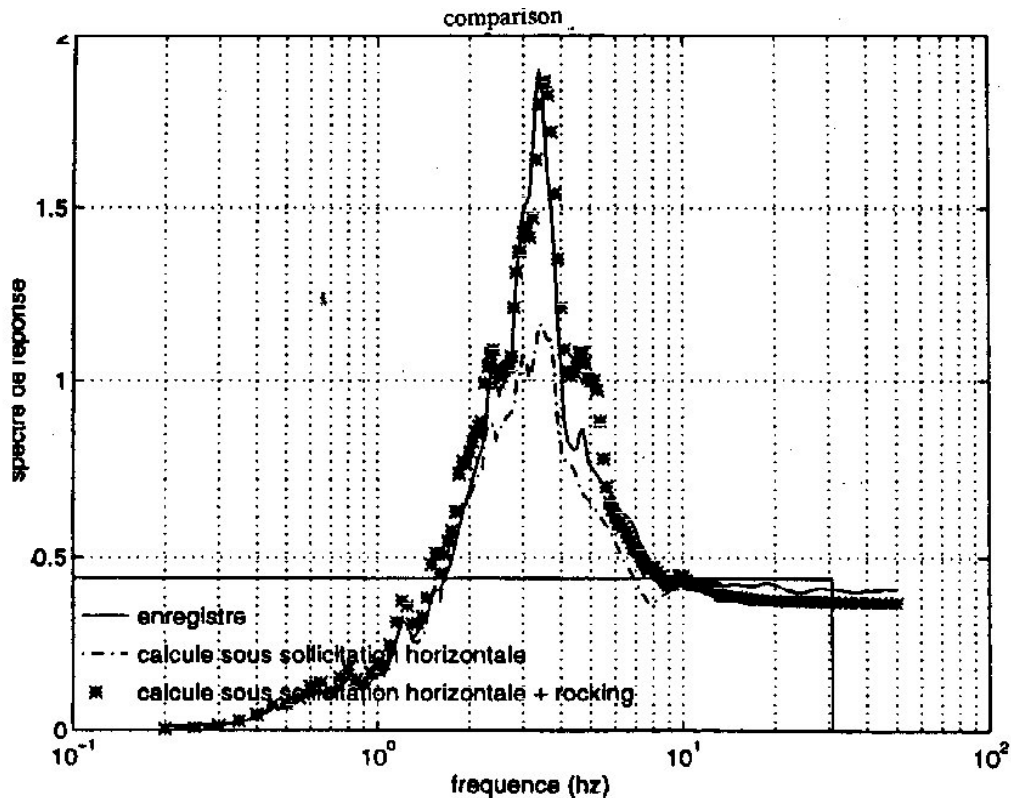


Figure I-4 : Comparaison entre le spectre de réponse à la base de la structure dans le cas de l'événement faible : (a) calculé sous sollicitation horizontale, (b) calculé sous sollicitation horizontale et de roulis, et (c) enregistré. (N.laouami,1996)

Dans la pratique des ingénieurs, le mouvement sismique est spécifié en terme de spectre de réponse, d'où le désir de développer des méthodes d'analyse basées sur les spectres de réponse pour spécifier l'input sismique tout en tenant compte de son aspect variable. Des recherches ont été faites dans ce sens, nous citons:

Berrah et Kausel (1990,1992), ont proposé un modèle de spectre de réponse modifié accompagné d'une règle de combinaison modale, ce qui constitue une approche adaptée aux situations d'input sismique variable spatialement. La procédure de modification est basée sur l'ajustement de chaque valeur spectrale du spectre de réponse classique (cas uniforme) moyennant un facteur correctif dépendant de la structure et du phénomène de propagation des ondes.

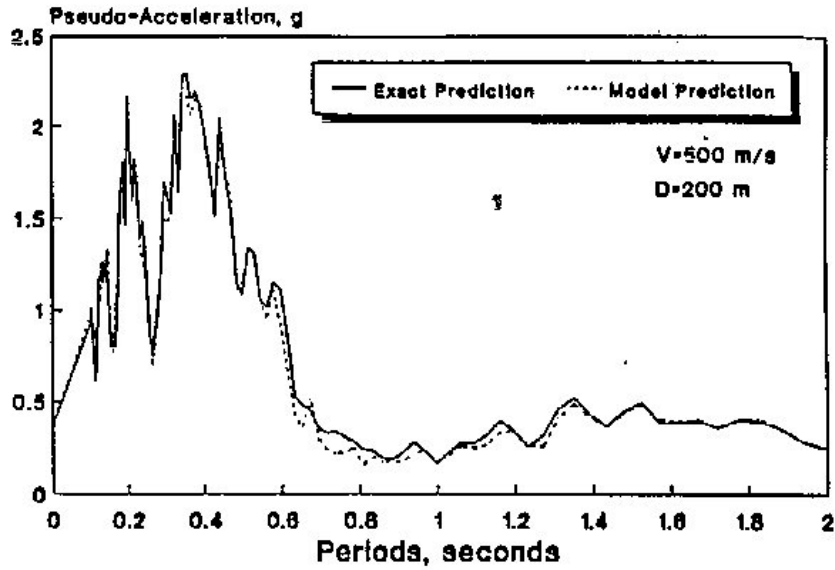


Figure I-5 : Comparaison entre les résultats du modèle propose et les résultats de simulation (Berrah et al, 1992)

Slimani (1997) étudia l'effet de la corrélation partielle entre les excitations au niveau des supports sur la réponse des ponts. Les résultats révèlent que les déplacements sont généralement surestimés dans le cas d'excitations uniformes par rapport au cas d'excitations variables. Quant aux efforts internes, moments fléchissants et efforts tranchants, ils sont sous-estimés dans le cas de poutre à deux travées rigide sur un sol flexible.

Der Kiureghian et Neuenhoffer (1992) développèrent l'analyse des structures étendues à plusieurs d.d.l et à multiples supports. Leur développement tient compte des trois phénomènes responsables de la variabilité spatiale du mouvement sismique, à savoir : l'effet de passage d'onde, effet de perte de cohérence et effet local. Ils adoptent le modèle de cohérence suivant:

$$\gamma_{kl} = \exp\left[-\left(\frac{\alpha \omega d_{kl}}{v_s}\right)\right] \exp\left[-\left(\frac{i \omega d_{kl}^L}{v_{app}}\right)\right] \tag{I-21}$$

α : facteur d'incohérence généralement identifié à partir des enregistrements sur le site.

d_{kl} : distance horizontale entre les stations k et l.

v_s : Vitesse de cisaillement de l'onde sismique, et v_{app} : vitesse apparente de l'onde.

$\exp\left[-\left(\frac{\alpha \omega d_{kl}}{v_s}\right)\right]$: exprime la perte de cohérence.

$\exp\left[-\left(\frac{i \omega d_{kl}^L}{v_{app}}\right)\right]$: exprime l'effet de déphasage.

Ce modèle suppose que :

- la perte de cohérence augmente avec la fréquence ω et la distance de séparation d_{kl} .
- le déphasage est une fonction linéaire de la fréquence.

Une étude paramétrique a été menée pour les coefficients d'inter-corrélation entre les supports et entre les réponses modales. Il a été procédé ensuite à l'analyse de deux cas de poutres, rigides et flexibles, et il a été constaté que le moment fléchissant pouvait être sous-estimé, dans le cas d'un mouvement uniforme, pour une poutre rigide en tenant compte d'une perte de corrélation rapide.

Hao et al. (1991) suggèrent un modèle bidimensionnel de cohérence, basé sur des données enregistrées par le réseau SMART-1. Dans leur étude, les auteurs analysent un plancher rigide supporté par 4 colonnes, et soumis à des excitations multiples. En utilisant la méthode des vibrations aléatoires, les auteurs concluent que les réponses translationnelles sont surestimées quand on néglige l'effet de perte de cohérence ou l'effet de déphasage. Par contre, l'effet de sollicitations multiples sur les déplacements quasi-statiques de rotation est dominé par la perte de cohérence. Par ailleurs, les réponses en translation dynamique sont toujours réduites en présence d'une sollicitation multiple. Ces réponses sont généralement surestimées en négligeant l'effet d'incohérence. Les réponses rotationnelles dynamiques sont quant à elles sous-estimées en négligeant le déphasage et sont quelques fois sous-estimées et d'autres fois surestimées en négligeant l'effet de perte de cohérence. Enfin, d'une façon générale, la méthode classique (cas de mouvements uniformes) surestime les réponses totales de translations et sous-estime les rotations. Dans ce chapitre, nous pouvons citer d'autres auteurs qui sont arrivés à des résultats similaires, à savoir Zerva et al. (1988), Zerva (1990), Harichandran, Wang (1988, 1990) et Pais et Kausel (1990).

V. CONCLUSION

Pour répondre aux exigences rigoureuses de sécurité imposées à la conception d'ouvrages importants, et les risques induits par une variabilité spatiale du mouvement sismique et des caractéristiques mécaniques du sol, les méthodes d'analyses dynamiques des structures ont connu un essor considérable ces dernières années. Une multitude de recherches, dont quelques-unes présentées dans le présent travail, ont été accomplies dans ce domaine .

Aussi la recherche bibliographique que nous avons menée s'articule autour des effets de la variabilité spatiale des caractéristiques mécaniques du sol ainsi que des mouvements sismiques sur la réponse de la structure. Elle consiste en :

1. L'analyse des effets de la variabilité spatiale du mouvement sismique et des caractéristiques mécaniques du sol sur la réponse de celui-ci.
2. L'analyse des effets de la variabilité spatiale des caractéristiques mécaniques du sol sur les réponses des structures.
3. L'analyse des effets de la variabilité spatiale des mouvements sismiques sur les réponses des structures.

Nous constatons l'abondance de références bibliographiques ayant trait à la variabilité spatiale des mouvements sismiques et leurs effets sur les réponses des structures, contrairement à

celles relatives aux analyses des effets de la variabilité spatiale des caractéristiques mécaniques du sol.

Les conclusions auxquelles nous avons abouti à travers ces deux types d'analyses peuvent être résumées comme suit :

- On ne peut plus parler d'un spectre de calcul réalisé à l'aide d'une excitation uniforme à la base de la structure mais d'une variabilité spatiale du mouvement sismique.
- Les origines de la variabilité spatiale peuvent être regroupées en : effet d'incohérence, effet de passage d'onde, effet de site et effet d'atténuation.
- La variabilité spatiale induit en général une réduction du mouvement de translation, des mouvements additionnels de rotation de lacet et de roulis.

A partir de cette étude, les différents paramètres généralement influençant le problème d'interaction sol-structure en milieu hétérogène sont :

- Le contenu fréquentiel de l'excitation sismique, autrement dit la nature du sol de fondation,
- La rigidité de la structure,
- L'Angle d'incidence de l'onde (ou bien vitesse apparente du milieu),
- Le rapport de la distance de corrélation du milieu aléatoire sur la largeur de la fondation ainsi que l'écart type du milieu,
- La largeur de la fondation,
- L'amplitude de l'excitation.

FORMULATION DES PROBLEMES D'INTERACTION SOL-STRUCTURE

I. INTRODUCTION

Les premières formulations utilisées pour la détermination de la réponse d'une structure ont été basées sur l'hypothèse de la rigidité infinie du sol supportant la structure. Aussi, l'action mutuelle sol-structure n'était pas prise en compte dans les calculs et les résultats obtenus s'avèrent loin de la réalité, en particulier dans le cas de sols déformables.

Soit une force dynamique de type sismique, appliquée directement dans le sol aux alentours de la structure. On entend généralement par interaction sol-structure la modification du mouvement du sol ou de la structure lors d'un séisme (figure II-1), du fait de la présence de l'autre (structure ou sol). En effet, de nombreuses études [R.W.Clough et J.Penzien(1975), A.Pecker (1984), J.P.Wolf (1985)] ont démontré que lorsqu'une structure est soumise à une sollicitation sismique, les efforts engendrés créent une variation des contraintes dans le sol de fondation. De ce fait, deux types d'interaction se produisent entre le sol et la structure:

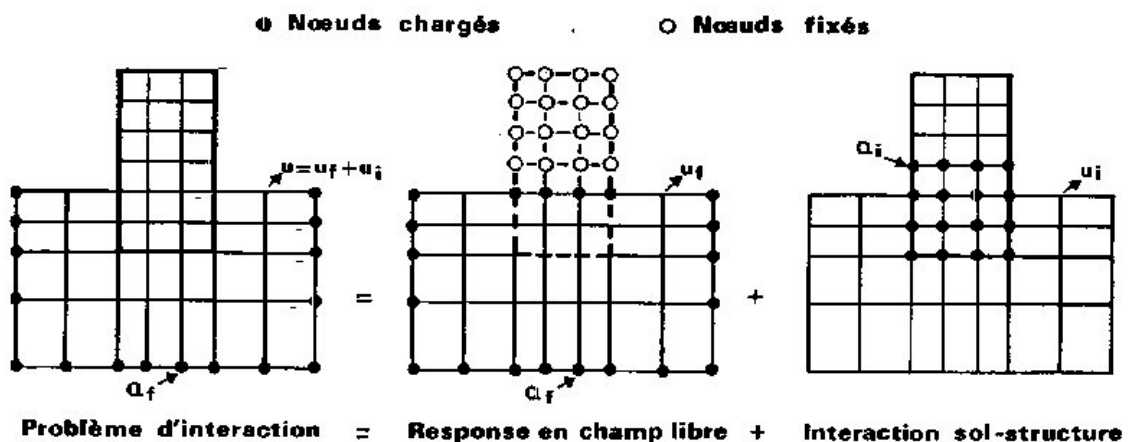


Figure (II-1): Théorème de superposition pour l'interaction sol-structure.

L'interaction cinématique : dans le cas des excitations sismiques, un effet supplémentaire peut survenir. Étant donné la présence de la fondation rigide, celle-ci ne se conforme pas aux distorsions du sol causées par les ondes sismiques incidentes (figure II-2). La structure se présente alors comme un objet opaque ou réfléchissant sur le chemin de l'onde, produisant ainsi une dispersion du champ d'ondes qui modifie localement le mouvement au voisinage de la fondation. Cet effet est connu sous le nom «d'interaction cinématique».

L'interaction inertielle : dans une première situation, les effets de l'interaction sol-structure se présentent uniquement comme le résultat de forces extérieures et d'inerties transmises à un sol se pliant aux efforts imposés, on attribue à ceci le nom «d'interaction inertielle». L'énergie mécanique transmise alors au sol se propage à partir de la structure sous forme d'ondes de contraintes.

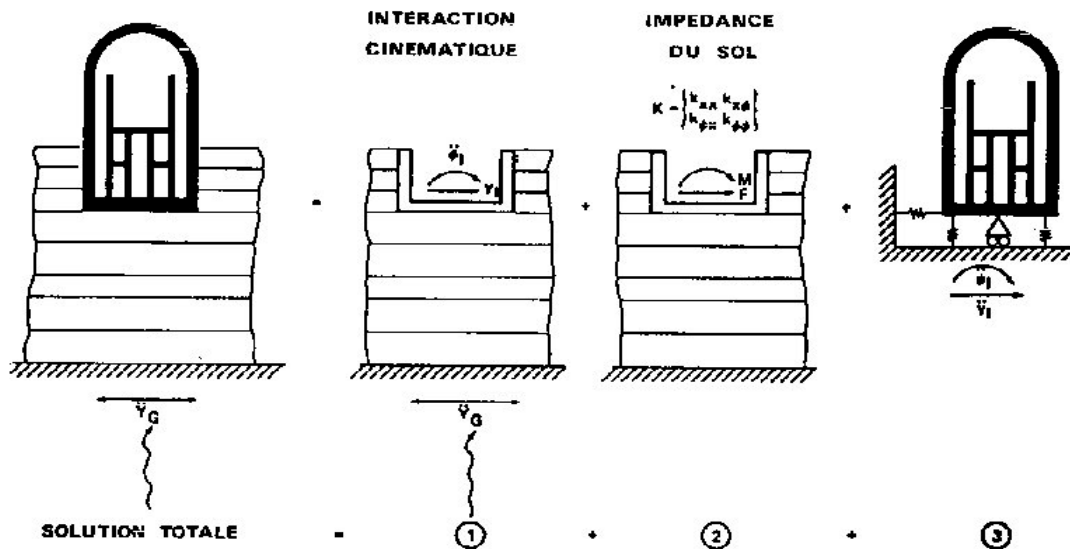


Figure (II-2): Théorème de superposition de Kausel

Désignons par $[M]$, $[K]$ et $[C]$ respectivement les matrices de masse, de rigidité et d'amortissement du système sol-structure, l'équation du mouvement est donnée par:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{Q_f\} \quad \text{II-1}$$

avec : $\{Q_f\}$: vecteur excitation sismique; $\{\ddot{U}\}$, $\{\dot{U}\}$, $\{U\}$: sont respectivement les vecteurs réponses en accélération, en vitesse et en déplacement du système sol-structure.

En l'absence de la structure, l'équation du mouvement en champ libre est similaire à l'équation (II-1), l'indice f désigne les matrices de masse, de rigidité et d'amortissement relatives au champ libre. Cette équation s'écrira alors :

$$[M_f]\{\ddot{U}_f\} + [C_f]\{\dot{U}_f\} + [K_f]\{U_f\} = \{Q_f\} \quad \text{II-2}$$

En insérant la structure dans le sol, le mouvement en champ libre est modifié par la présence de la fondation. Le déplacement total du système sol-structure est la somme du

déplacement en champ libre et du déplacement dû à l'interaction sol-structure. D'après le principe de superposition, on a :

$$\{U\} = \{U_i\} + \{U_f\} \quad \text{II-3}$$

Le déplacement dû à l'interaction, $\{U_i\}$, doit satisfaire l'équation suivante :

$$[M_i]\{\ddot{U}_i\} + [C_i]\{\dot{U}_i\} + [K_i]\{U_i\} = \{Q_i\} \quad \text{II-4}$$

avec:
$$\{Q_i\} = [[M] - [M_f]]\{\ddot{U}_f\} + [[K] - [K_f]]\{U_f\} + [[C] - [C_f]]\{\dot{U}_f\} \quad \text{II-5}$$

L'équation (II-5) démontre que l'influence de l'interaction sol-structure sur la réponse du système est d'autant plus grande que la différence entre la rigidité et la masse de la part excavée du sol et celle de la fondation, est importante. En négligeant l'amortissement pour le cas d'une fondation superficielle infiniment rigide, le dernier terme de l'équation (II-5) s'annule, et le vecteur $\{Q_i\}$ devient :

$$\{Q_i\} = [[M] - [M_f]]\{\ddot{U}_f\} \quad \text{II-6}$$

Ces forces excitatrices, à la base de la structure sont alors équivalentes à des forces d'inerties dans la structure. Celles-ci engendrent l'interaction inertielle. Dans le cas où l'on supposerait une structure enterrée dont la masse est égale à celle du sol excavé, les forces $\{Q_i\}$ sont données par :

$$\{Q_i\} = [[K] - [K_f]]\{U_f\} \quad \text{II-7}$$

Celles-ci résultent de la différence de rigidité entre la partie excavée du sol et celle de la structure enterrée. Ceci correspond à l'interaction cinématique.

De l'équation (II-6) et (II-7), on déduit que l'effet d'interaction sol-structure se manifeste essentiellement, quand il s'agit de structures massives et rigides insérées dans un sol flexible. Dans le cas contraire (structures souples sur sol rocheux), on ne parle que d'interaction inertielle. Pour les structures massives fondées sur sol flexibles, les effets d'interaction sol-structure sont très importants. Nous distinguons:

Les effets défavorable : La présence de la structure modifie le contenu fréquentiel du mouvement sismique à la base. Cette modification consiste à filtrer les hautes fréquences. La fréquence centrale du séisme se trouve donc modifiée.

Les effets favorables : Dans la plupart des cas, la prise en compte de l'interaction sol-structure conduit à une réduction de l'amplitude de l'excitation sismique à la base et donc de la réponse sismique de la structure. Négliger cet effet favorable est économiquement pénalisant.

II MODELES D'INTERACTION SOL-STRUCTURE

Les calculs de l'interaction sol-structure s'effectuent à partir de modélisations du sol et de la structure, et d'une définition de la sollicitation sismique. La modélisation du sol, milieu tridimensionnel, semi-infini à comportement complexe, constitue l'aspect le plus délicat. Les

calculs dynamiques d'interaction sol-structure peuvent cependant largement varier selon les cas traités :

- La complexité de la définition mécanique du sol (sol élastique à amortissement visqueux ou hystérétique, sols homogènes ou hétérogènes, etc. ...).
- Le type de fondation (fondation rigide fondée en surface ou enterrée dans le sol, etc....).
- Les types d'ondes sismiques (ondes verticales de cisaillement ou de compression ou ondes obliques).
- Emplacement du mouvement de référence (niveau du sol ou niveau des fondations ou niveau d'une assise rocheuse).
- La représentation du mouvement de référence: temporelle (accélérogramme) ou fréquentielle (spectre de réponse).

La variété des calculs dépend aussi du modèle utilisé pour représenter la configuration sol-structure, on peut citer :

- Modélisation détaillée et unique de l'ensemble sol-structure (méthode globale) ou effectuée progressivement conformément à une procédure par étapes (méthode des sous-structures).
- Modélisation du champ lointain par des frontières de transmission (locales, élémentaires, consistantes) évitant la réflexion des perturbations, et modélisation du champ proche par éléments finis.
- Calcul direct dans le domaine temporel si les éléments de la modélisation ne dépendent pas de la fréquence ou calcul dans le domaine fréquentiel en admettant des règles de superposition des composantes fréquentielles.

II.1 Méthodes de résolution des problèmes d'interaction sol-structure

Nous pouvons distinguer deux méthodes de prise en compte de l'interaction sol-structure : la méthode directe (globale) et les méthodes des sous-structures.

Méthode directe (globale)

Il s'agit de modéliser un volume significatif du sol autour de l'encastrement de la structure et d'appliquer un champ libre sur les frontières fictives. Ceci nécessite la déconvolution en champ libre du mouvement de contrôle défini à la surface du sol. Cette méthode conduit à une détermination simultanée du mouvement dans le sol et dans la structure. Un des avantages principaux des méthodes globales est leur capacité à prendre en compte les hétérogénéités résultant soit des variations de faciès de la fondation , soit des variations des caractéristiques du sol. Cependant, la méthode utilise un nombre de degrés de liberté élevé pour modéliser le sol, ce qui demande un espace mémoire et un temps de résolution important (voir figure II-3).

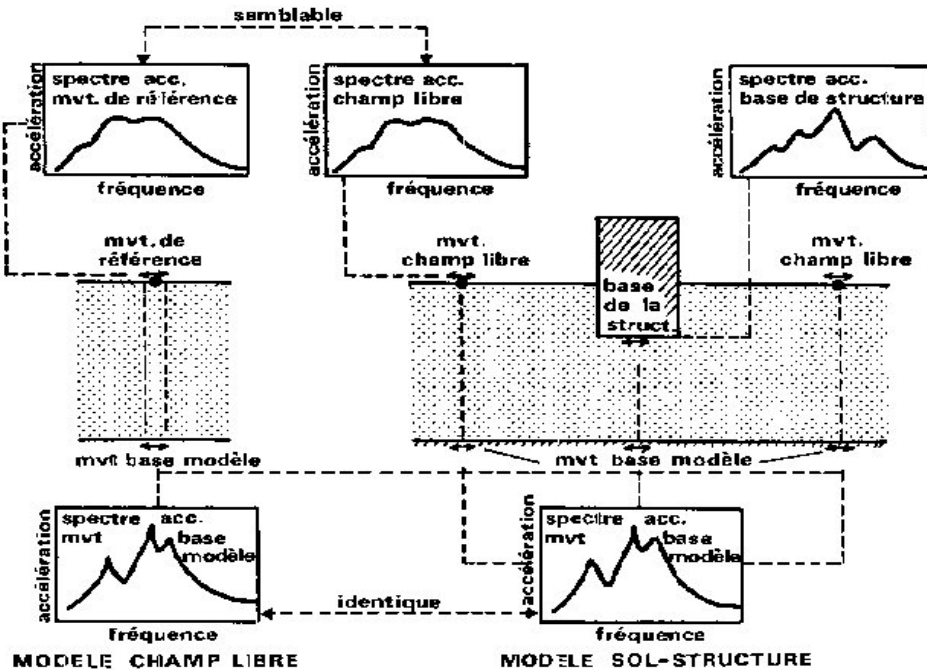


Figure (II-3): Représentation schématique d'un problème d'interaction sol-structure (méthode globale).

Méthode des sous-structures

Cette méthode fait appel au principe de superposition. L'idée de base est d'analyser le problème d'interaction sol-structure en plusieurs étapes successives ; chacune de ces étapes est plus facile à résoudre du point de vue de la modélisation ou du traitement, que le problème global. Elle peut également présenter des avantages pour identifier la part relative de chaque composante (interaction cinématique ou inertielle) contribuant au phénomène global d'interaction.

La réponse du site en champs libre est calculée en première étape ; cette réponse est calculée uniquement aux nœuds d'insertion de la structure. Dans cette pratique (méthode sous-structures), il n'est pas d'usage d'intégrer la source dans le modèle de calcul ; le sol dont les frontières sont illimitées est analysé comme un sous-système dynamique, la relation force-déplacement des degrés de liberté des nœuds d'interface (ceux de la première étape) est déterminée. Les coefficients dynamiques de rigidité du sol sont physiquement interprétés comme un système d'impédance (amortisseurs-ressort). La structure qui repose sur ce système est analysée pour un cas de chargement qui dépend du mouvement en champs libre. Par ailleurs, les méthodes des sous-structures présentent l'avantage de permettre certaines modifications sans qu'il ne soit nécessaire de reprendre toute l'analyse : une modification des caractéristiques de la structure ne requiert qu'une nouvelle analyse dynamique de la structure ; une modification des caractéristiques du séisme de projet permet de conserver la solution du problème d'impédance ...etc.

II.2 Frontières de transmission

L'utilisation de la méthode des éléments finis lors de la modélisation du milieu infini (sol-structure) nécessite la troncature du sol à une frontière artificielle qui va transmettre toutes les ondes en dehors du modèle fini. Des conditions aux limites bien appropriées et très

bien adaptées en dynamique doivent être introduites aux frontières du modèle représentant le sol. Ces conditions aux limites doivent limiter le milieu continu infini à une distance raisonnable et reproduire le domaine physique manquant qui tend vers l'infini localisé à l'extérieur de la frontière artificielle. Cette dernière doit être transparente pour éviter toutes réflexions et doit transmettre l'énergie véhiculée par l'onde du milieu avant la frontière vers l'extérieur. Ces types de conditions aux limites sont dénommés frontières de transmission. Nous distinguons trois types de frontières (voir figure II-4):

Les frontières élémentaires

Le maillage du sol est brutalement tronqué à la frontière artificielle. Dans ce cas, soit le déplacement est imposé nul (condition aux limites de types Dirichlet (D)), soit la contrainte de traction à la surface de la frontière est nulle (condition aux limites de types Newman). Ces frontières ne peuvent ni transmettre ni absorber de l'énergie. Pour améliorer la situation, l'amortissement matériel du modèle (sol) est artificiellement augmenté pour que l'amplitude de l'onde réfléchie puisse être significativement réduite avant d'atteindre l'interface sol-structure. Mais cette solution (utilisation d'un grand amortissement irréel) va influencer significativement la matrice impédance du sol et résulte ainsi en une réponse erronée de la structure. Il est à noter aussi que pour ce type de frontière, la convergence des coefficients d'impédance dynamique du domaine fini vis à vis du domaine infini est lente et oscillatoire.

Les frontières de transmission locales

Le terme local signifie que ce type de frontière ne met en jeu qu'un volume de sol limité, situé au voisinage immédiat du point considéré. La première tentative destinée à simuler l'absorption d'énergie par radiation à l'aide des frontières locales est due à Lysmer-Kuhlemeyer (1969). Ces frontières absorbantes sont modélisées par des amortisseurs et constituent des absorbeurs parfaits d'ondes planes à incidence normale. Pour les angles d'incidence inclinés, l'absorption est imparfaite.

Les frontières consistantes

Ces frontières absorbent parfaitement tous les types d'ondes, quels que soient leurs angles d'incidence. Leur mise en œuvre requiert, par opposition aux frontières locales, une formulation couplant tous les points de la frontière, c'est à dire non locale. Cette formulation fait intervenir des termes dépendants de la fréquence ; et par conséquent, ces frontières ne peuvent donc être utilisées que pour des solutions obtenues dans le domaine fréquentiel. Par contre, constituant des absorbeurs parfaits, elles peuvent être placées à proximité de la zone étudiée, ce qui permet de réduire notablement les dimensions du maillage.

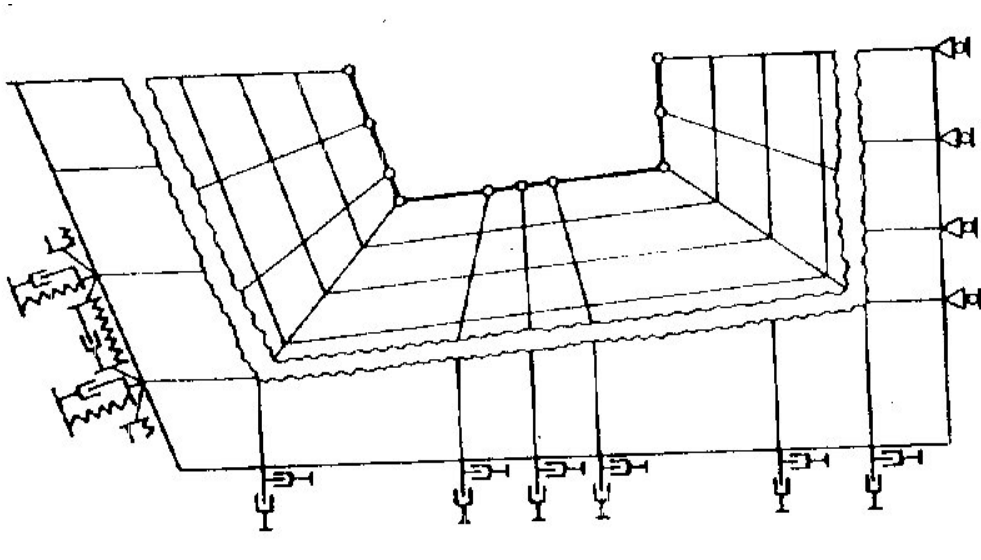


Figure (II-4): Frontières de transmission consistantes (gauche), locales (milieu), élémentaires(droite).

III PRESENTATION DU LOGICIEL DE CALCUL D'ISS "FLUSH"

Dans le cadre du présent travail, la modélisation et la résolution du système global sol-structure sont effectuées à l'aide du logiciel universel de calcul numérique FLUSH. Ce programme est réalisé par John Lysmer, Takekazu Udaka, Chang-Feng Tsai et H. Bolton Seed en Californie 1975, intervenu suite au développement du programme LUSH, qui consiste à calculer la réponse complexe par éléments finis du système globale sol-structure. Celui-ci est encore plus rapide (d'où le nom FLUSH = Fast LUSH).

Ce dernier est l'un des programmes de calcul numérique usuellement utilisé pour la résolution des problèmes d'interaction sol-structure par une modélisation globale en éléments finis (rectangulaires pour modéliser le sol et éléments poutres pour la structure). Il emploie une résolution du problème dans le domaine des fréquences.

III.1 Prise en compte des facteurs mis en jeu dans un problème d'interaction sol-structure par le programme FLUSH (Hypothèses) :

En résolvant un problème d'interaction sol-structure il convient de tenir compte de certains facteurs (paragraphe (II)), désignés ci-après :

- Une reproduction adéquate de la propagation des ondes.
- La précision de la représentation d'une situation (3D) avec un modèle bidimensionnel (2D).
- Choix des conditions aux limites appropriées pour simuler un espace semi-infini en utilisant un domaine fini (problème aux frontières).
- La dissipation de l'énergie interne du sol.

Variation des caractéristiques mécaniques du sol avec la profondeur :

La modélisation par éléments finis présente l'avantage de pouvoir représenter les hétérogénéités du sol, notamment la stratification. En utilisant cette approche, nous pouvons assigner différentes propriétés mécaniques du sol à chaque élément du modèle. Par

conséquent, il n'y a aucune difficulté à considérer le caractère variationnel des caractéristiques mécaniques avec la profondeur.

Effets 3D-amortissement géométrique:

Dans l'approche «**LUSH**», le système sol-structure est représenté comme un modèle bidimensionnel en éléments finis. **BERGER et al** ont constaté que la représentation bidimensionnel du système sol-structure donnait de bonnes évaluations de la réponse à la base de la structure mais pas nécessairement dans celle-ci.

En effet, la structure ainsi que le mouvement sismique sont assumés symétriques par rapport à l'axe (X). Par conséquent, les déformations qui subsiste au sein d'une tranche de largeur L, égale à la largeur de la structure dans la direction (z) sont planes ; autrement dit :

- Aucun déplacement suivant l'axe (z), direction où est localisée la structure n'existe. Il n'est considéré que les déformations planes.
- Les déplacements suivant X et Y dans la tranche de sol ne varient pas suivant l'axe Z.
- L'effet du sol en dehors de la tranche de sol peut être simulé par l'addition de forces visqueuses dans les cotés de la tranche. Cette supposition est basée sur des observations de phénomène physique lors de l'interaction sol-structure.

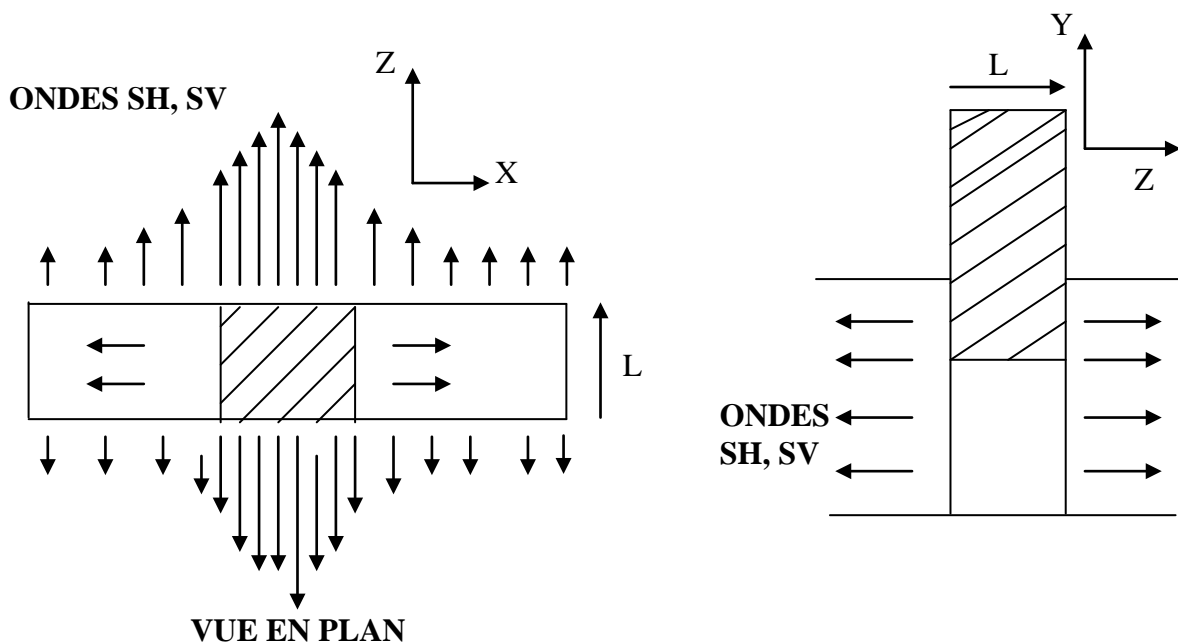


Figure (II-5) « Modèle simplifié 3D »

Il y a création de contraintes de cisaillement dans les deux cotés de la tranche, résultant de la propagation d'ondes de cisaillement dans la direction (Z) à partir de la structure comme indiqué sur la figure(II-5). Des ondes SH et SV seront ainsi créés.

A cet effet, une approche alternative pour l'inclusion de l'aspect 3D du système est celle suggéré par **HWANG et al**, la méthode implique l'utilisation de frontières visqueuses le long de la surface plane de la tranche de sol où une ou plusieurs structures sont localisées.

L'utilisation de ces frontières visqueuses pour la simulation de la propagation d'onde dans un milieu infini remonte aux travaux de **LYSMER et RICHART en 1966**, qui établissent une analogie entre la réponse dynamique d'un demi-espace chargé uniformément et des amortisseurs visqueux.

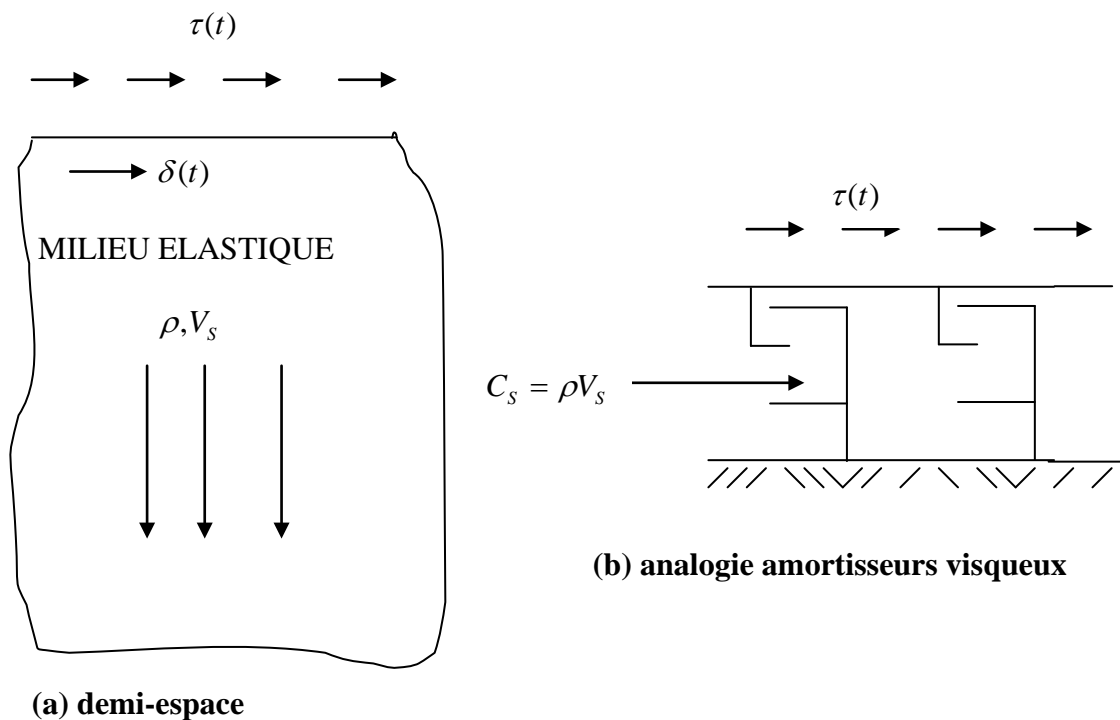
❖ **ANALOGIE DEMI-ESPACE – AMORTISSEURS VISQUEUX :**

Le déplacement $\delta(t)$ à la surface du demi-espace sous contraintes normales est identique à celui de l'amortisseur visqueux de coefficient :

$$C_p = \rho V_p \tag{II-8}$$

ρ : densité massique.

V_p : vitesse de propagation d'onde P.



Figure(II-6) «analogie demi-espace - amortisseurs visqueux »

Relations contraintes–déplacements :

$$\sigma_p = \rho V_p \dot{\delta}(t) \tag{II-9}$$

Ou bien dans le cas d'ondes de cisaillement :

$$C_s = \rho V_s \tag{II-10}$$

$$\sigma_s = \rho V_s \dot{\delta}(t) \tag{II-11}$$

C_p, C_s : amortissements visqueux, ils jouent le rôle d'amortissements géométriques.

Si la tranche de sol, où est localisée la structure est suffisamment large, l'énergie radiée le long de l'axe de la tranche sera absorbée par l'amortissement matériel.

Limites du modèle:

Un soin particulier doit être apporté au type de frontières utilisées dans un problème d'ISS. Si nous utilisons des frontières rigides, elles doivent être suffisamment éloignées du bâtiment pour que les vibrations soient amorties avant réflexion.

Le programme «FLUSH» propose une frontière rigide à la base du système sol-structure, située à l'interface sol-rocher avec un substratum résistant. Le programme adopte des frontières latérales proposées par **LYSMER et WAAS 1972**, pour la simulation de l'effet dynamique du champ viscoélastique lointain, au-delà de la région du modèle sol-structure. Ces frontières constituent des absorbeurs parfaits, elles peuvent être placées à proximité de la zone étudiée, ce qui permet de réduire notablement les dimensions du maillage.

Amortissement interne :

Pour contrôler le taux d'amortissement dans le sol, **SEED et al** utilisent une méthode d'analyse basée sur la réponse complexe dans le domaine des fréquences, en posant :

$$G = G_r(1 + 2i\beta) \quad \text{II-12}$$

Soit :

$$V_s = V_{sr}(1 + 2i\beta) \quad \text{II-13}$$

$G; G_r$: modules réel et complexe du sol.

V, V_{sr} : vitesses réelle et complexe des ondes de cisaillement.

β : amortissement hystérétique du sol.

Les autres calculs effectués dans le domaine temps tels que :

- Analyses modales (amortissement modal uniforme dans tout le sol).
- Méthode utilisant l'amortissement de Rayleigh (amortissement proportionnel).
- Méthode utilisant une matrice modale.

Ne fournissent pas une assez grande liberté pour ajuster le taux d'amortissement.

Schéma de propagation des ondes :

La résolution du problème complexe d'interaction sol-structure par le programme FLUSH est idéalisée par des analyses qui admettent une propagation d'ondes verticales de compression ou de cisaillement S au voisinage de la structure.

Compte tenu, aussi de l'hypothèse généralement retenue sur la propagation des ondes verticales, le champ des déplacements varie plus rapidement dans la direction verticale que dans la direction horizontale; plusieurs auteurs tels : **LYSMER et al, ROESSET et al** ont

proposé des règles permettant de fixer la dimension verticale maximale des éléments du maillage du sol.

Si f_{\max} désigne la fréquence maximale que l'on désire adopter au modèle, la longueur d'onde associée à f_{\max} est :

$$\lambda = \frac{V_s}{f_{\max}} \quad \text{II-14}$$

En supposant que les déplacements à l'intérieur d'un élément variant linéairement, le déplacement associé à cette longueur d'onde sera correctement approché si au moins 3 à 4 points de discrétisation sont retenus pour une demi-longueur d'onde pour pouvoir transmettre les hautes fréquences. Cette condition conduit à une taille d'élément égale à :

$$h_{\max} \leq \left(\frac{1}{5} \dot{\text{à}} \frac{1}{8} \right) \frac{V_s}{f_{\max}} \quad \text{II-15}$$

La largeur des éléments du maillage peut être 2 à 4 fois plus grande que la longueur.

III.2 Procédure de calcul du programme FLUSH (Hypothèses) :

La procédure de calcul est essentiellement bidimensionnelle et les équations du mouvement pour une représentation en éléments finis du système s'écrivent :

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = -\{m\}\ddot{Y} - \{V\} + \{F\} - \{T\} \quad \text{II-16}$$

avec: $\{U\}$: déplacements relatifs à la base rigide des nœuds du système globale sol-structure, $[M]$, $[K]$: matrices de masse et de rigidité en déformation plane, d'une tranche de sol d'épaisseur unité. $\{m\}$: vecteur directionnel de l'accélération à la base rigide, $\ddot{Y}(t)$.

le vecteur force $\{v\}$ est généré à partir de la frontière visqueuse dans le plan du maillage (tranche de sol). Il simule l'effet 3D du système, et est donné par :

$$\{V\} = \frac{1}{L}[C](\{\dot{U}\} - \{\dot{U}\}_f) \quad \text{II-17}$$

avec : L épaisseur de la tranche de sol, $[C]$: matrice d'amortissement diagonale dépendant des propriétés du sol en champ libre et $\{\dot{U}\}_f$: vecteur vitesses en champ libre.

Les forces $\{F\}$ agissent à la fin du modèle, dans le plan vertical en champ libre. Elles ne permettent aucune transmission horizontale de l'énergie et sont données par :

$$\{F\} = [G]\{U\}_f \quad \text{II-18}$$

où : $[G]$ est une matrice de rigidité indépendante de la fréquence, formée du module complexe en champ libre.

Les forces reliées à la transmission de l'énergie sont :

$$\{T\} = ([R] + [L])(\{U\} - \{U\}_f) \quad \text{II-19}$$

où : [R] et [L] sont des matrices impédances, dépendantes de la fréquence. Ces matrices introduites par LYSMER et DRACKE (1972) et WAAS (1972) (frontières consistantes), représentent l'effet dynamique exact des milieux semi-infinis situés aux deux extrémités du modèle.

L'équation du mouvement (II-16) est résolue par la méthode de la réponse complexe qui suppose que le mouvement input peut s'écrire en une somme d'excitations harmoniques, à savoir sous forme de séries de Fourier par:

$$\ddot{Y}(t) = \text{Re} \sum_{S=0}^{N/2} \ddot{Y}_S \exp(i\omega_S t) \quad \text{II-20}$$

Avec : $\omega_S = 2\pi f_S$

ω_S : pulsation

$f_S = \frac{S}{T}$, $S = 1, \dots, N$ est la fréquence en Hz, $T = N \Delta t$, la durée totale du signal et N est le nombre de points du signal discretisé.

Par conséquent, la réponse peut s'écrire comme suit :

$$\{U\} = \text{Re} \sum_{S=0}^{N/2} \{U\}_S \exp(i\omega t) \quad \text{II-21}$$

et

$$\{U\}_f = \text{Re} \sum_{S=0}^{N/2} \{U_f\}_S \exp(i\omega t) \quad \text{II-22}$$

$\{U\}_f$: réponse temporelle en déplacement en champ libre.

$\{U\}$: réponse temporelle du système globale sol-structure.

$\{U_f\}_S$: réponse en champ libre dans le domaine des fréquences.

$\{U\}_S$: réponse du système globale sol-structure dans le domaine des fréquences.

L'équation (II-16) peut être directement résolue par l'une des méthodes de résolution des systèmes linéaires de la forme :

$$\text{avec :} \quad [K]_S \{U\}_S = \{P\}_S \ddot{Y}_S \quad \text{II-23}$$

$[K]_S$: matrice rigidité dépendante de la fréquence donnée par :

$$[K]_s = [K] + [R]_s + [L]_s + \frac{i\omega_s}{L}[C] - \omega_s^2[M] \quad \text{II-24}$$

et $\{P\}_s$: vecteur force correspondant à une amplitude unitaire d'excitation au niveau de la base rigide ($\ddot{Y}_s = 1$) donnée par.

$$\{P\}_s = \left([G] + [R]_s + [L]_s + \frac{i\omega_s}{L}[C] \right) \{A\}_s - \{m\} \quad \text{II-25}$$

où $\{A\}_s$: vecteur réponse correspondant à une amplitude unitaire d'excitation au niveau de la base rigide ($\ddot{Y}_s = 1$).

IV.CONCLUSION :

La solution de l'équation (II-21) ne représente que la partie entretenue de la réponse. En analyse sismique, compte tenu de l'amortissement matériel, la phase transitoire s'amortit rapidement. Elle est cependant négligée.

Avec le développement des algorithmes de la transformée de Fourier rapide (Cooley – Tukey 1965), cette procédure est très efficace numériquement. Ces algorithmes imposent comme seule restriction que le nombre de termes de la transformée soit une puissance de 2. Dans la pratique cela ne constitue pas une limite car il est toujours possible, pour satisfaire cette condition d'augmenter la durée de la sollicitation par une zone de blancs.

Enfin, la résolution des équations du mouvement du problème d'ISS, nous permettra de définir les réponses sismiques (accélérations et spectres de réponses) à la base et au toit de la structure. Ça nous permettra également de définir les réponses à la surface en champ libre, en l'absence de la structure. Par le biais du programme mathématique «Matlab» nous calculons et visualisons les fonctions de transfert (rocher-base de la structure et rocher-toit de la structure).

SIMULATION DU MILIEU ALEATOIRE

L'INTRODUCTION

Dans les analyses classiques de structures, les données du problème sont simplifiées à des valeurs représentatives basées sur des informations théoriques ou empiriques, et la grandeur recherchée du problème posé n'est alors qu'une valeur moyenne pénalisée par un coefficient de sécurité introduit à la base des jugements choisis par l'ingénieur. Ceci étant un calcul quasi-déterministe, or les expériences et les observations montrent que les variables incluses dans la plupart des analyses (dans divers domaines) sont assez souvent de nature aléatoire. Il paraît alors évident qu'en cas de problèmes complexes où l'erreur s'avère dangereuse ou bien l'approche quasi-déterministe est non économique, une action d'optimisation est indispensable. Par conséquent, dans le but de décrire le comportement réel des variables d'un problème de mécanique de structure (ou bien sol), des caractères statistiques et aussi bien des méthodes probabilistes sont à utiliser. Cette nouvelle méthodologie est appelée : «L'APPROCHE PROBABILISTE».

Dans le domaine de la géostatistique, les sols sont des milieux hétérogènes, qu'on les examine à l'œil nu ou au microscope électronique, on est frappé par la diversité des formes et des dimensions des particules ou des agrégats de particules, par l'existence de vides, de fissures, de zones plus compactes, etc. Cette hétérogénéité n'a rien d'étonnant car les processus qui ont conduit à la formation d'un sol donné ont inévitablement subi des fluctuations dans le temps et dans l'espace; de telle sorte qu'il est normal que leurs propriétés varient tant avec la profondeur (c'est à dire avec l'âge) qu'horizontalement. Par conséquent, les propriétés mécaniques du sol, masse volumique et module de cisaillement, varient d'un bout à l'autre du massif de sol et ne sont pas toujours connues avec une précision suffisante pour justifier une analyse déterministe ou quasi-déterministe.

A cet effet deux facteurs essentiels ont concouru au développement des méthodes statistiques et probabilistes dans ce domaine :

- Le besoin des ingénieurs et des chercheurs de calculer le risque de ruine de leurs projets.
- Le besoin ressenti par les spécialistes de pouvoir quantifier la variation naturelle des propriétés des sols de façon à optimiser les reconnaissances géotechniques.

D'après Jean Pierre Magnan (1982), toutes ces conditions aient été réunies au milieu des années soixante du siècle dernier, puisque l'on a commencé à publier à cette époque les premiers articles consacrés à ce sujet : Casagrande (1965), Lumb (1966), Wu et Kraft (1967), Schimming et Garvey (1967).

II. TECHNIQUES D'ANALYSES DE LA VARIABILITE SPATIALE DES PROPRIETES DES SOLS

Dans le domaine de la géostatistique, dont l'objectif final est de dimensionner des ouvrages, la question principale qui se pose est la suivante : comment peut-on tenir compte de la variabilité naturelle des propriétés des sols dans les modèles de calculs?. En réponse, des méthodes statistiques et des techniques très variées ont été proposées. Ces techniques peuvent être classer selon leur processus de calcul à savoir:

- Déterminer des moyennes et des écarts type, rechercher la forme des lois de répartition des paramètres et tester leurs significations.
- Rechercher des corrélations simples et multiples.
- Analyser les lois de variation spatiale.

Toutefois de nombreuses études statistiques ont été réalisées sur les propriétés physiques et mécaniques des sols. Les études de Magnan et Baghery (1982) ont porté sur des sols variés et sur la plupart des propriétés utilisées en Mécanique Des Sols. Les auteurs concluent, que les études statistiques telles que menées, à savoir la détermination des moyennes, des écarts types et la recherche de lois de répartition des paramètres, ne sont pas parfaitement adaptées aux sols; ils estiment qu'il serait illusoire de limiter l'analyse statistique des propriétés des sols à l'identification des lois de distributions théoriques.

Il faut orienter les efforts d'analyses vers les **variations spatiales** des paramètres mécaniques dans le massif de sol. D'après le théorème de superposition, la technique d'analyse la plus courante pour décrire les variations spatiales des propriétés des sols consiste à décomposer les variations spatiales de chaque propriété en une fonction déterministe des coordonnées des points de mesure dans l'espace, appelée dérive (ou tendance) et en une composante aléatoire. Une seconde procédure d'analyse, très peu utilisée, est fournie par les techniques développées dans le domaine minier et connue sous le nom général de «géostatistiques ». Ces techniques mises au point sous la direction du professeur Mathéron (1969), reposent sur deux outils principaux : le variogramme, qui représente la variabilité des propriétés d'un sol autour d'un point donné de l'espace et les méthodes de krigeage, qui permettent d'estimer les variations probables des propriétés des sols entre les points où on les a mesurées.

Dans le présent travail et afin de restituer le caractère hétérogène du sol, nous avons choisi d'introduire l'aléa au niveau du module de cisaillement. Ce choix résulte d'une part, des conclusions de la géostatistique qui soulignent le caractère fortement variable de ce paramètre dans l'espace, en comparaison avec les autres paramètres telle que la densité, et d'autre part, de son influence directe sur la réponse dynamique des sols. Cependant pour caractériser la

variabilité spatiale du module de cisaillement du sol nous utiliserons la première technique d'analyse (lois de variation spatiale).

Nous exposerons dans ce qui suit certaines notions de probabilités, impératives à l'écriture de la partie aléatoire des propriétés mécaniques (fluctuation).

III. PRINCIPES DE PROBABILITES

III.1 Définition des processus stochastiques (aléatoires)

Les phénomènes stochastiques, sont tous des processus aléatoires qui ne sont soumis qu'au hasard. En effet un processus physique est dit aléatoire si chaque échantillon de ce phénomène est le résultat de circonstances uniques qui ne se répéteront pas à l'occasion d'autres mesures indépendantes de ce même phénomène. En d'autres termes, un processus stochastique est un ensemble d'échantillons non superposables ou chaque échantillon est constitué d'un nombre infini de variables aléatoires.

Soit le processus aléatoire $G(x)$ représentant le module de cisaillement du sol en fonction de la variable espace x . Pour un x donné, la valeur correspondante est une variable aléatoire non déterminée à priori (figure (III-1)).

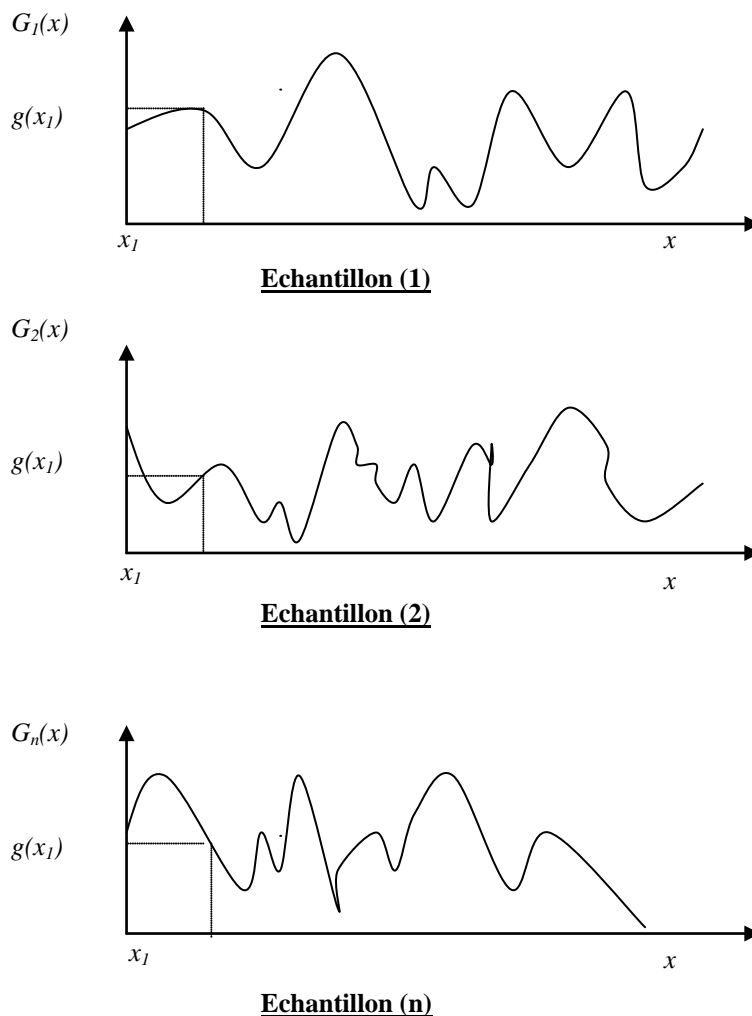


Figure (III-1) Concept de processus stochastique

L'analyse des processus stochastiques est faite en décrivant les variables aléatoires $g(x)$ qui constituent le processus. Toutes les définitions, règles et propriétés des variables aléatoires restent valables. Nous adoptons dans ce qui suivra le vecteur $Z = [Z_1, \dots, Z_n]^T$ pour caractériser un processus aléatoire.

III.2 Loïs de distribution

Un événement aléatoire est décrit par une fonction de valeurs nommées variables aléatoires, dont on sait uniquement avec quelle probabilité elles peuvent prendre telle ou telle valeur parmi un ensemble de valeurs. En effet, une variable aléatoire Z peut être décrite par sa densité de probabilité $f_Z(Z)$, définie par la probabilité qu'à la variable Z à prendre la valeur z .

Principalement, deux groupes de distributions peuvent être distingués, à savoir :

- Les distributions discrètes.
- Les distributions continues.

Pour le groupe de distributions discrètes, l'espace des variables aléatoires est discret ; décrites par sa fonction de distribution cumulative $F_Z(z)$, qui représente la probabilité que les valeurs de la variable aléatoire Z soient égales à z .

$$P_Z(z) = P(Z = z) \quad \text{III-1}$$

$$F_Z(z) = \sum_{\alpha \leq z} P_Z(\alpha) \quad \text{III-2}$$

Plusieurs formes mathématiques de distribution sont suggérées: la distribution de Bernoulli, la distribution binomiale et la distribution de Poisson.

Une variable aléatoire continue est décrite par sa fonction de distribution cumulative $F_Z(z)$, qui représente la probabilité que les valeurs de la variable aléatoire Z soient inférieures ou égales à z .

$$F_Z(z) = P[Z \leq z] \quad \text{III-3}$$

Cette fonction de distribution cumulative (FDC) est par définition monotone, non décroissante et satisfait les relations suivantes :

$$F_Z(-\infty) = 0 \quad F_Z(+\infty) = 1 \quad \text{III-4}$$

Une variable aléatoire continue peut aussi être décrite par sa fonction de densité de probabilité (FDP)

$$P_Z(z) = \frac{dF_Z(z)}{dz} \quad \text{III-5}$$

III.3 Moments de variables aléatoires :

La façon la plus simple d'analyser des données (résultats d'essais ou d'enregistrements) consiste à étudier la distribution statistique des valeurs mesurées sans se soucier de leurs localisations (dans l'espace ou le temps). Nous distinguons les distributions statistiques suivantes.

1. L'espérance mathématique d'une variable aléatoire Z : est définie par une densité de probabilité, est sa valeur moyenne d'ensemble notées $E[Z]$ ou m_z telle que :

Cas de variables discrètes :

$$m_z = E[Z] = \sum_{x=0} z P_z(z) \quad \text{III-6}$$

$$z = 0, 1, 2, \dots$$

Cas de variables continues :

$$m_z = E[Z] = \int_{-\infty}^{\infty} z f_z(z) dz \quad \text{III-7}$$

En effet, l'espérance ou la moyenne de la variable aléatoire Z , est la somme de toutes les valeurs possibles (z) pondérées par leurs probabilités. Cette grandeur (moyenne) est un indicateur de tendance de la variable Z .

2. Variance: c'est une grandeur qui permet de caractériser le taux de dispersion de la distribution de Z autour de sa moyenne, notée :

Cas de variables continues :

$$Var[Z] = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (z - m_z)^2 f_z dz \quad \text{III-8}$$

Cas de variables discrètes :

$$Var[Z] = \sigma^2 = \sum_{x=0} (z - m_z)^2 P_z(z) \quad \text{III-9}$$

3. Ecart type : c'est la racine positive de la variance.

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_z^2} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (z - m_z)^2 f_z(z) dz} \quad \text{III-10}$$

4. Coefficient de variation V_z :

$$V_z = \frac{\sigma_z}{m_z} \quad \text{III-11}$$

Plus V_x est faible, plus la distribution est concentrée sur la moyenne.

IV. DESCRIPTION DE PROCESSUS ALEATOIRES

IV.1 Processus aléatoires gaussiens

Un processus Z n'est dit gaussien que si toutes ses densités de probabilité multivariées sont distribuées normalement. Ce sont les processus les plus importants.

Loi normale (loi de Gauss): Soit Z la somme de n variables indépendantes, d'après «le théorème de la limite centrale», quand le nombre n devient grand, la densité de probabilité de Z tend asymptotiquement vers une loi normale. La fonction densité de probabilité est définie par :

$$f_z(Z) = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{z - m_z}{\sigma_z}\right)^2\right) \quad \text{III-12}$$

$$-\infty \leq z \leq \infty$$

m_z, σ_z : sont respectivement la valeur moyenne et l'écart-type de la variable aléatoire Z . La distribution normale peut aussi s'écrire sous la forme standard suivante:

En posant :

$$U = \frac{z - m_z}{\sigma_z} \quad \text{et} \quad f_u(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} u^2\right) \quad \text{III-13}$$

$$-\infty \leq u \leq +\infty$$

La distribution peut s'exprimer comme suit :

$$f_z(Z) = \frac{1}{\sigma_z} f_u\left(\frac{z - m_z}{\sigma_z}\right) \quad \text{III-14}$$

$$-\infty \leq z \leq +\infty$$

Avantage: D'un point de vue économique, cette modélisation est très forte, en effet un processus gaussien est complètement défini par sa fonction moyenne $E[Z]$ et sa fonction de covariance (moment d'ordre 1 et 2) uniquement. En d'autres termes et d'un point de vue physique, ces processus sont très intéressants puisque la plupart des phénomènes obéissent réellement à cette modélisation, le théorème de la limite centrale est assez souvent justifié.

IV.2 Processus aléatoires stationnaires

Un processus est dit stationnaire si toutes les distributions sont indépendantes d'une translation dans l'axe des abscisses. Dans le cas contraire, chaque abscisse impose une distribution. La stationnarité est une idéalisation, aussi pour être strictement stationnaire dans le sens mathématique, le processus ne doit avoir ni début ni fin (il s'étend de $-\infty$ à $+\infty$).

Pour l'illustration de nos définitions, nous distinguons dans ce qui suivra le cas de processus aléatoire décrivant l'aspect probabiliste du module de cisaillement du sol $G(x)$, qui varie dans l'espace. Ceci étant, si $G(x)$ est un processus aléatoire stationnaire alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{G(x_1), \dots, G(x_n)}(g(x_1), \dots, g(x_n)) = f_{G(x_1 + \xi), \dots, G(x_n + \xi)}(g(x_1), \dots, g(x_n)) \\ f[G(x_1)] = f[G(x_2)] = \dots = f[G(x_i)] \end{array} \right\} \quad \text{III-15}$$

$f[G(x_i)]$: indépendante de l'abscisse x

$f[G(x), G(x + \xi_1), \dots, G(x + \xi_n)]$: indépendante de l'abscisse x et dépendante des translations $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$.

La description ci-dessous est aussi complexe que celle d'un processus stochastique non stationnaire à un ordre supérieure mais beaucoup plus simple au premier et second ordre dans le cas de processus gaussiens (normaux).

IV.3 Processus aléatoires stationnaires érgodiques

Le théorème d'érgodicité implique que les distributions de probabilité d'un processus à une abscisse donnée, seraient identiques pour les différents échantillons. Ce théorème est dû à George Birkhoff (1930). On ne parle d'érgodicité que dans le contexte de processus stochastiques stationnaires. Nous distinguons :

- L'érgodicité dans la moyenne: la moyenne d'ensemble est égale à la moyenne d'un échantillon. Ceci est très intéressant puisque le traitement d'un échantillon est alors représentatif.
- L'érgodicité dans la corrélation: les échantillons se superposent.

IV.4 Notions de fonctions de Corrélation

La fonction d'autocorrélation peut être interprétée comme une mesure de la capacité de prédiction de valeurs futures sur la base d'observations passées. En effet, si la valeur de la fonction de corrélation $R_G(\xi)$ à décalage ξ donné est importante, alors ceci suggère que la connaissance exacte de $G(x)$, puisse aider à améliorer la prédiction de $G(x+\xi)$. Il est évident que lorsque le décalage ξ augmente la capacité de prédiction chute. La fonction de corrélation $R_{Z_i Z_j}$ est notée :

$$R_{Z_i Z_j} = E[Z_i Z_j] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Z_i Z_j P_{Z_i Z_j} dz_i dz_j \quad \text{III-16}$$

où $P_{Z_i Z_j}$: densité de probabilité de la variable Z .

La fonction d'autocorrélation varie suivant la nature du processus lui-même, nous distinguons en générale :

- Les échantillons de nature harmonique \Rightarrow Bonne capacité de prédiction.
- Les échantillons de nature irrégulière \Rightarrow Mauvaise capacité de prédiction.

Les fonctions de corrélation utilisées dans la théorie de dispersion d'ondes dans les milieux hétérogènes en représentation monodimensionnelle sont: [Chernov, 1960], (tableau III-1)

Tableau (III-1) : Fonctions de corrélation [Chernov, 1960]

Type de fonction	Fonctions
GAUSSIENNE	$R(\xi) = e^{-\frac{(\xi)^2}{l_x^2}}$
EXPONENTIELLE	$R(\xi) = e^{-\xi/l_x}$
VON KARMEN	$R(\xi) = \frac{1}{2^{m-1}\Gamma(m)} \left(\frac{\xi}{l_x}\right)^m K_m\left(\frac{\xi}{l_x}\right)$

l_x : longueur de corrélation suivant l'axe x , au-delà de laquelle aucune corrélation n'existe entre les différentes valeurs de la fonction $G(x)$ (il y a perte de corrélation).

$\Gamma(m)$: Fonction gamma.

K_m : fonction de Bessel modifiée d'ordre (m).

Matrice de covariance de \bar{X} :

C'est une fonction d'autocorrélation dont la moyenne est prise en charge. Elle est définie positive. D'où sa définition par les termes suivants:

$$\begin{aligned} \text{Cov}[Z_i, Z_j] &= E[(Z_i - m_i)(Z_j - m_j)] \\ i, j &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad \text{III-17}$$

La covariance est en générale normalisée à un terme adimensionnel ρ_{ij} :

$$\rho_{ij} = \frac{\text{Cov}[Z_i, Z_j]}{\sigma_i \sigma_j} \quad \text{III-18}$$

ρ_{ij} : Coefficient de corrélation.

σ_i, σ_j : Ecart type respectif des variables Z_i et Z_j .

La covariance est en générale notée $\Gamma_{Z_i Z_j}$.

$$\left\{ \begin{aligned} \Gamma_{Z_i Z_j} &= E[(Z_i - m_i)(Z_j - m_j)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (Z_i - m_i)(Z_j - m_j) P_{Z_i Z_j} dz_i dz_j \\ \rho_{ij} &= \frac{\Gamma_{Z_i Z_j}}{\sigma_{Z_i} \sigma_{Z_j}} \end{aligned} \right. \quad \text{III-19}$$

Dans le cas de deux variables, la matrice de covariance [C] s'écrit :

$$[C] = \begin{bmatrix} \sigma_i^2 & \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j \\ \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j & \sigma_j^2 \end{bmatrix} \quad \text{III-20}$$

Elle est définie positive si et seulement si :

$$\begin{cases} \sigma_i^2 \geq 0 \\ \sigma_j^2 \geq 0 \\ \det \text{erminant}[C] \geq 0 \end{cases} \quad \text{III-21}$$

$$\det [C] = \sigma_i^2 \sigma_j^2 - \rho_{ij}^2 \sigma_i^2 \sigma_j^2 = \sigma_i^2 \sigma_j^2 (1 - \rho_{ij}^2)$$

$$\det[C] \geq 0 \Rightarrow \rho_{ij} \leq 1$$

Finalemment $\Rightarrow -1 \leq \rho_{ij} \leq 1$

IV.5 Description d'un processus aléatoire dans le domaine des nombres d'ondes : Notions de densité spectrale

Si la transformée de Fourier est appliquée au processus $G(x)$, un nouveau processus est alors obtenu par le moyen de :

$$G(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(x) \exp(-i\omega x) dx \quad \text{III-22}$$

La transformée inverse donne :

$$G(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) \exp(i\omega x) d\omega \quad \text{III-23}$$

De l'équation (III-23), il est clair que $G(x)$ est considéré comme un processus lequel est composé d'une somme de composantes harmoniques avec des amplitudes. Cependant, la transformé de Fourier ci-dessus n'existe pas car les processus stationnaires (les plus utilisés) s'étendent sur un espace infini (distributions de variables continues) et ne sont alors pas intégrables. Néanmoins, il est possible d'appliquer la transformer de Fourier à la fonction d'autocorrélation, une densité spectrale de puissance $S_{GG}(\omega)$ est alors obtenue. Cette transformée est connue sous le nom de : « **Théorème de Wiener-Khintchine** »

$$S_{GG}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{GG}(\xi) \exp(-i\omega \xi) d\xi \quad \text{III-24}$$

Inversement :

$$R_{GG}(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{GG}(\omega) \exp(i\omega \xi) d\omega \quad \text{III-25}$$

La densité spectrale de puissance (DSP) est interprétée comme la distribution d'énergie suivant la fréquence. Elle existe si $R_{GG}(\xi)$ est intégrable. Cette condition est observée pour la plupart des processus stationnaires gaussiens.

V. SIMULATION DE PROCESSUS ALEATOIRES

Un processus stochastique est dit à n dimensions et m variables s'il est représenté par une fonction de n variables $Z = [Z_1 Z_2 \dots Z_n]^T$ et est la composante de m fonctions aléatoires $f_j(Z)$ ($j=1,2,\dots,m$), $f(Z) = [f_1(Z) f_2(Z) \dots f_m(Z)]^T$ où les composantes $f_j(Z)$ sont en générale statistiquement indépendantes. Nous distinguons :

- Les champs stochastiques unidimensionnels et à une variable : **1D-1V**.
- Les champs stochastiques multidimensionnels et à une variable : **nD-1V**.
- Les champs stochastiques multidimensionnels et à variables multiples : **nD-mV**.

V.1 Simulation de champ unidimensionnel à une variable : (1D-1V)

Les premiers travaux de recherches dans le concept de processus aléatoires ont été introduit en relation avec les variations aléatoires temporelles associées à des quantités physiques. En effet, dans la littérature, un processus stochastique unidimensionnel et à une variable est en générale considérée fonction du temps t . Aujourd'hui, cette approche est étendue à la simulation d'autres champs aléatoires. Dans nos travaux de recherches, nous nous intéressons aux variations spatiales du module de cisaillement du sol. Toutes les simulations conduites dans le domaine temporel restent valables dans le domaine spatial.

D'après S.O.Rice (1954), deux représentations analytiques par les séries de Fourier sont possibles pour caractériser un processus stationnaire gaussien.

- Première représentation : Soit la simulation du processus $G(x)$ suivante:

$$G(x) = \sum_{p=1}^N (A_p \cos k_p x + B_p \sin k_p x) \quad \text{III-26}$$

où : $k_p = p\Delta k$: nombre d'onde.

A_p et B_p : variables aléatoires gaussiennes avec une moyenne nulle et un écart type $\sqrt{2S_{GG}(k_p)\Delta k}$

$S_{GG}(k)$: densité spectrale de puissance.

Le processus est implicitement gaussien puisque A_p et B_p sont des variables gaussiennes.

- Seconde représentation : (Technique de Monté Carlo)

$$G(x) = \sqrt{2} \sum_{p=1}^N \sqrt{2S_{GG}(k)\Delta k} \cos(k_p x + \phi_p) \quad \text{III-27}$$

où: ϕ_p est une phase aléatoire uniformément distribuée entre 0 et 2π .

Dans cette représentation, le processus est asymptotiquement gaussien quand N est grand, d'après le théorème de la limite centrale.

❖ **SYNTHESE :**

Les deux équations III-26 et III-27 fournissent une représentation par les séries de Fourier d'un processus 1D-1V stationnaire gaussien, cependant il est plus commode d'utiliser la seconde version, définie par l'équation III-27 pour les deux raisons suivantes :

- La fonction $G(x)$ possède des caractéristiques érgodiques (le traitement d'un échantillon est alors représentatif) contrairement à celle dérivée de l'équation III-26.
- En utilisant l'équation III-27 la fonction $G(x)$ est obtenue directement en remplaçant les variables aléatoires $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N$ par leurs valeurs respectives de la (i) ème réalisation. Il existe dans les bibliothèques de sous-programmes statistiques des programmes capables de générer des suites de nombres aléatoires en suivant des lois de distribution simples (uniforme, loi normale, loi lognormale, etc.)

V.2 Simulation aléatoire d'un profil de sol bidimensionnel

Soit la formulation décrite ci-dessous par l'équation (III-28) qui donne la variation spatiale du module de cisaillement du sol. D'après le théorème de superposition, celle-ci consiste à décomposer le champ aléatoire bidimensionnel $G(x,y)$ en une valeur moyenne, supposée être estimée à partir de sondages effectués in situ correspondant au cas de milieu homogène G_0 , et en une fluctuation autour de cette moyenne (dispersion) notée $\Delta G(x,y)$, telle que :

$$G(x, y) = G_0 + \Delta G(x, y) \quad \text{III-28}$$

qu'on peut réécrire comme suit :

$$G(x, y) = G_0 \left(1 + \frac{\Delta G(x, y)}{G_0} \right) \quad \text{III-29}$$

Considérant $G(x, y)$, processus gaussien bidimensionnel à une variable avec une fonction d'autocorrélation $R(x, y)$ et une densité spectrale $S(k_x, k_y)$, où x, y et k_x, k_y indiquent les variables espace et nombre d'onde, respectivement. $S(k_x, k_y)$ et $R(x, y)$ obéissent à la transformé de Wiener Khintchine.

$$S_{GG}(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty R_{GG}(x, y) \cos(k_x x) \cos(k_y y) d(x) d(y) \quad \text{III-30}$$

$S(k_x, k_y)$: est la double transformée de Fourier de la fonction de corrélation.

k_x, k_y : sont respectivement, les nombres d'ondes suivant l'axe x et l'axe y .

Inversement:

$$R_{GG}(x, y) = \int_0^\infty \int_0^\infty S_{GG}(k_x, k_y) \cos(k_x x) \cos(k_y y) d(k_x) d(k_y) \quad \text{III-31}$$

Par analogie aux travaux de Shinozuka, la simulation spatiale du processus stochastique du module de cisaillement du milieu est générée par la technique de Monté Carlo. Elle s'exprime comme suit:

$$\frac{\Delta G(x, y)}{G_0} = \sum_{p=1}^N \sum_{l=1}^M \sqrt{2S(k_p, k_l) \Delta k_p \Delta k_l} \cos(k_p x + k_l y + \phi_{pl}) \quad \text{III-32}$$

ϕ_{pl} : sont des réalisations du déphasage aléatoire, uniformément distribuées entre $[0, 2\pi]$.

$\Delta k_p, \Delta k_l$: sont les pas en nombre d'ondes dans la direction x et y respectivement.

Le processus est:

- Asymptotiquement Gaussian puisque $p^{\max} \rightarrow \infty$ et $l^{\max} \rightarrow \infty$ suivant le théorème de la limite centrale.
- Ergodique dans la moyenne.

Pour des suppositions pratiques, l'équation III-32 est valable s'il existe une fréquence limite ω_U au-delà de laquelle la contribution de la densité spectrale est négligeable. Les valeurs $p^{\max} = l^{\max} = 100$ justifient cette valeur limite.

Considérant le cas de fonctions de corrélation dans le plan (x, y) de type exponentielle, donnée par :

$$R_{GG}(x, y) = \frac{I}{\sigma^2} \exp \left[- \left(\frac{x}{l_x} \right) - \left(\frac{y}{l_y} \right) \right] \quad \text{III-33}$$

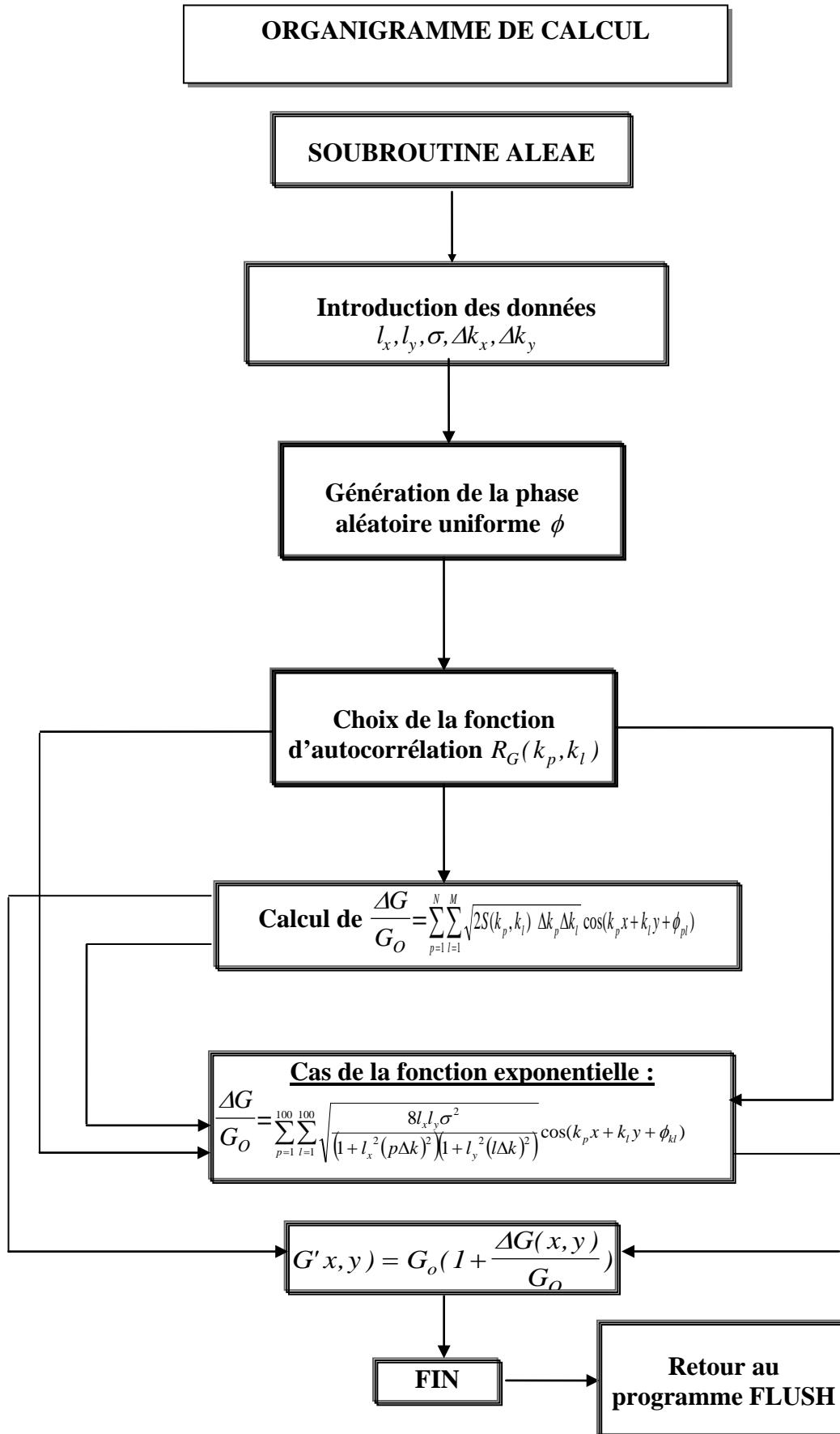
avec: σ^2 : la variance du module de cisaillement.

l_x, l_y : distances de corrélations dans le plan (x, y) , respectivement suivant l'axe x et y.

Finalement la dispersion autour de la moyenne s'écrit:

$$\frac{\Delta G(x, y)}{G_0} = \sum_{p=1}^{100} \sum_{l=1}^{100} \sqrt{\frac{8l_x l_y \sigma^2}{(1 + l_x^2 (p\Delta k)^2)(1 + l_y^2 (l\Delta k)^2)}} \cos(k_p x + k_l y + \phi_{kl}) \quad \text{III-34}$$

$$k_p^{\max} = k_l^{\max} = \frac{f^{\max}}{V_s} = p\Delta k_p = l\Delta k_l \quad (l=p=100)$$



VI. CONCLUSION

La génération du milieu aléatoire par le biais de la technique de «Monté-Carlo» nous permet de concevoir l'aspect hétérogène du sol dans le modèle éléments finis du système couplé sol-structure. Une subroutine permettant de décrire la variation spatiale du module de cisaillement du sol distribuée de manière aléatoire suivant une loi exponentielle a été établie et insérée au programme « FLUSH ».

REPONSES DU SYSTEME GLOBAL SOL-STRUCTURE EN MILIEU HOMOGENE

I. INTRODUCTION

Nous exposons dans ce chapitre les réponses de la structure en milieu homogène, aussi nous considérons dans tous les cas traités (cas homogènes) un monocouche de sol de largeur 130m et de hauteur 20m. En fait, il s'agit dans cette partie d'analyser les effets d'interaction sol-structure. Un pont de largeur 50m et de hauteur 8m fait état de la structure. Les systèmes dynamiques dont il est question (sol et structure) sont des systèmes linéaires, dont les propriétés mécaniques (raideurs des ressorts et coefficients d'amortissement) sont constants dans le temps. L'intensité de l'excitation sera limitée à une valeur de telle sorte qu'aucune non-linéarité géométrique ne soit envisageable.

II. DESCRIPTION DES MODELES SOL ET STRUCTURE

Nous procédons dans ce qui suit à des descriptions séparées du sol et de la structure. Néanmoins, nous prévoyons une description complète du comportement (réponses) du système globale sol- structure sous l'effet de l'interaction dans le paragraphe III.

II.1 Sol

Le sol est en réalité un milieu semi-infini suivant la direction latérale, borné à sa partie inférieure par un substratum rocheux, cependant l'utilisation de modèles discrets en éléments finis amène à envisager un traitement par frontières de transmission. La troncature du milieu induit l'abolition de l'hypothèse du milieu semi-infini (hypothèse valable surtout pour des modèles continus). Cependant, les réponses du système global sol-structure sont identiques à celles d'un modèle continu (exacte) suivant la précision de la géométrie choisie du modèle (dimensions du maillage) et de l'emplacement des frontières utilisées.

II.1.1 Modélisation

Aspects Mécaniques :

Nous traiterons deux types de sols, mou et ferme ayant les propriétés mécaniques données dans le tableau IV-1

Tableau IV-1 : Caractéristiques mécaniques des sols.

Type de sol	v_s (m/s)	G_0 (Mpa)	ξ (%)	ρ (Kg/m ³)	μ
Sol mou	200	80	10	2000	0.35
Sol ferme	700	980	15	2000	0.35

Avec : v_s : Vitesse de propagation de l'onde de cisaillement.

G_0 : Module de cisaillement.

ρ : Masse volumique.

μ : coefficient de poisson.

ξ : taux d'amortissement .

Ce qui nous fait un rapport de vitesse de 3.5 et de module de cisaillement d'environ 12.

Maillage :

Pour la modélisation en éléments finis, nous utilisons des mailles quadrilatérales. La taille de ces éléments est directement liée au phénomène de propagation d'ondes dans le sol (chapitre (II) paragraphe (III)). Nous avons donc une assez forte restriction quant au choix de la hauteur de la maille. Ceci étant, nous avons choisi des éléments de 1m de hauteur et de 2m de largeur. Les inégalités de l'équation (II-15) sont respectées.

Conditions Aux Limites :

Dans tous les cas traités, nous plaçons des frontières de transmission absorbantes de type impédance (ressort –amortisseur) à 40m de part et d'autre de la structure (pont). Nous verrons par la suite que cet emplacement a donné pleinement satisfaction quant aux réponses calculées.

II.1.2 Signal d'entrée

Nous disposons de trois signaux enregistrés en surface libre. Deux de ces signaux sont des accélérogrammes réels, enregistrés respectivement sur sols mou et ferme. Le troisième signal est synthétique, construit par simulation (bruit blanc). La représentation temporelle et le spectre de réponse associée aux excitations au rocher après déconvolution, sont montrés sur les figures (IV-1a), (IV-1b), (IV-1c). L'intensité maximale de ces signaux au rocher est fixée à 0.1g. L'analyse de ces courbes met en évidence les points suivants :

- Les mouvements sismiques comportent 4 phases : phase initiale pendant laquelle les accélérations sont faibles, une phase forte, une phase modérée et une phase très faible (retour au repos).
- Les mouvements enregistrés sur sol mou sont à basses fréquences.
- Les mouvements enregistrés sur sol ferme sont à faibles périodes (hautes fréquences).
- En examinant les spectres de réponses, nous concluons que lorsque l'oscillateur est raide, le mouvement de celui-ci (réponse maximale) est identique à celui du mouvement exciteur. Nous retrouvons alors la notion de palier à la gamme des hautes fréquences (essentiellement visible dans l'exemple de sol mou). Nous lisons ainsi la valeur de 0.1g

sur les 3 paliers correspondants aux 3 spectres de réponses, cette valeur n'est rien d'autre que l'accélération maximale du signal d'entrée au rocher.

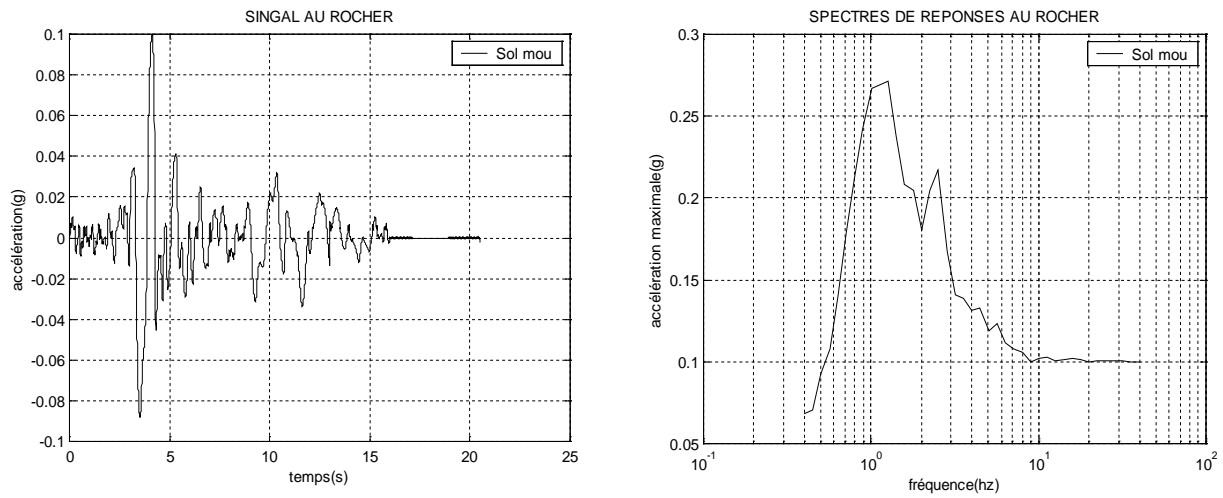


Figure (IV-1a): accélération et spectre de réponse du signal basses fréquences au rocher (sol mou).

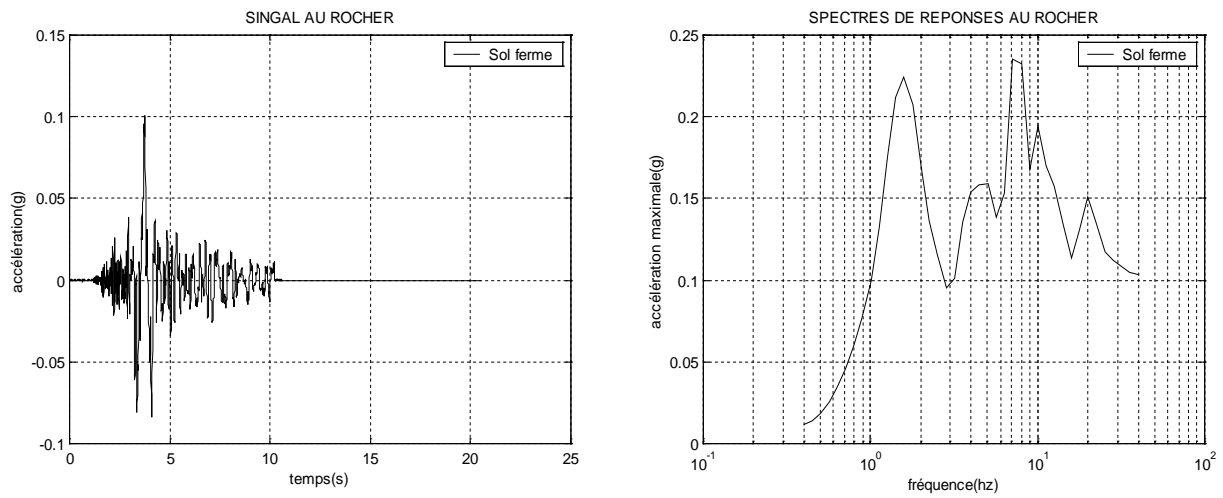


Figure (IV-1b): accélération et spectre de réponse du signal hautes fréquences au rocher(sol ferme).

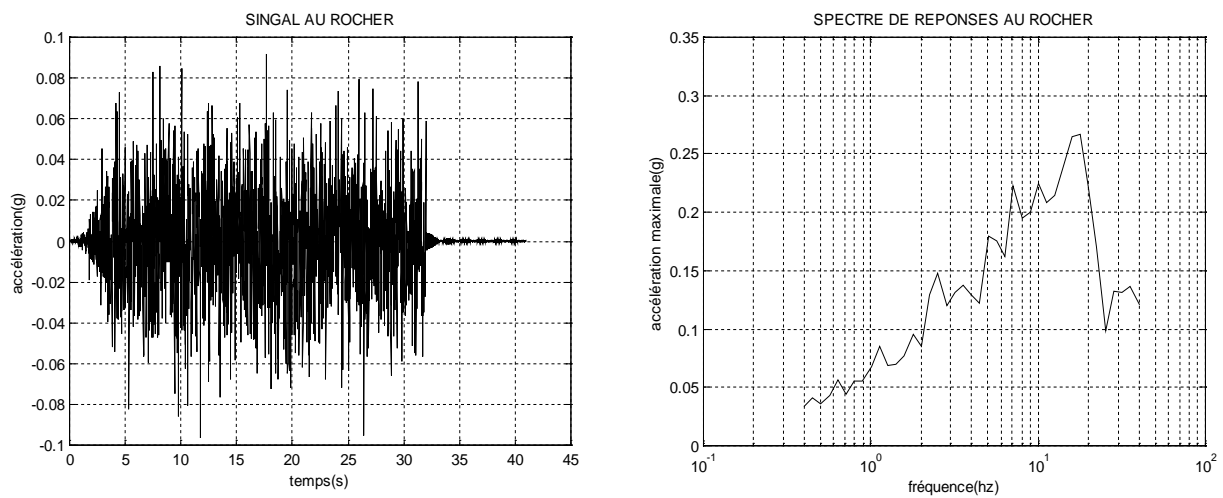
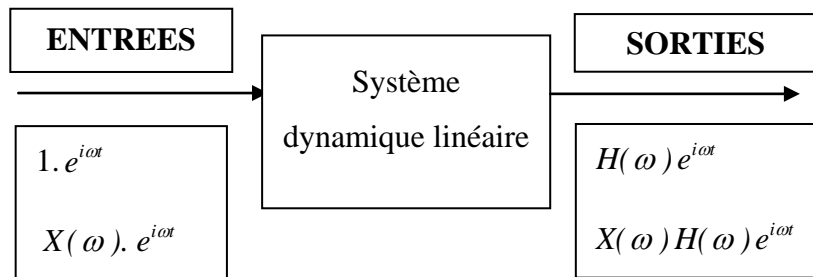


Figure (IV-1c): accélération et spectre de réponse du signal synthétique au rocher (cas de bruit blanc).

II.1.3 Réponses en champ libre**Fonctions de transfert**

La fonction de transfert (complexe frequency response) notée $H(\omega)$ est une fonction de nature complexe, celle-ci est une caractéristique intrinsèque d'un système dynamique. Elle est définie comme la réponse d'une structure à un signal monochromatique unitaire dans le domaine des fréquences.



Soit dans le domaine des fréquences, $X(\omega)$ le signal d'entrée du système dynamique, $Y(\omega)$ est la réponse à ce signal. Il sont reliés par la fonction de transfert $H(\omega)$ comme suit :

$$Y(\omega) = H(\omega) \cdot X(\omega) \quad \text{IV-1}$$

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad \text{IV-2}$$

Elle est aussi définie comme la transformée de Fourier de la réponse impulsive $h(t)$:

$$H(\omega) = TF(h(t)) \quad \text{IV-3}$$

Cette fonction de transfert nous renseigne sur les fréquences fondamentales d'un système vibratoire donné, ainsi que sur l'amplification du mouvement (entrée-sortie). Théoriquement, dans le cas d'un monocouche de hauteur H , soumis à une onde S de cisaillement qui a une vitesse de propagation v_s , les fréquences propres sont données par la relation:

$$f_i = \frac{(2i-1)}{4H} v_s \quad \text{IV-4}$$

La fréquence fondamentale du sol est alors:

$$f_1 = \frac{v_s}{4H} \quad \text{IV-5}$$

Les courbes tracées à la figure (IV-2) représentent la fonction de transfert rocher- surface libre respectivement dans le cas de sol mou et sol ferme. En d'autre part les valeurs des fréquences fondamentales calculées théoriquement (équation IV-5) sont égales à celles lues sur les courbes.

- Sur sol mou: la fréquence fondamentale du milieu est $f=2.5\text{Hz}$, ce qui correspond à une faible fréquence, le milieu est par conséquent flexible, ceci justifie les réponses en surface libre où les périodes des mouvements sont très importantes (figure IV-3a).
- Sur sol ferme: la fréquence fondamentale du milieu est $f=8.75\text{Hz}$: ce qui correspond à une assez grande fréquence fondamentale, le milieu est par conséquent assez rigide, ce qui justifie les réponses en surface libre où les amplitudes se resserrent (faibles périodes) (figure IV-3b).
- Les courbes des fonctions de transfert rocher-champ libre démontrent que le sol mou amplifie beaucoup plus les mouvements que le sol ferme.
- Les valeurs de 2.5Hz et 8.75Hz sont retrouvées au niveau des spectres de réponses. L'amplification spectrale maximale se produit à la pulsation propre du système.

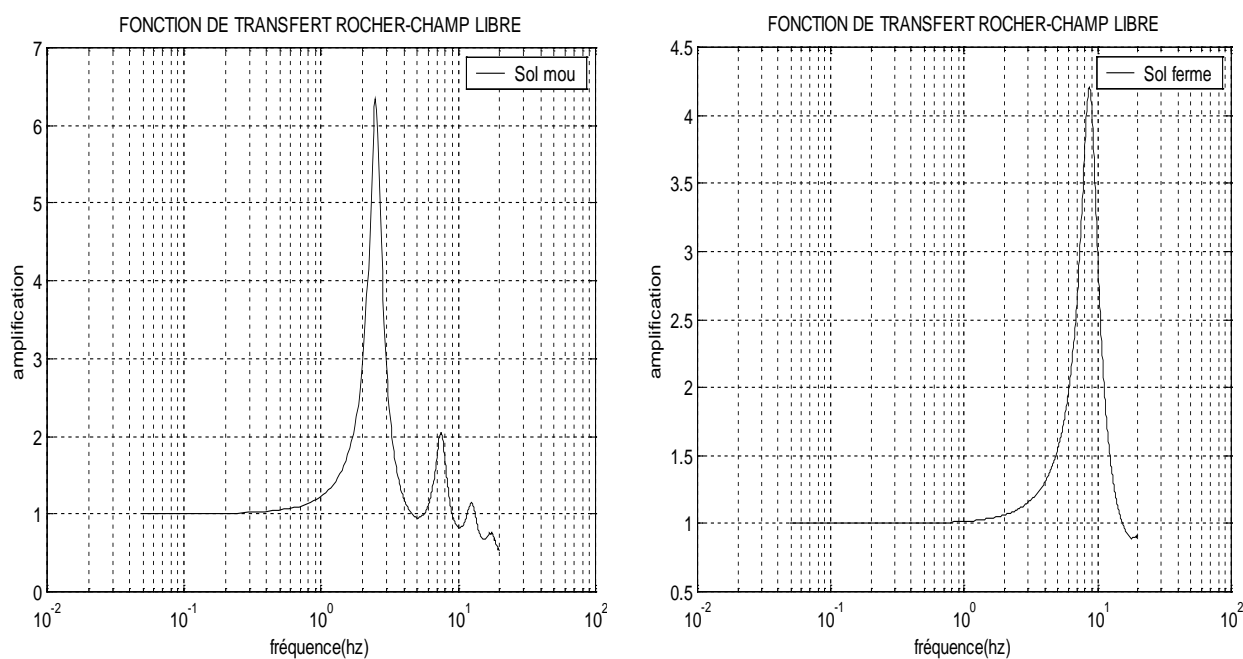


Figure (IV-2): Fonction de transfert rocher- champ libre

Accélération et spectres

La théorie des spectres de réponses a été introduite par BIOT et développée par G.W. Housner dans les années 40. Les figures (IV-3a) (IV-3b) et (IV-3c) représentent les réponses en termes d'accélération à la surface libre aux signaux d'entrée spécifiés précédemment, ainsi que leur spectres correspondants et ce dans les deux cas de sols mou et ferme.

Cas de signaux réels:

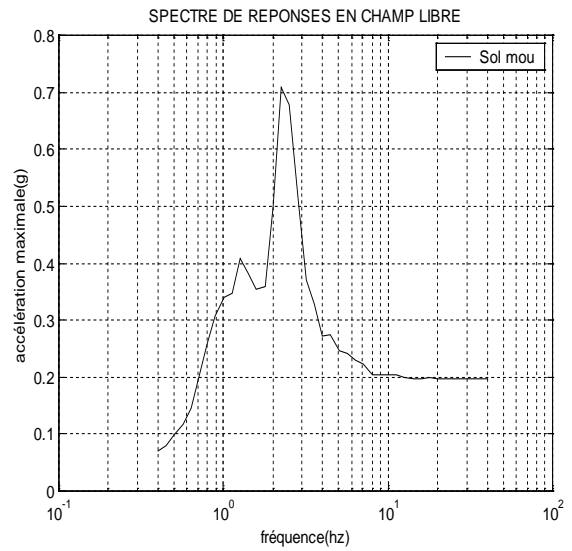
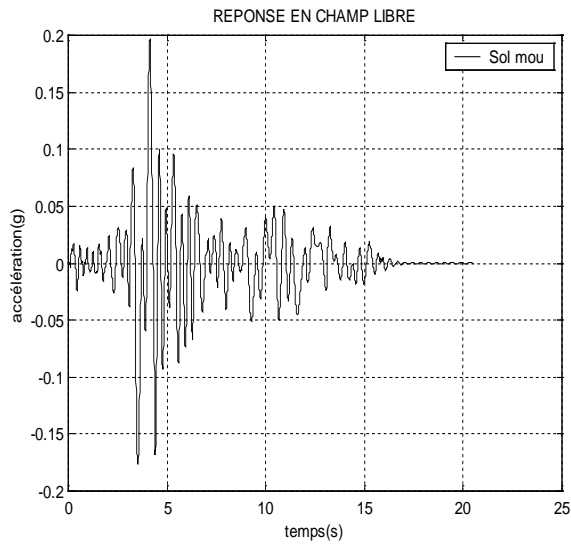
Il ressort des courbes des figures (IV-3a) et (IV-3b) ce qui suit :

- Les accélérations sont amplifiées, leurs pics passent de 0.1g à 0.2 g dans le cas d'un sol mou et à 0.15g dans le cas d'un sol ferme. Par conséquent, l'amplification est plus importante dans le premier cas.
- Les spectres de réponse en surface libre présentent des valeurs maximales plus importantes que celles des spectres de réponse au rocher. Ces valeurs atteignent leur maximum au voisinage des fréquences fondamentales du sol.

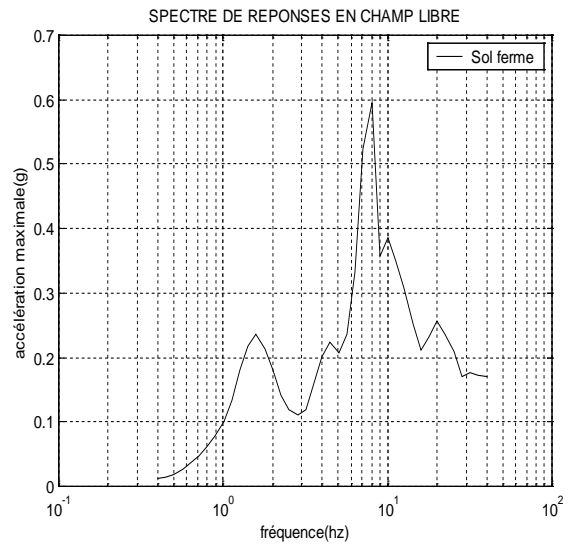
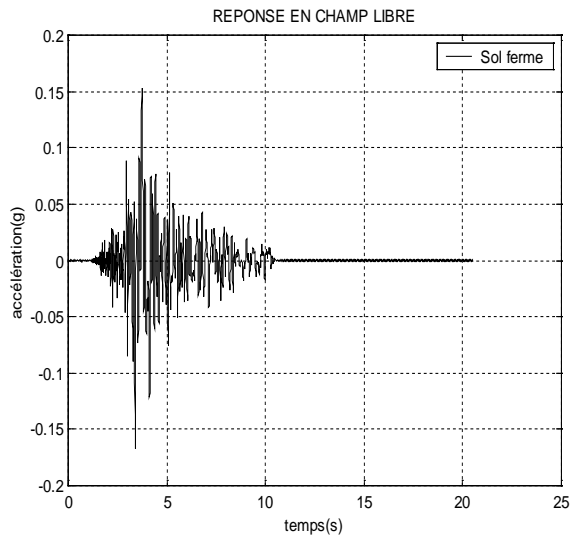
Cas de bruit blanc: Pour ce cas de figure, nous représentons uniquement les réponses spectrales en champ libre. Il ressort des courbes de la figure (IV-3c) :

- Pour les deux types de sol, l'amplification maximale s'est produite au voisinage des fréquences fondamentales des sols.
- Pour de très hautes fréquences, les courbes présentent un palier correspondant aux pics d'accélération. Il avoisine 0.2g pour les deux types de sol.

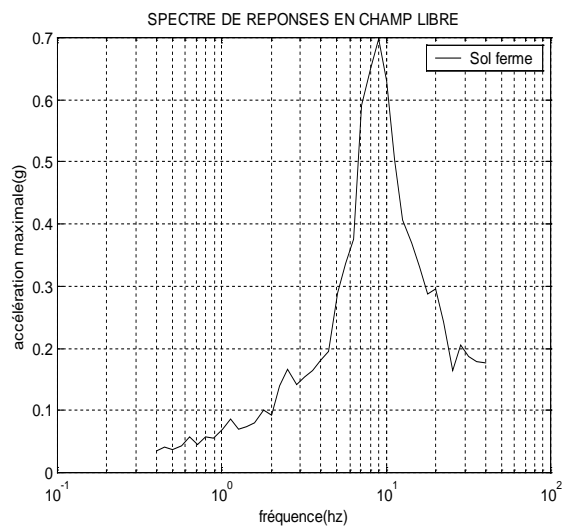
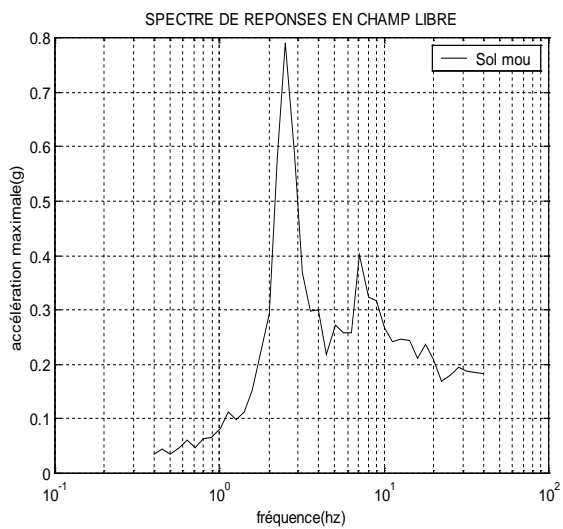
Le système vibratoire (sol) a filtré aussi bien le bruit blanc que les enregistrements sismiques, il laisse passer ceux au voisinage de sa fréquence naturelle, qui seront fortement présents, les autres seront alors fortement atténués.



Figures (IV-3a): accélération et spectre de réponses en champ libre (cas de sol mou).



Figures (IV-3b): accélération et spectre de réponses en champ libre (cas de sol ferme).



Figures (IV-3c): spectres de réponses en champ libre (cas de bruit blanc).

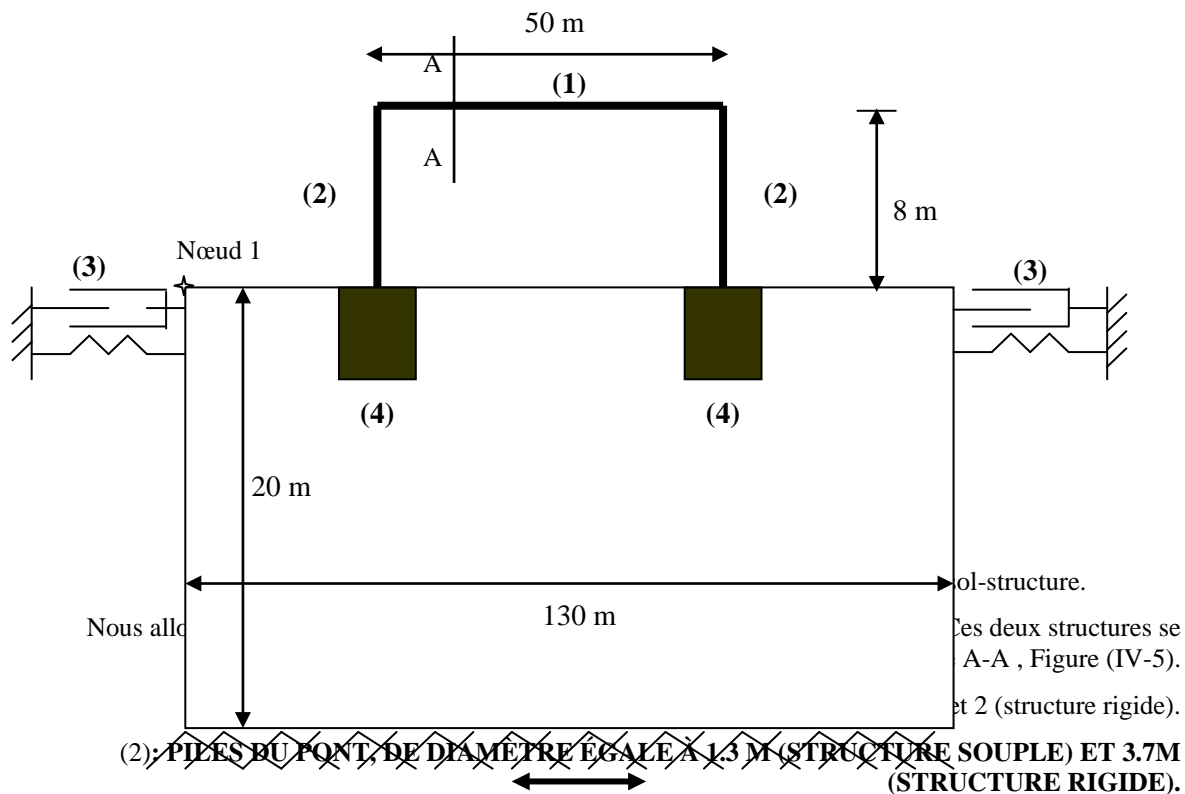
II.2 STRUCTURE

Il s'agit d'un pont en béton armé représentatif d'un ouvrage long (Figure IV-4), il possède les caractéristiques mécaniques suivantes (Tableau IV-2):

TABLEAU IV-2 : CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DE LA STRUCTURE

E (MPa)	ξ (%)	ρ (KG/M ³)	μ
24600	5	2500	0.2

Avec E : Module d'Young.



(3): FRONTIÈRES DE TRANSMISSION (IMPÉDANCES RESSORT- AMORTISSEURS) LE LONG DES FRONTIÈRES LATÉRALES.

(4): Fondations de largeur et de hauteur respectivement de 4m et de 3m, pour structure souple et 4m et 5m pour structure rigide.

La figure (IV-5) montre les coupes A-A au niveau des traverses du pont rigide et flexible.

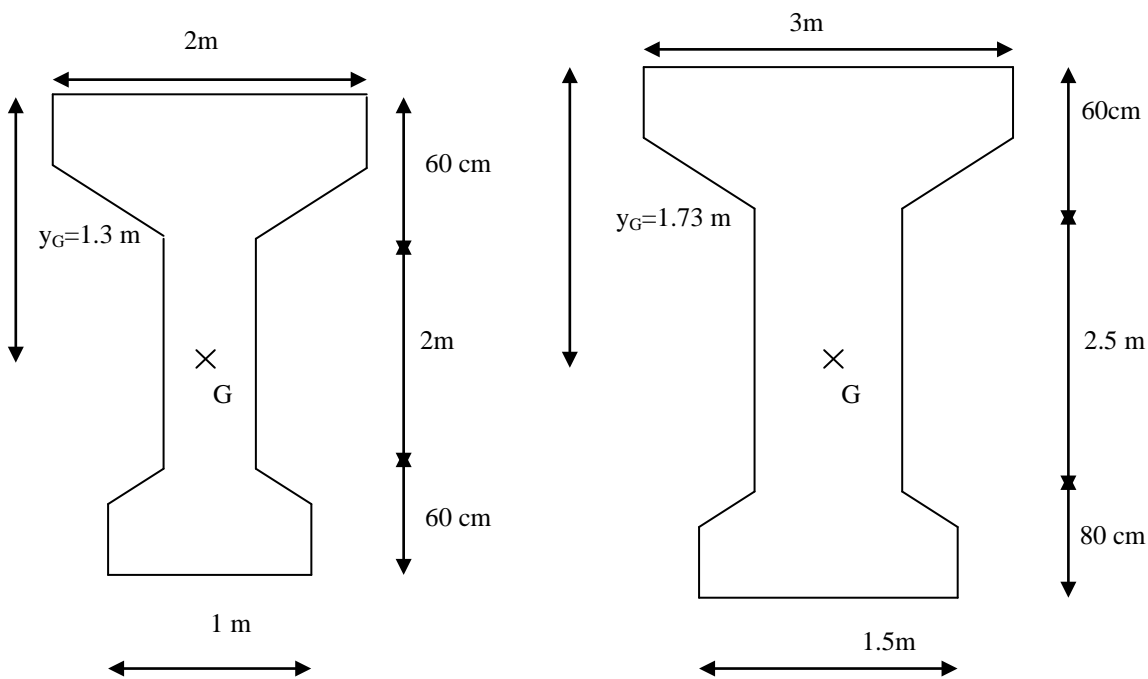
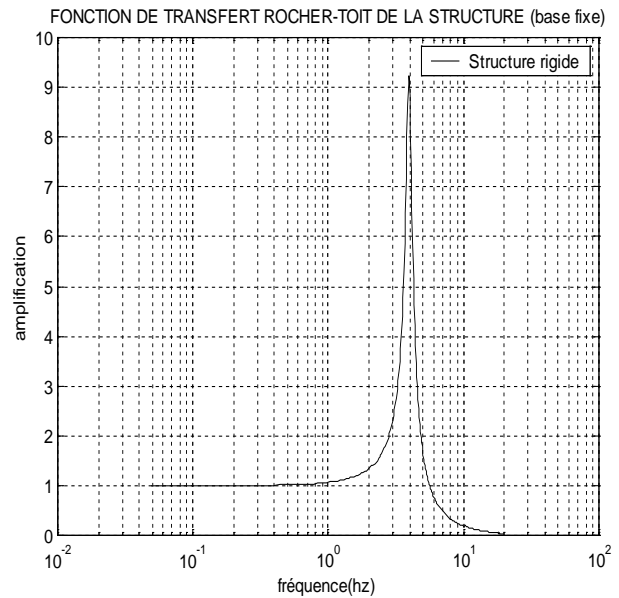
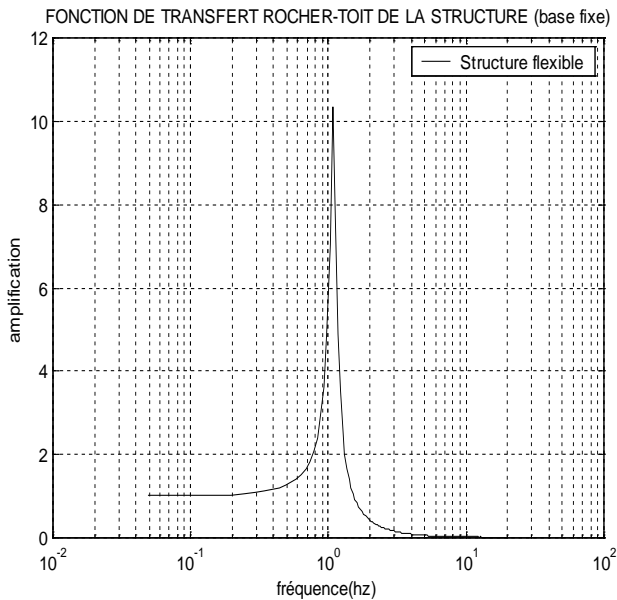


Figure (IV-5): Coupe (A-A), de structure flexible (gauche) et de structure rigide (droite).

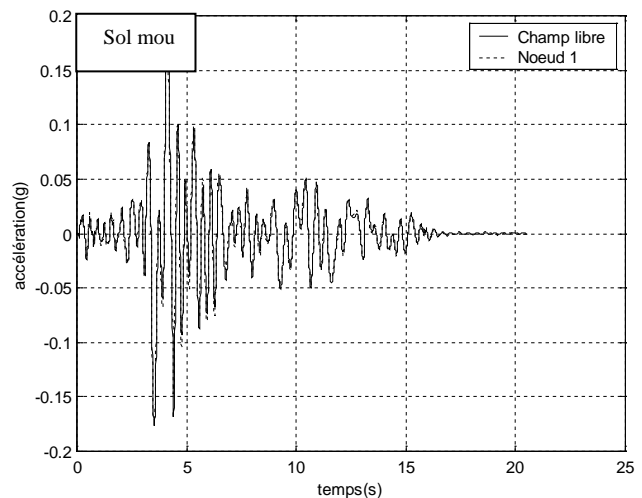
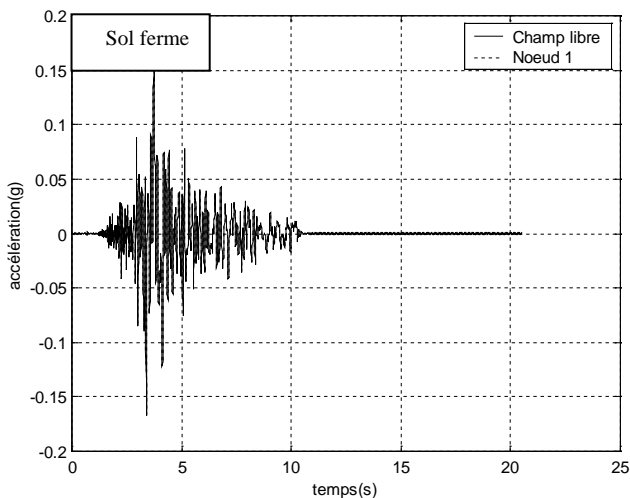
La figure (IV-6) montre la fonction de transfert entre le rocher et le toit de la structure respectivement pour structure flexible et rigide sur base fixe.

La structure flexible avec une fréquence fondamentale sur base fixe égale à **1.1Hz**

La structure rigide avec une fréquence fondamentale sur base fixe égale à **4Hz**



retenons la distance de **40m** de part et d'autre de la structure pour la modélisation en éléments finis.



PARTIR DES REPONSES EN ACCELERATIONS (HORIZONTALES ET VERTICALES), FONCTIONS DE TRANSFERT ET ENFIN SPECTRES DE REPONSES, DANS LE CAS D'EXCITATION RÉELLE. DANS LE CAS DU BRUIT BLANC NOUS REPRÉSENTONS UNIQUEMENT LES SPECTRES DE RÉPONSES.

LES DONNÉES DU PROBLÈME SONT RÉSUMÉES DANS LE TABLEAU (IV-3), IL S'AGIT DES CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES ET MÉCANIQUES DES DEUX SYSTÈMES SOL ET STRUCTURE.

DANS LE TABLEAU (IV-4) SONT RÉSUMÉS LES CAS TRAITÉS POUR L'ANALYSE DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE.

Tableau (IV-3) : Récapitulatif des données du modèle global sol-structure.

	Sol	Pont	Signal
Bruit blanc figure (IV-1c)	$E=2.46.10^{10}\text{Pa}$	$v_s = 200\text{m/s}$ $h = 8\text{m}$	$f = 2.5\text{Hz}$ Sol mou
Réel figure (IV-1a)	$\beta_p = 5\%$ $\rho = 2500\text{kg/m}^3$	$\beta_s = 10\%$ $\rho = 2000\text{kg/m}^3$	
	Pont flexible ($f = 1.1\text{Hz}$)	$v_s = 700\text{m/s}$ $f = 8.75\text{Hz}$	Sol ferme
Réel figure (IV-1b)	Pont rigide ($f = 4\text{Hz}$)	$\beta_s = 15\%$ $\rho = 2000\text{kg/m}^3$	

Tableau (IV-4): Cas traités pour l'analyse sol-structure

CAS TRAITÉ	SIGNAL
STRUCTURE FLEXIBLE Structure rigide sur sol mou	RÉEL BASSES FRÉQUENCES, FIGURE (IV-1A) SUR SOL MOU
STRUCTURE FLEXIBLE	BRUIT BLANC, FIGURE (IV-1C) SUR SOL MOU
STRUCTURE RIGIDE SUR SOL	MOU
STRUCTURE FLEXIBLE Structure rigide sur sol ferme	RÉEL HAUTES FRÉQUENCES, FIGURE (IV-1B) SUR SOL FERME
STRUCTURE FLEXIBLE	BRUIT BLANC, FIGURE (IV-1C) SUR SOL FERME
STRUCTURE RIGIDE SUR SOL	FERME

III.1 EFFET DE L'ATTÉNUATION DU MOUVEMENT SISMIQUE

POUR CERNER CET EFFET D'ATTÉNUATION DU MOUVEMENT SISMIQUE EN PRÉSENCE DE LA STRUCTURE, NOUS AVONS TRACÉ LES RÉPONSES TEMPORELLES EN

TERME D'ACCÉLÉRATIONS EN CHAMP LIBRE, À LA BASE DE LA STRUCTURE AINSI QU'À SON TOIT, ET LES SPECTRES DE RÉPONSES CORRESPONDANT À CES ACCÉLÉRATIONS ; NOUS AVONS AUSSI TRACÉ LES FONCTIONS DE TRANSFERT ENTRE LE ROCHER ET LA SURFACE LIBRE, LE ROCHER ET LA BASE ET LE ROCHER ET LE TOIT DE LA STRUCTURE. DANS UN PREMIER CAS, ON S'EST LIMITÉ AU CAS DE SIGNAL RÉEL CE QUI NOUS DONNE QUATRE (4) CAS À TRAITER.

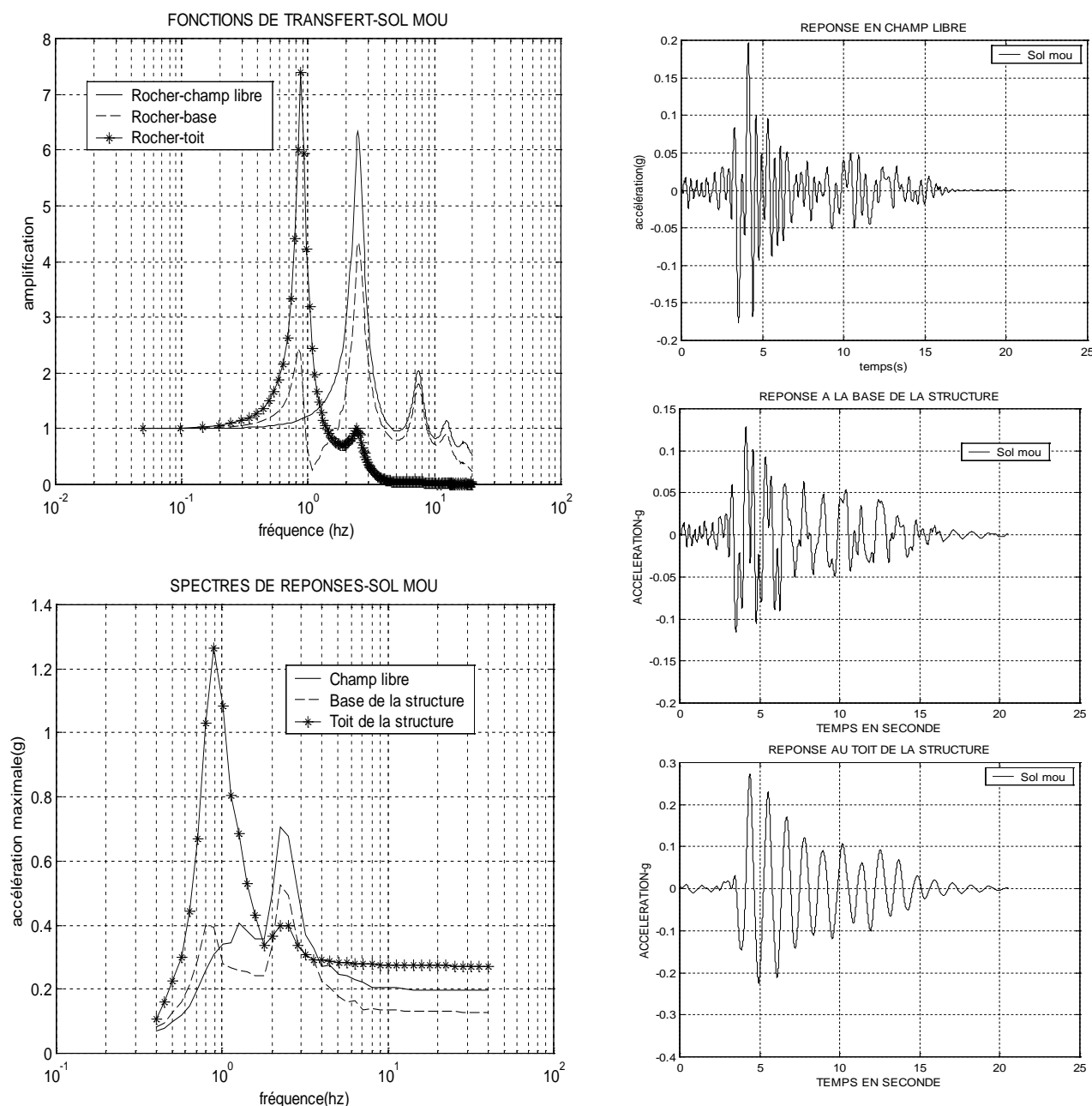
III.1.1 CAS DE STRUCTURE FLEXIBLE SUR SOL MOU

LES COURBES DE LA FIGURE (IV-8) MONTRENT CLAIREMENT:

LA DÉSAMPLIFICATION DU MOUVEMENT SISMIQUE À LA BASE DE LA STRUCTURE PAR RAPPORT À CELUI EN CHAMP LIBRE, NOUS NOTONS LE PASSAGE DE L'AMPLIFICATION MAXIMALE DE 6.2 EN CHAMP LIBRE À 4.2 À LA BASE DE LA STRUCTURE.

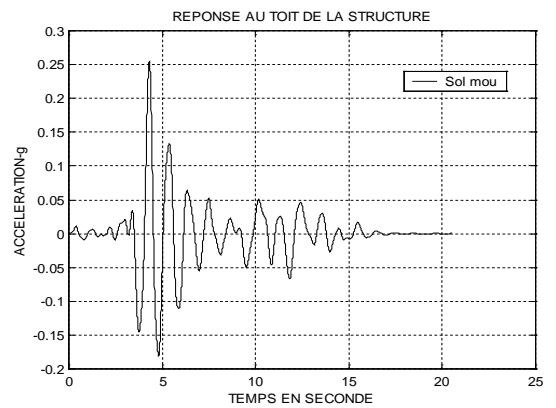
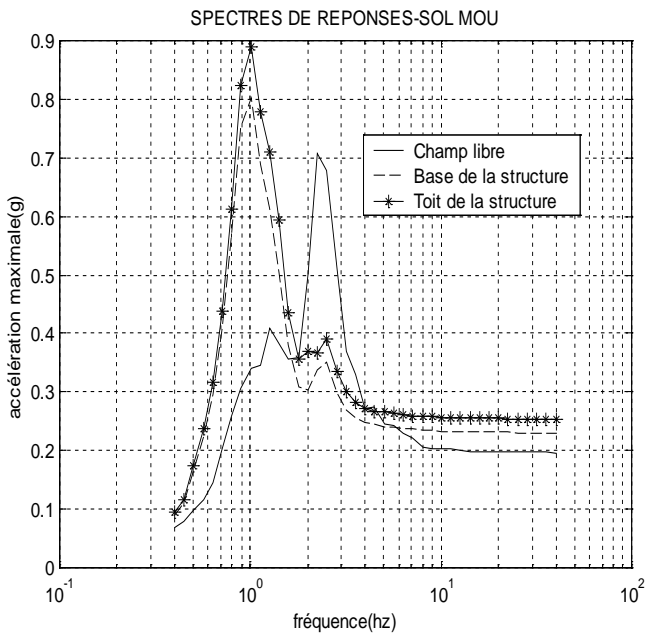
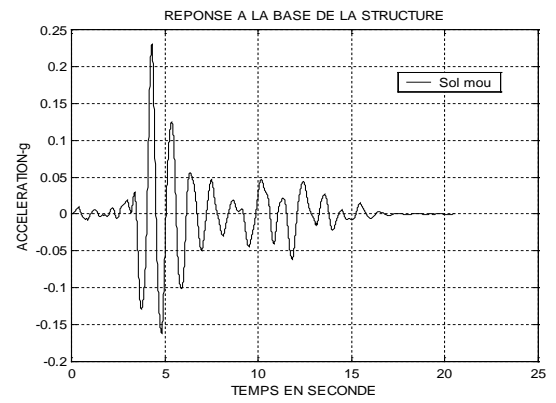
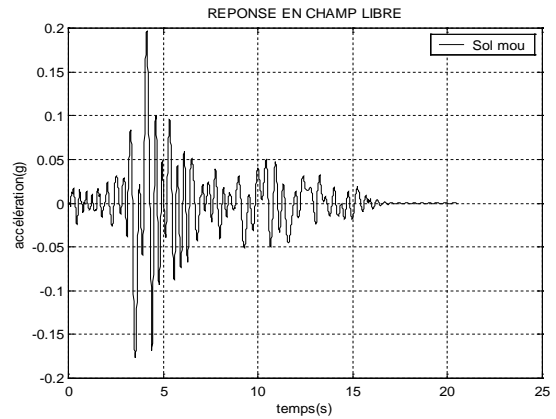
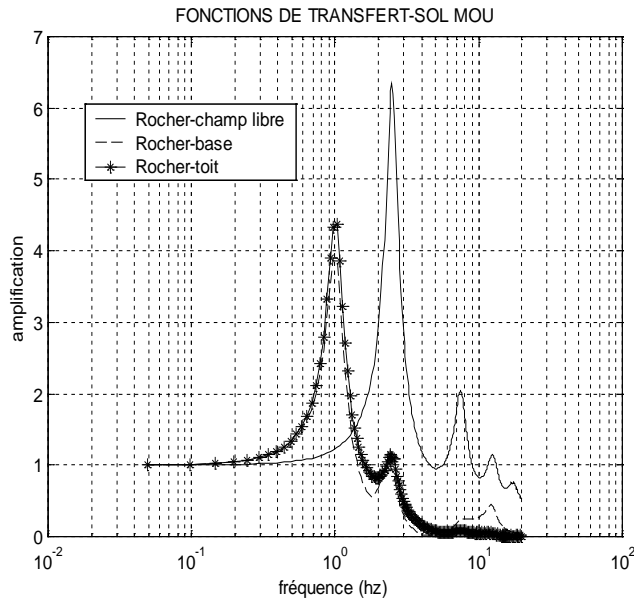
FILTRAGE DES RÉPONSES SPECTRALES À LA BASE DE LA STRUCTURE EN COMPARAISON AVEC CELLES EN CHAMP LIBRE, ET CELA À LA GAMME DES HAUTES DES FRÉQUENCES.

CETTE DÉSAMPLIFICATION EST AUSSI NETTEMENT APPARENTE SUR LES COURBES EN ACCÉLÉRATIONS OÙ L'ON REMARQUE L'ATTÉNUATION DU MOUVEMENT SISMIQUE À LA BASE DE LA STRUCTURE.



FILTRAGE DES RÉPONSES SPECTRALES À LA BASE DE LA STRUCTURE EN COMPARAISON AVEC CELLES EN CHAMP LIBRE, ET CELA POUR LA GAMME DES HAUTES FRÉQUENCES.

L'EXAMEN DES COURBES EN ACCÉLÉRATIONS À LA BASE DE LA STRUCTURE ET EN CHAMP LIBRE MONTRENT GLOBALEMENT UNE ATTÉNUATION DES MOUVEMENTS EN PRÉSENCE DE LA STRUCTURE.



SONT EGALEMENT SUPERPOSEES, AUCUNE ATTÉNUATION SPECTRALE N'EST ENREGISTRÉE.

LES RÉPONSES EN TERME D'ACCÉLÉRATIONS NE PRÉSENTENT AUCUNE AMPLIFICATION EN PRÉSENCE OU PAS DE STRUCTURE. LES COURBES SONT TRÈS COMPARABLES.

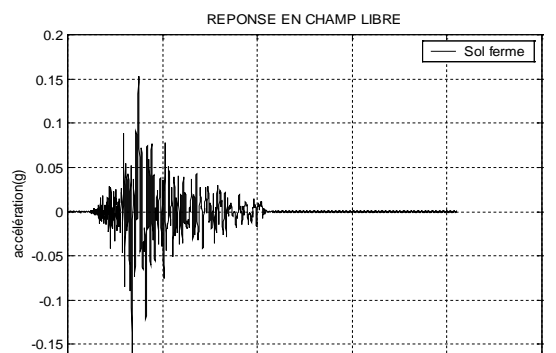
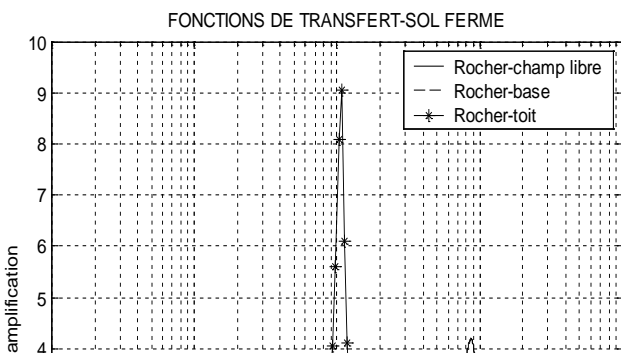


Figure (IV-10a): Interaction sol-structure (structure flexible sur sol ferme), signal réel.

III.1.3B CAS DE STRUCTURE FLEXIBLE SUR SOL FERME (EXCITATION AU ROCHER EST À BASSES FRÉQUENCES)

LES RÉPONSES DE CETTE STRUCTURE SONT MONTRÉES SUR LA FIGURE (IV-10B). ELLES INDIQUENT CE QUI SUIT:

- LES OBSERVATIONS FAITES DANS LE CAS PRÉCÉDENT (EXCITATION À HAUTES FRÉQUENCES) RESTENT VALABLES.
- L'ACCÉLÉRATION HORIZONTALE MAXIMALE AU TOIT DE LA STRUCTURE EST DE 0.28G, CELLE CORRESPONDANT À L'EXCITATION À HAUTES FRÉQUENCES EST DE 0.11G. CECI EST JUSTIFIÉ PAR LE FAIT QUE LES FRÉQUENCES AVOISINANTES DE LA FRÉQUENCE NATURELLE DE LA STRUCTURE SONT FORTEMENT PRÉSENTES DANS LE PREMIER CAS D'EXCITATION À BASSES FRÉQUENCES. LE SYSTÈME VIBRATOIRE (STRUCTURE) EST LUI AUSSI À BASSE FRÉQUENCE.

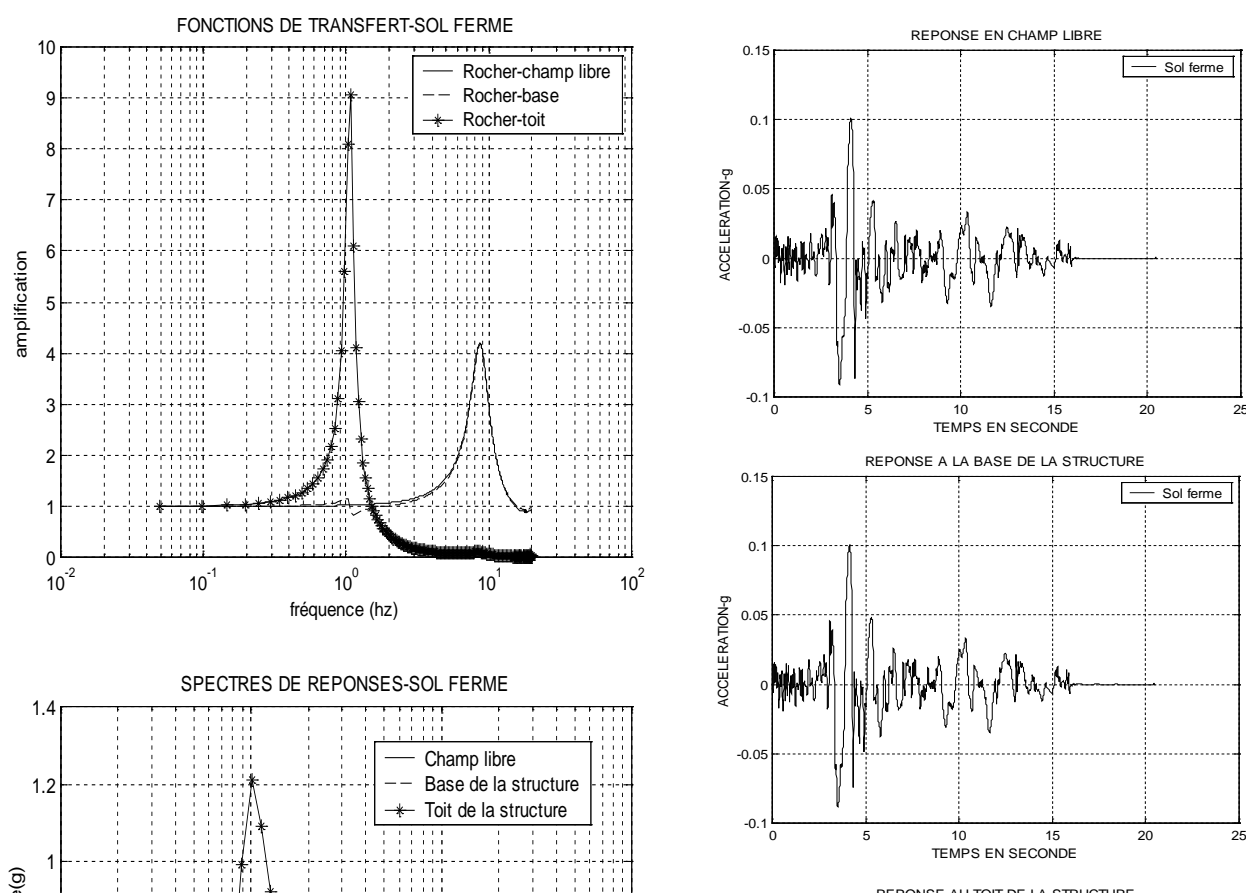
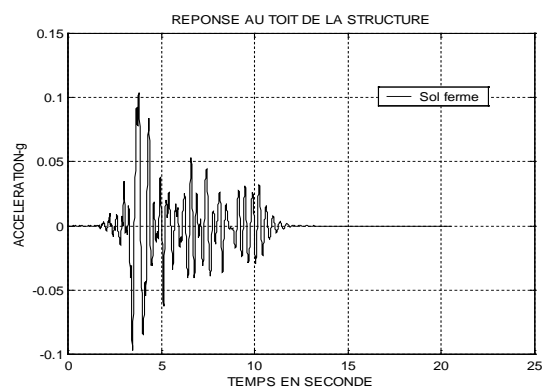
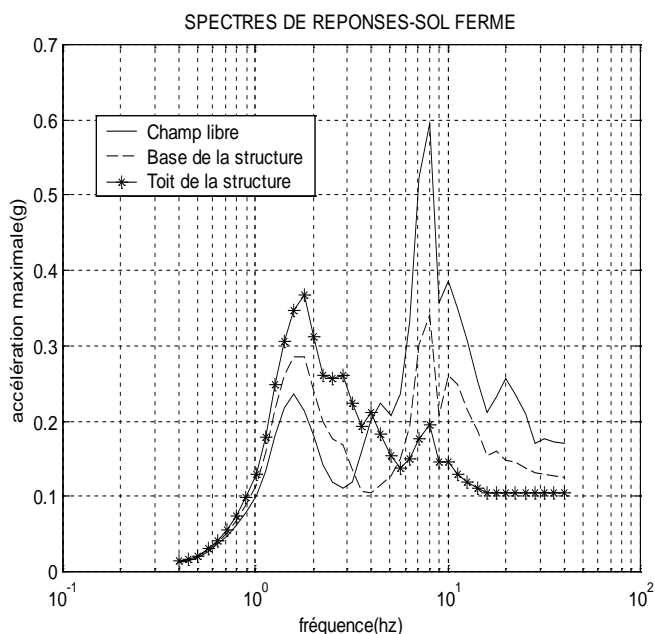
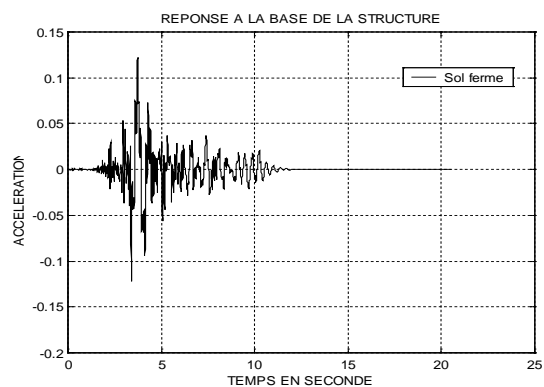
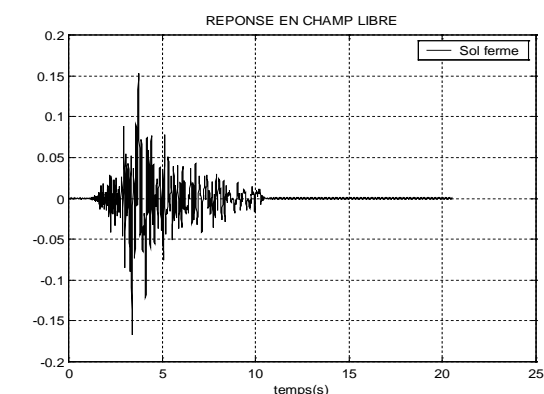
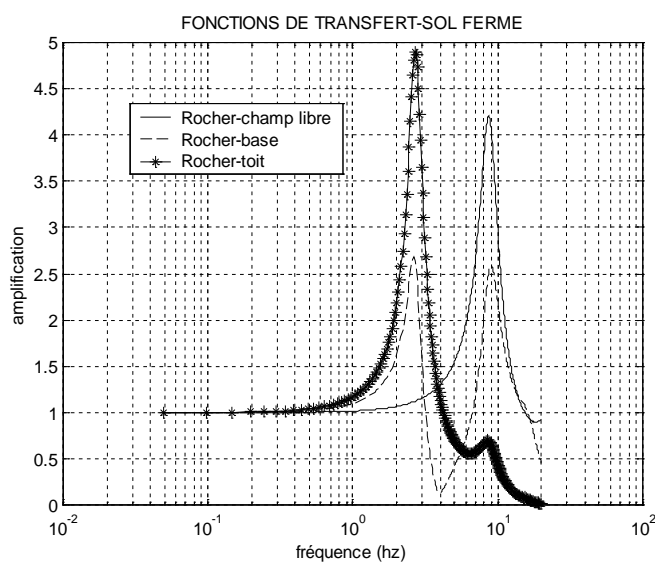


Figure (IV-10b): Interaction sol-structure (structure flexible sur sol ferme), signal réel.

III.1.4A CAS DE STRUCTURE RIGIDE SUR SOL FERME (EXCITATION AU ROCHER EST À HAUTES FRÉQUENCES)

CONTRAIREMENT AU CAS PRÉCÉDENT, DANS LE CAS DE STRUCTURE RIGIDE SUR SOL FERME (FIGURE IV-11A) ON NOTE :

- LA DÉSAMPLIFICATION DU MOUVEMENT SISMIQUE À LA BASE DE LA STRUCTURE PAR RAPPORT À CELUI EN CHAMP LIBRE, EN EFFET NOUS ENREGISTRONS UNE AMPLIFICATION MAXIMALE DU MOUVEMENT À LA BASE PAR RAPPORT AU ROCHER DE 2.6 CELLE PAR CONTRE EN CHAMP LIBRE EST DE 4.2.
- FILTRAGE DES RÉPONSES SPECTRALES À LA BASE DE LA STRUCTURE À LA GAMME DES HAUTES DES FRÉQUENCES.
- L'EXAMEN DES COURBES EN ACCÉLÉRATIONS À LA BASE DE LA STRUCTURE ET EN CHAMP LIBRE MONTRE CLAIEMENT QUE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE INDUIT L'ATTÉNUATION DES MOUVEMENTS À LA BASE DE LA STRUCTURE.



L'ACCÉLÉRATION HORIZONTALE MAXIMALE AU TOIT DE LA STRUCTURE EST DE 0.16G, CELLE CORRESPONDANT À L'EXCITATION À HAUTES FRÉQUENCES EST DE 0.11G. CECI EST JUSTIFIÉ PAR LE FAIT QUE LES FRÉQUENCES AVOISINANTES DE LA FRÉQUENCE NATURELLE DE LA STRUCTURE SONT DANS CE CAS DE FIGURE, FORTEMENT PRÉSENTES BEAUCOUP PLUS DANS LE PREMIER CAS D'EXCITATION À BASSES FRÉQUENCES.

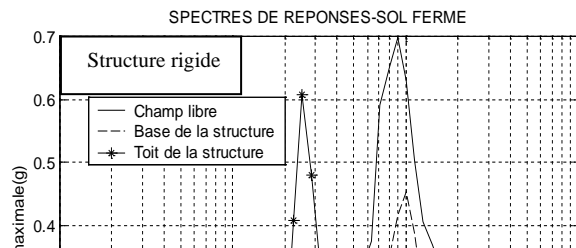
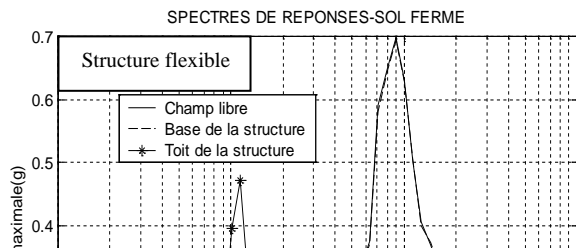
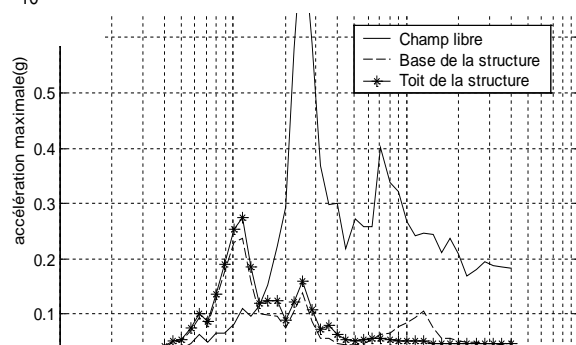
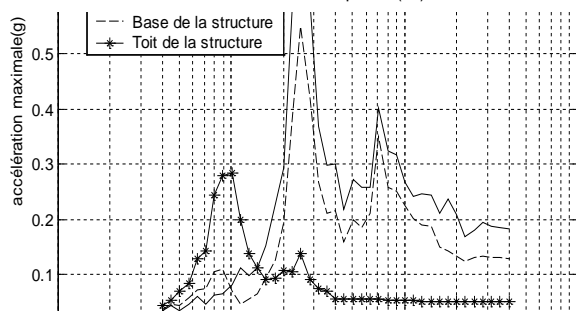
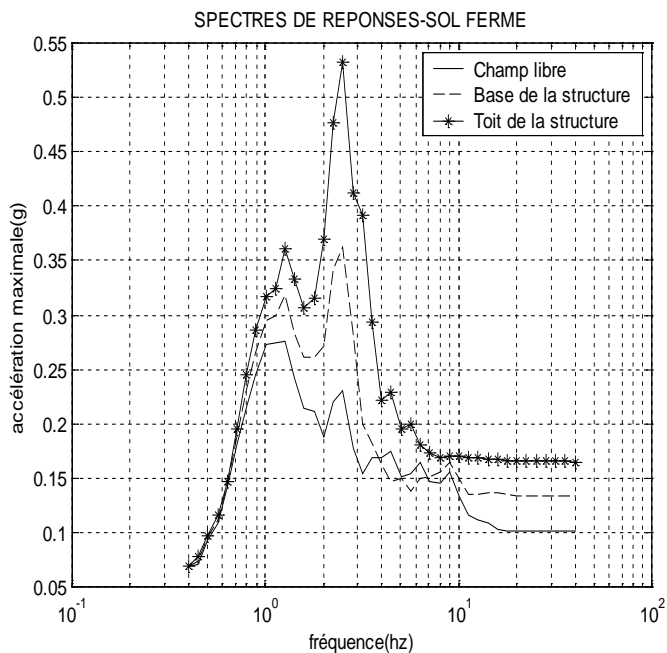
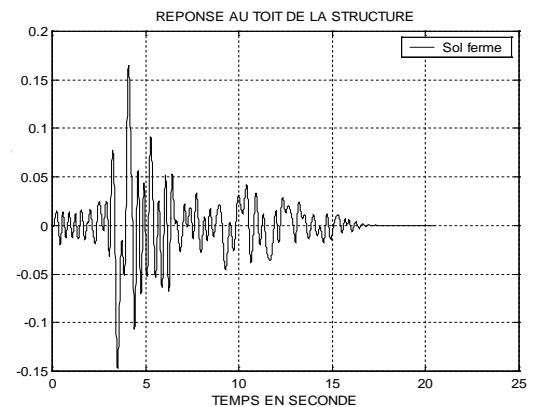
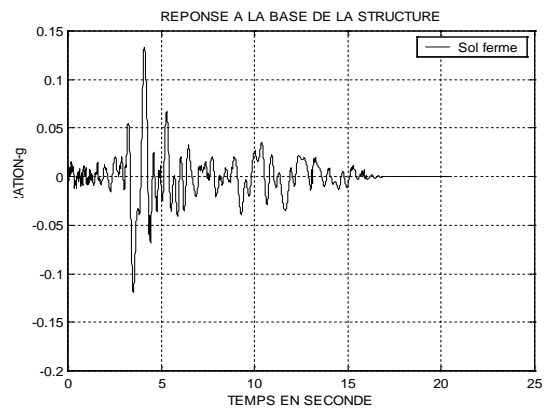
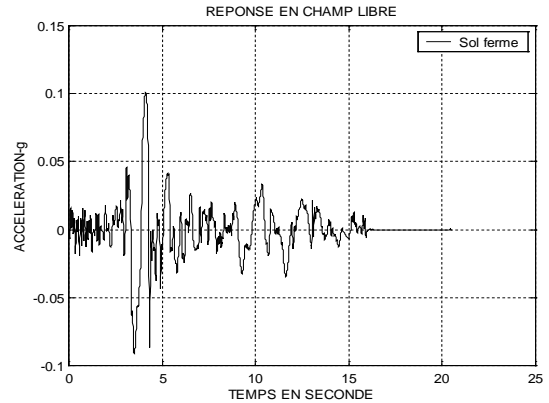
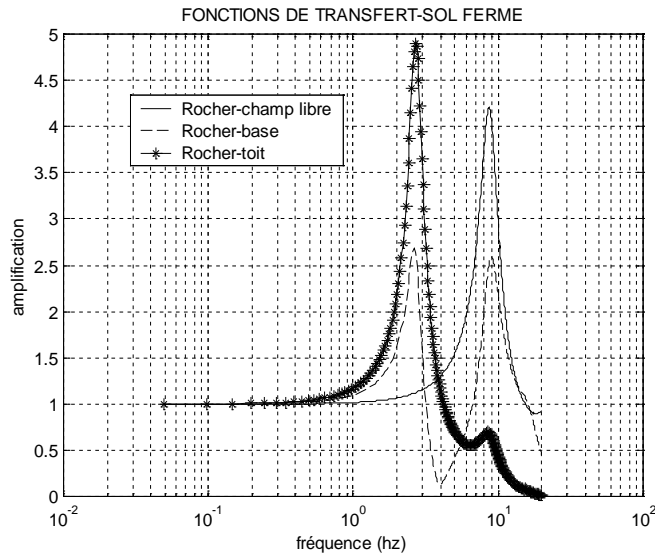


Figure (IV-13): spectres de réponses de structures sur sol ferme, bruit blanc.

III.2 EFFET DE FILTRAGE DE LA FRÉQUENCE FONDAMENTALE DU SYSTÈME SOL-STRUCTURE

L'INTERACTION SOL-STRUCTURE ENGENDRE DES EFFETS DE FILTRAGE. ILS SONT EXAMINÉS PAR LES DEUX MANIÈRES SUIVANTES:

A travers de l'analyse des spectres des réponses au toit de la structure, par la lecture de la fréquence de résonance du système global sol-structure.

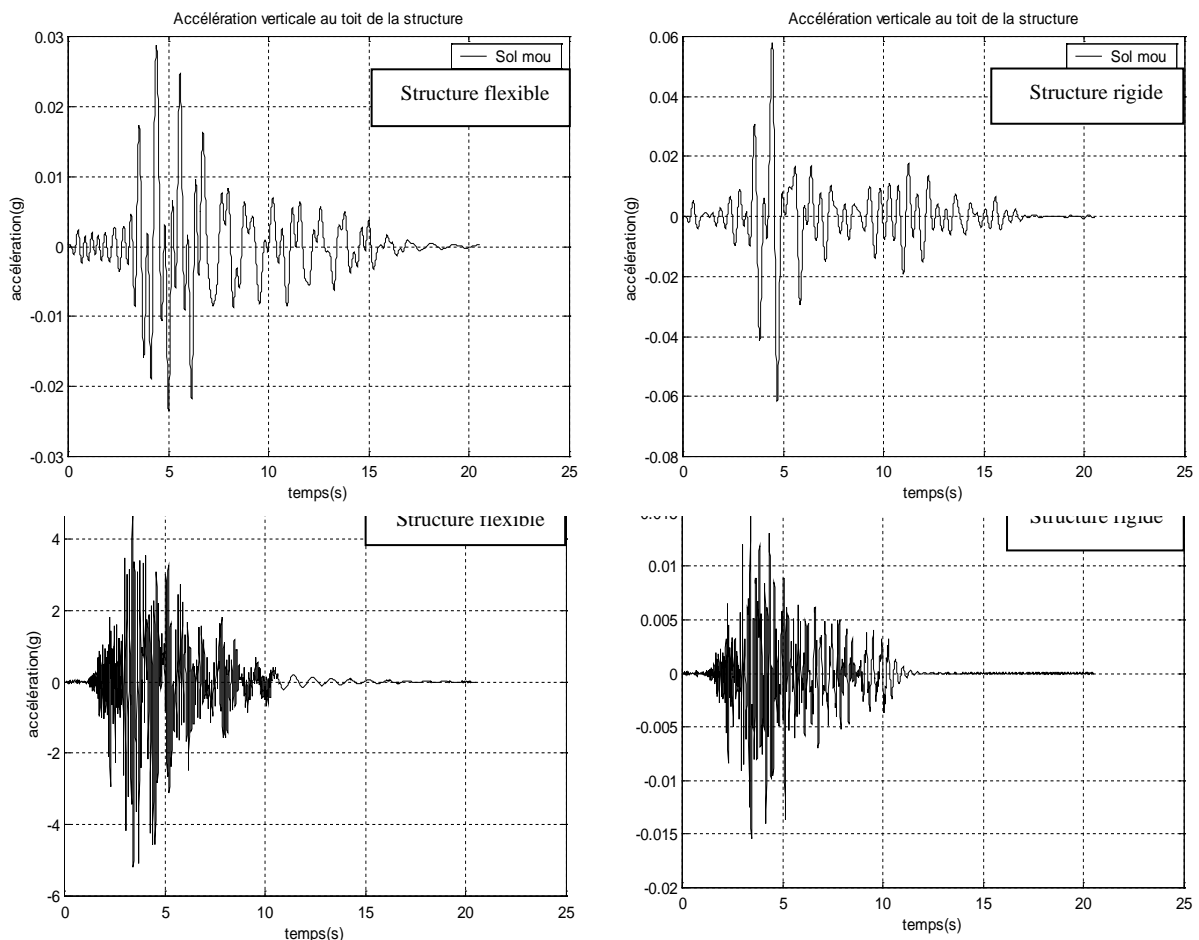
A travers de l'analyse des courbes des fonctions de transfert rocher-toit de la structure.

A partir des figures (IV-8) à (IV-11) on peut souligner ce qui suit:

- Cas de la structure flexible sur sol mou: le système passe de **1.1Hz** à **0.9Hz**. •
- Cas de la structure rigide sur sol mou: le système passe de **4Hz** à **1Hz**. •
- Cas de la structure flexible sur sol ferme: aucun effet de filtrage n'est enregistré. •
- Cas de la structure rigide sur sol ferme: le système passe de **4Hz** à **2.5Hz**. •

III.3 Mouvements verticaux

En plus de l'effet d'atténuation du mouvement à la base et au toit de la structure et l'effet de filtrage, le phénomène d'interaction sol-structure induit l'apparition de mouvements verticaux, aussi bien à la base de la structure qu'au niveau du toit de cette dernière. Nous remarquons à travers des courbes tracées aux figures (IV-14), (IV-15) que cette accélération verticale est proportionnelle à la rigidité de la structure mais cependant, elle est inversement proportionnelle à celle du sol. Les mouvements verticaux sont plus importants dans un sol mou et encore plus quand la structure est rigide.



IV ANALYSE

DANS LE CAS OÙ LE SOL EST FLEXIBLE, IL EST TOUS À FAIT LOGIQUE QUE .1
 NOUS AYANT ENREGISTRÉ DES EFFETS D'INTERACTION SOL-STRUCTURE
 (ATTÉNUATION ET EFFET DE FILTRAGE), TRÈS APPARENT DANS LES DEUX
 CAS DE STRUCTURE FLEXIBLE ET RIGIDE. CECI EST BIEN SÛRE DÛ À LA
 NATURE DE L'ASSISE QUI NE PEUT ÊTRE CONSIDÉRÉE COMME UNE BASE
 FIXE.

Dans le cas de la structure flexible sur sol ferme aucun effet d'interaction n'a eu lieu. Le sol se comporte .2
 comme une assise infiniment rigide. Cette constatation est aussi à son tour tous à fait logique vu les
 fréquences fondamentales des deux systèmes, sol à 8.75Hz et structure à 1.1Hz. Le sol est infiniment rigide
 devant la structure. Par contre dans le cas de structure rigide sur sol ferme, les fréquences fondamentales des
 systèmes commencent à s'éloigner l'une de l'autre, d'où des effets d'ISS apparaît.

Nous pouvons remarquer à travers des différentes réponses calculées que l'effet d'interaction sol-structure .3
 élimine la notion classique de résonance, couramment interprétée par la présence des réponses maximales
 dans le cas de structure flexible sur sol mou ou bien structure rigide sur sol ferme. L'effet de filtrage modifie
 la fréquence fondamentale du système globale sol-structure, la résonance se produit alors quand la nouvelle
 fréquence fondamentale du système globale sol-structure coïncide avec la fréquence centrale de l'excitation
 au rocher.

Les mouvements différentiels au niveau de la fondation sont la cause des mouvements verticaux induits au .4
 toit de la structure.

V. CONCLUSION

L'interaction sol-structure induit d'une part la désamplification de la réponse à la base de la structure
 par rapport à celle en surface libre, ceci aura comme effet l'atténuation de la réponse sismique au niveau de la
 structure. D'autre part, le phénomène d'ISS induit le filtrage de la réponse sismique, par conséquent la fréquence
 fondamentale du système globale sol-structure est décalée vers une valeur inférieure. L'interaction sol-structure
 fait apparaître aussi des mouvements verticaux au toit de la structure.

En comparant entre les cas de sol mou et ferme nous concluons qu'en présence de sol mou, l'effet
 d'interaction sol-structure ne peut être négligé, par contre dans le cas de sol ferme, ce dernier peut constituer
 dans certains cas une base fixe, et se comporter comme du rocher (mouvement de corps rigide) où nous n'avons
 aucun effet d'interaction. Ceci est cependant directement relié à la nature de la structure fondée sur ce sol. Plus
 les fréquences fondamentales des deux systèmes (sol et structure) s'éloignent l'une de l'autre plus les effets
 d'interaction sol-structure sont importants et donc à en tenir compte dans l'analyse et la conception des ouvrages.

Les effets d'interaction sol-structure sont donc plus importants pour les structures rigides fondées sur sols mous,
 les résultats ont été trouvés dans le cas de signaux réels et confirmés par des signaux synthétiques.

REPONSES DU SOL EN MILIEUX HETEROGENES

I. INTRODUCTION

Les méthodes usuelles d'analyse de sols, basées sur des approches déterministes considérant le milieu comme étant homogène ne permettent pas d'une part d'expliquer la variabilité spatiale du mouvement sismique ainsi que les mouvements différentiels des structures lors d'un séisme, et d'autre part de prédire, dans le cas statique, le dévers des structures massives et importantes.

Ces phénomènes peuvent être expliqués en considérant le sol dans sa vraie nature à savoir **HETEROGENE**. Le but de ce chapitre est de calculer la réponse des sols hétérogènes. Deux types d'hétérogénéité sont considérés : un sol à hétérogénéité quelconque et un multicouche à interfaces aléatoires. L'analyse du sol aidera par la suite à expliquer les phénomènes induits sur le système sol-structure.

II. ANALYSE SISMIQUE D'UNE COUCHE DE SOL HETEROGENE ALEATOIRE

Nous examinons dans cette partie la réponse du sol en champ libre en considérant l'aspect aléatoire du module de cisaillement. Nous traitons les effets induits de l'hétérogénéité du milieu, à savoir:

1. Effet d'atténuation et effet de filtrage du mouvement sismique à la surface du sol.
2. Effet du mouvement de rotation induit.

L'étude a consisté en l'analyse sismique de couches de sols hétérogènes et homogènes. Une comparaison entre les réponses de ces deux cas de sols est faite en combinant à chaque fois la nature du sol (mou, ferme) et le type d'excitation au rocher (signal réel, signal synthétique (bruit blanc)). Les cas traités sont alors:

- sol mou sollicité par un signal réel,
- sol mou sollicité par un signal synthétique (bruit blanc),
- sol ferme sollicité par un signal réel,
- sol ferme sollicité par un signal synthétique (bruit blanc).

II.1 Représentation des modèles de sols hétérogènes aléatoires

Les modèles de sols hétérogènes aléatoires sont générés par simulation, à partir de l'équation III-34. Les courbes (a) et (b) de la figure (V-1) représentent les distributions aléatoires du module de cisaillement respectivement pour sol ferme et mou, en considérant un écart type de 75%. La fonction de corrélation du milieu est choisie de type exponentielle.

Données statistiques:

- Distance de corrélation horizontale : $l_x = 15\text{m}$.
- Distance de corrélation verticale : $l_y = 2.5\text{m}$.

Tableau (V-1) : Pas en nombre d'onde:

Type de sol	Signal réel ($f_{\max} = 30\text{Hz}$)	Bruit blanc ($f_{\max} = 25\text{Hz}$)
Sol mou ($V_s = 200\text{m/s}$)	$\Delta k_x = \Delta k_y = 0.0096$	$\Delta k_x = \Delta k_y = 0.008$
Sol ferme ($V_s = 700\text{m/s}$)	$\Delta k_x = \Delta k_y = 0.0028$	$\Delta k_x = \Delta k_y = 0.0023$

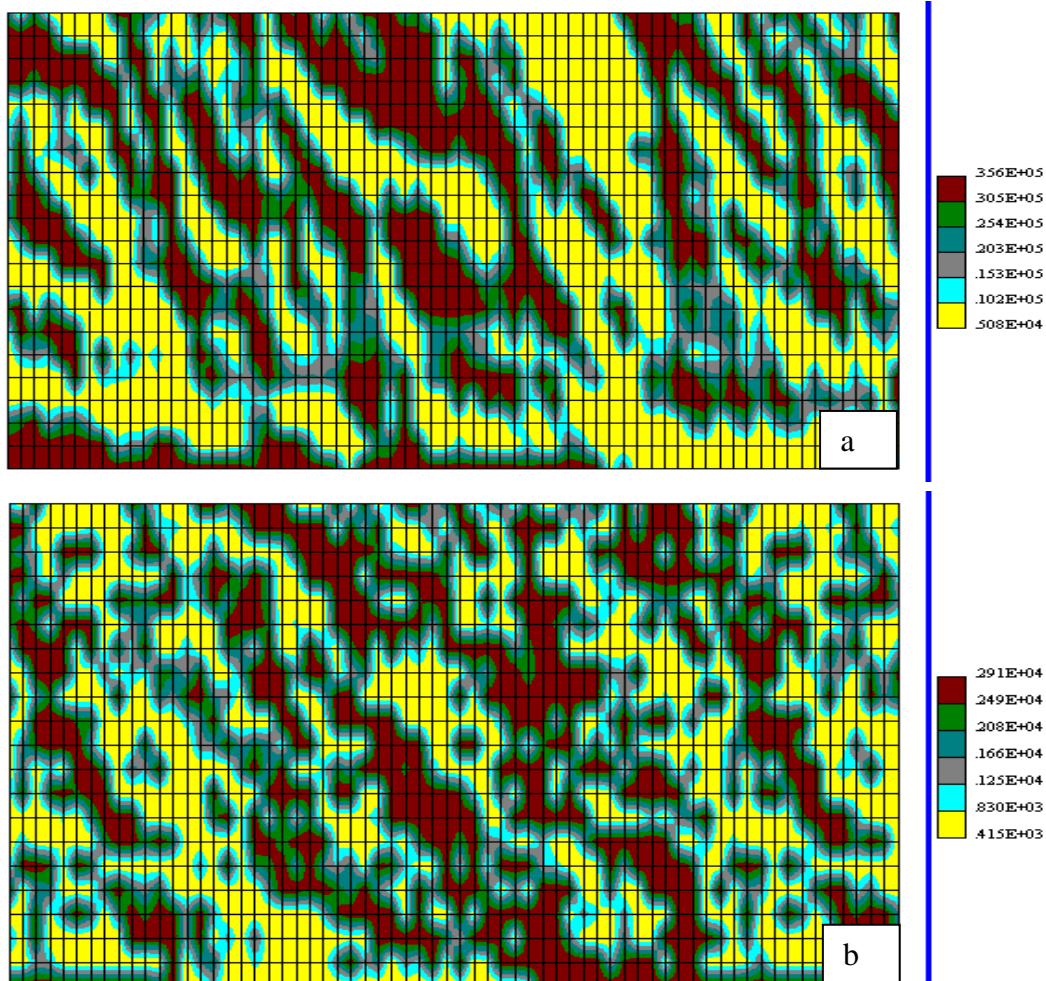


Figure (V-1): Distribution aléatoire du module de cisaillement, a- sol ferme, b- sol mou (modèle exponentiel, $\sigma_G=75\%$).

II 2 Effets de l'hétérogénéité aléatoire du sol sur la réponse en translation en champ libre

II.2 1 Effet d'atténuation de la réponse sismique

Les figures (V-2) à (V-5) montrent les réponses en terme d'accélération de couches de sols homogènes et hétérogènes calculées pour les deux types de sols mou et ferme, sous excitations réelles et synthétique (bruit blanc). Pour le sol hétérogène, on présente la moyenne de neuf (09) réponses calculées en surface dont la distance de séparation varie de 10m à 90m. Au vu des courbes tracées, on peut souligner les points suivants:

- 1) Globalement, la prise en compte de l'hétérogénéité du sol induit une atténuation de la réponse sismique de la couche de sol aussi bien dans le cas d'un sol ferme que dans le cas d'un sol mou, et pour les deux types de sollicitations (signal réel et bruit blanc).
- 2) Les réponses sous excitation synthétique (bruit blanc) s'atténuent considérablement comparées au cas d'excitation réelle, ceci est probablement dû à la présence de toutes les fréquences à même contributions dans l'excitation.

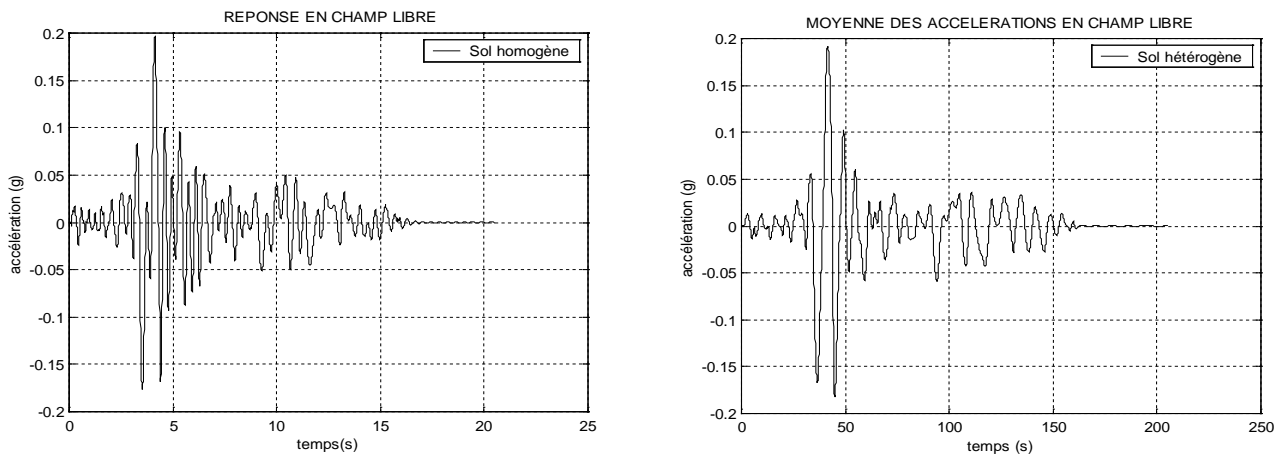


Figure (V-2): Atténuation de l'amplitude de la réponse en champ libre d'un sol mou avec une hétérogénéité de 90% (signal réel).

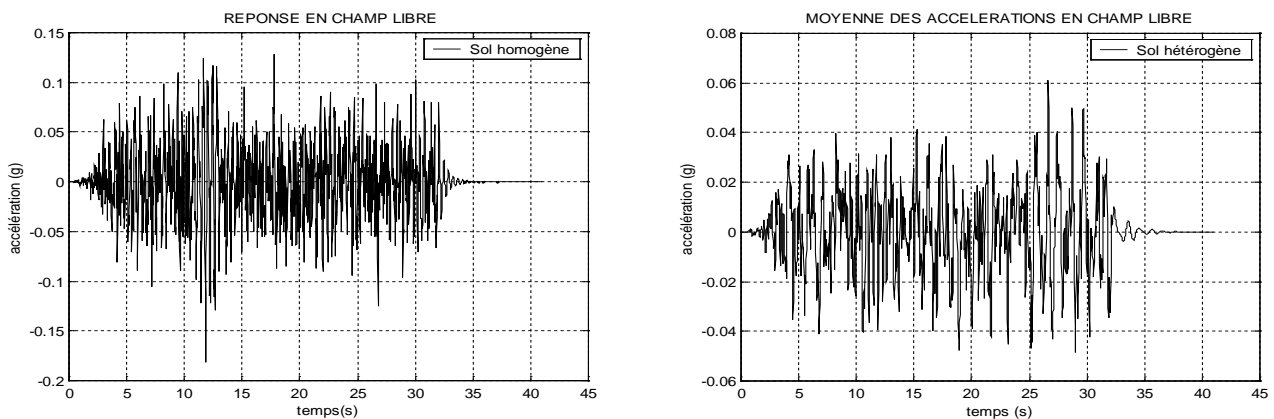


Figure (V-3): Atténuation de l'amplitude de la réponse en champ libre d'un sol mou avec une hétérogénéité de 90% (bruit blanc).

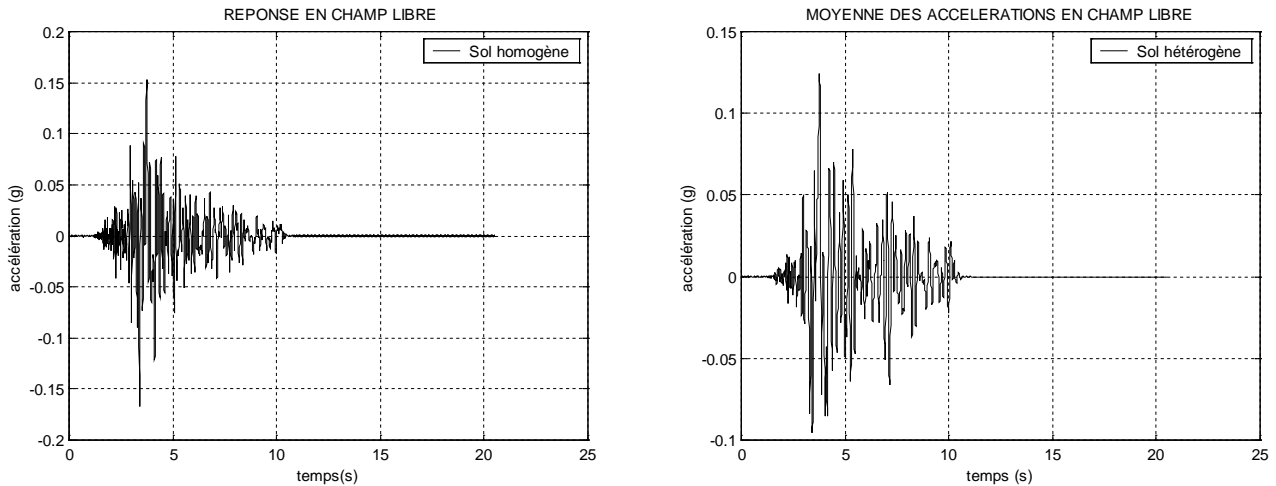


Figure (V-4): Atténuation de l'amplitude de la réponse en champ libre d'un sol ferme avec une hétérogénéité de 90% (signal réel).

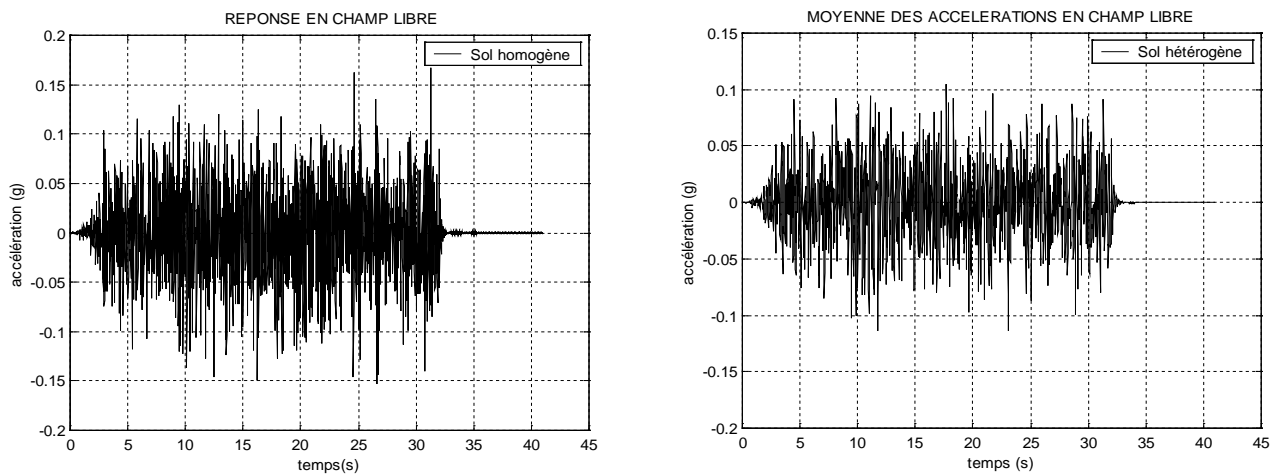


Figure (V-5): Atténuation de l'amplitude de la réponse en champ libre d'un sol ferme avec une hétérogénéité de 90% (bruit blanc).

II.2.2 Effet de filtrage de la réponse sismique

Les figures (V-6) et (V-7) montrent les fonctions de transfert entre le substratum rocheux et la surface libre du sol respectivement homogène et hétérogène. Pour la couche hétérogène, on présente la moyenne, la moyenne + écart type et la moyenne - l'écart type de neuf (09) fonctions de transfert. L'examen de ces courbes fait ressortir alors les points suivants:

- 1) L'hétérogénéité du sol induit un effet de filtrage de sa réponse sismique. Cet effet apparaît aussi bien dans le cas de sol ferme que mou, et pour les deux types de sollicitations. Cet effet est traduit par le décalage de la fréquence fondamentale de la couche de sol vers les basses fréquences.
- 2) Dans le cas du signal synthétique, le filtrage des fréquences est plus marqué en sol mou qu'en sol ferme.

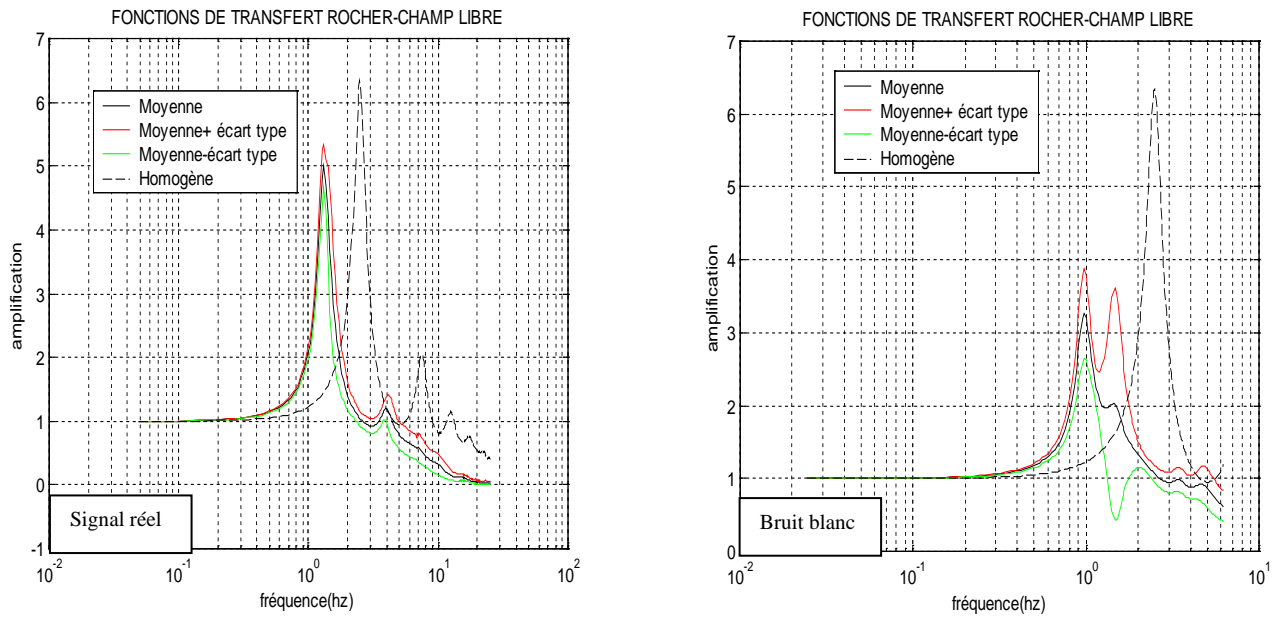


Figure (V-6): Comparaison des fonctions de transfert de la réponse d'un sol mou avec une hétérogénéité de 90%

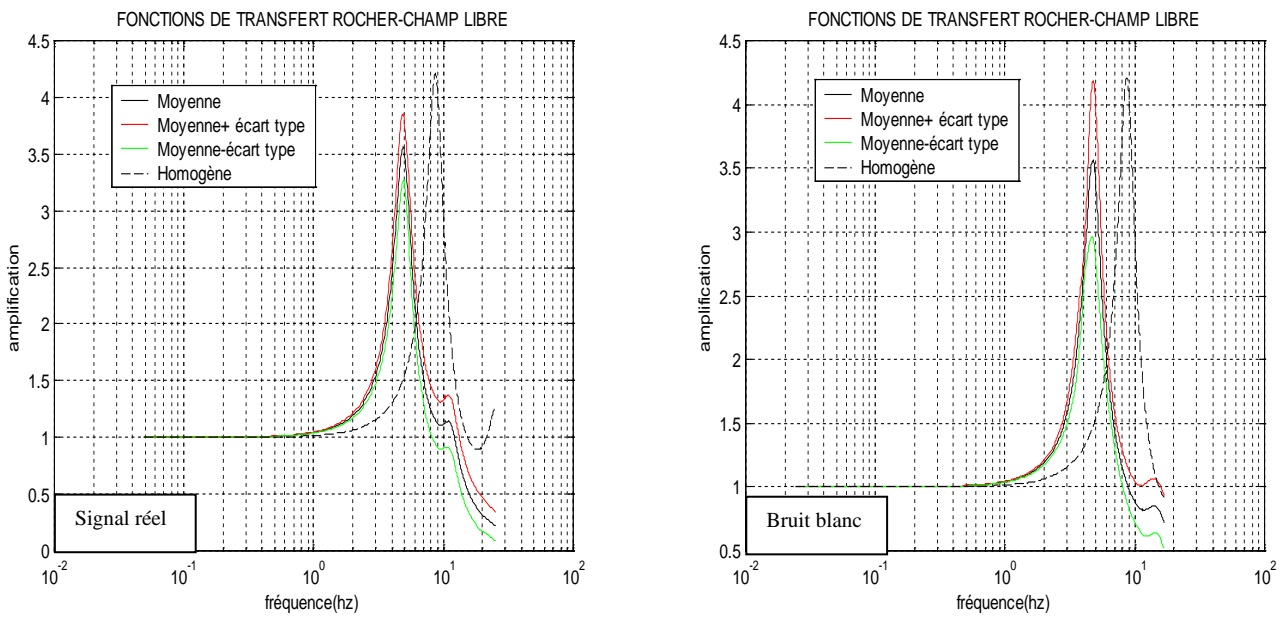


Figure (V-7): Comparaison des fonctions de transfert de la réponse d'un sol ferme avec une hétérogénéité de 90% .

II.3 Etude du mouvement de rotation induit par l'hétérogénéité du sol

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à un effet induit par la variabilité spatiale du mouvement sismique, à savoir les mouvements différentiels entre différents points en surface libre du sol. Ces mouvements normalisés par rapport à leurs distances de séparation sont appelés effet de la rotation induit.

Pour évaluer ce mouvement induit de rotation, on procède comme suit :

Nous calculons l'écart type de cet effet de rotation induit entre 9 points, choisis arbitrairement à la surface libre d'un sol mou d'une part et d'un sol ferme d'autre part. Le calcul de ces écarts types se fait entre couples de deux points avec une distance de séparation variant de 10m à 80m.

Le mouvement de rotation adimensionnelle est calculé par la formulation suivante :

$$\theta_{ij} = \frac{x_i(t) - x_j(t)}{u_{ij}}$$

$x_i(t), x_j(t)$: accélération horizontale aux points i et j respectivement.

u_{ij} : distance de séparation entre les deux points i et j.

Les écarts type calculés sont représentés par la figure (V-8). Il ressort que:

1. L'écart type du mouvement de rotation induit est inversement proportionnel à la distance de séparation, il atteint des valeurs extrêmes pour de faibles distances, résultat déjà trouvé expérimentalement par Laouami, 1996.
2. Les amplitudes de cet écart type sont plus importantes dans le cas du sol mou que dans le cas du sol ferme, le rapport peut atteindre dix (10) (figure(V-8)).

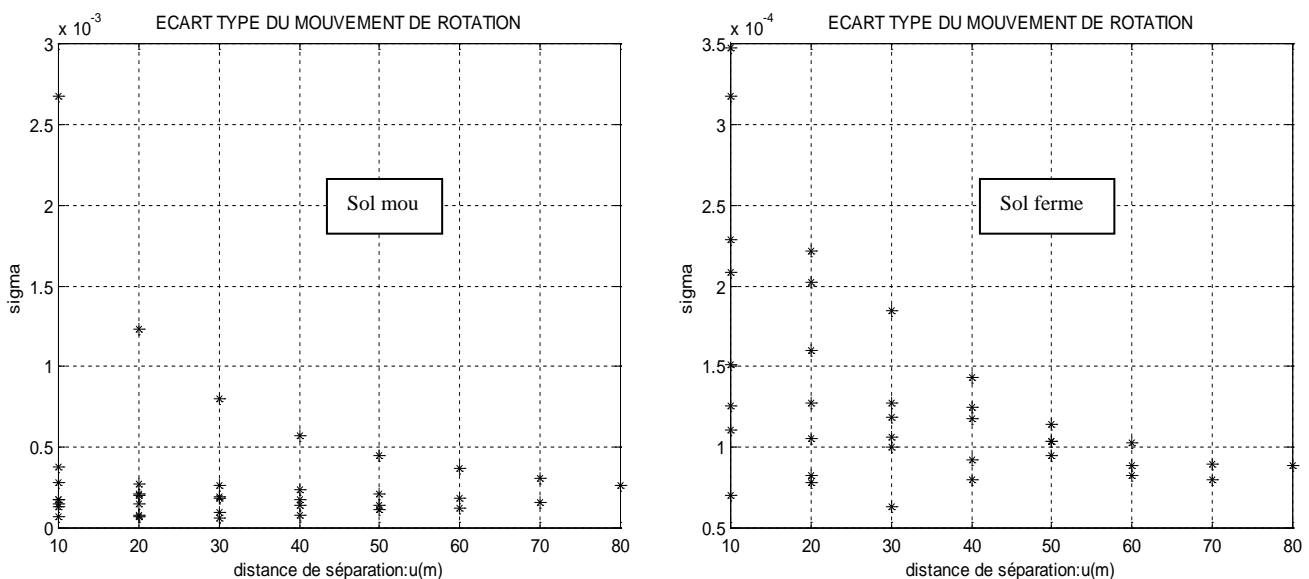


Figure (V-8): Variation de l'écart type du mouvement de rotation en fonction de la distance de séparation (avec une hétérogénéité de 90%)

III. ANALYSE SISMIQUE D'UN MULTICOUCHE A INTERFACES ALEATOIRES

Cette seconde partie de ce chapitre consiste en l'analyse d'un deuxième modèle de milieu hétérogène, en l'occurrence le multicouche à interfaces aléatoires. Celui-ci résulte d'un réarrangement établi au niveau des simulations du milieu hétérogène aléatoire.

Le réarrangement du milieu hétérogène obéit à l'ordonnance des modules de cisaillements suivant la profondeur, en respectant la nature réelle du sol, à savoir que le module de cisaillement croît en profondeur. Ceci donne un milieu constitué d'un entassement de plusieurs couches de profondeur aléatoire, appelé multicouche à interfaces aléatoires, où la couche la plus dure se trouve juste au-dessus du rocher, et la couche la plus molle en surface.

Un multicouche homogène est ensuite construit à partir du multicouche à interfaces aléatoires, en moyennant les épaisseurs aléatoires de chaque couche. Les nouvelles couches auront des épaisseurs égales à la moyenne de la plus grande et la plus petite des épaisseurs de la couche à interface aléatoire correspondante.

Les courbes (a) et (b) de la figure (V-9) représentent respectivement la distribution du module de cisaillement correspondant à un écart type de 75% pour le multicouche à interfaces aléatoires ferme et mou et leurs multicouche homogènes correspondants.

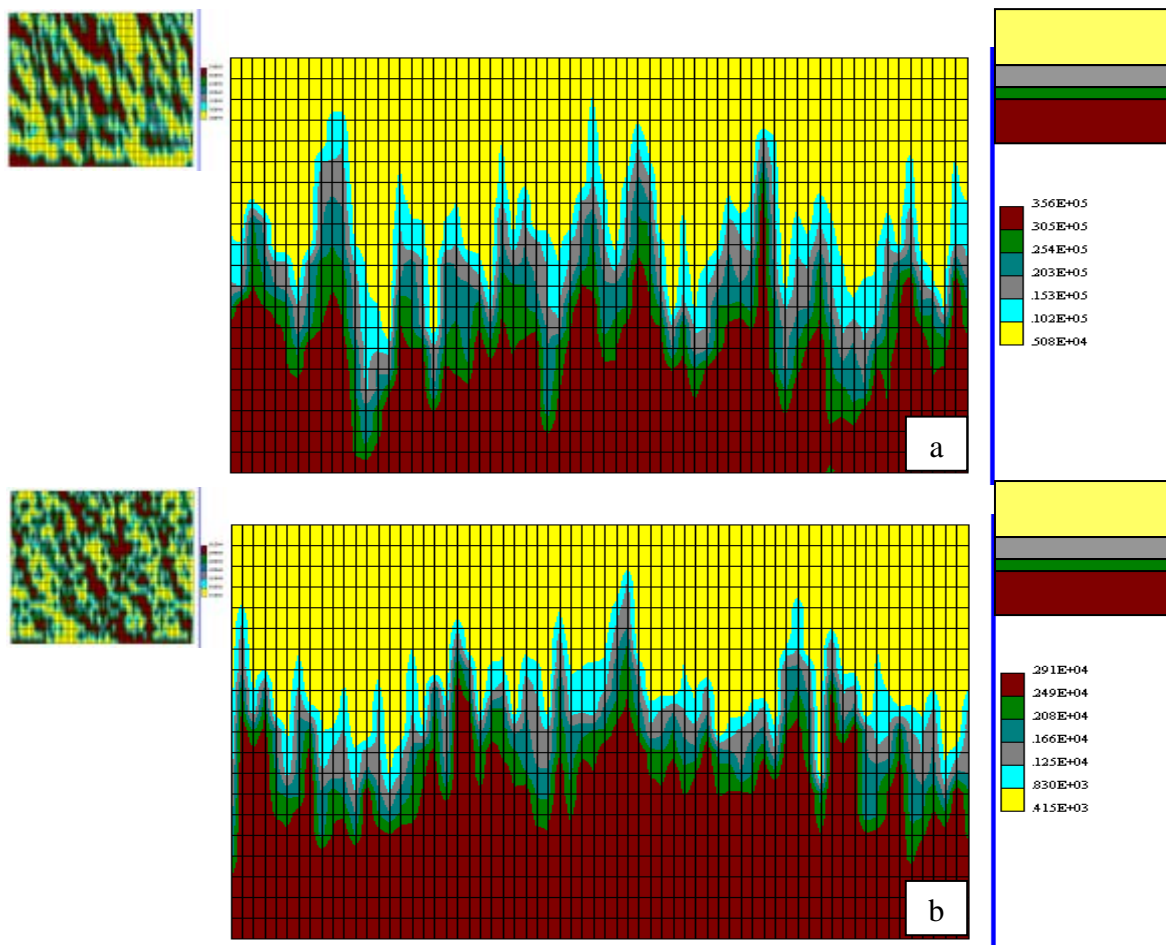


Figure (V-9): Distribution du module de cisaillement après réarrangement, a- sol ferme, b-sol mou ($\sigma = 75\%$).

III.1 Effets des interfaces aléatoires sur la réponse en translation en champ libre

L'étude a consisté en l'analyse sismique de multicouches homogènes d'une part et à interfaces aléatoires d'autre part. L'étude comparative entre ces deux configurations de sol est menée en combinant à chaque fois la nature du sol (mou, ferme) et le type de l'excitation (signal réel, signal synthétique). Les cas traités sont ceux du paragraphe précédent. Cette étude fait ressortir ce qui suit:

III.1.1 Effet d'amplification de la réponse sismique

Les figures (V-10) à (V-13) montrent les réponses en terme d'accélération du multicouche homogène et celui à interfaces aléatoires. Pour ce dernier cas, on présente la moyenne de huit (08) réponses calculées en surface dont la distance de séparation varie de 10 m à 80 m. Au vu des courbes tracées, on peut souligner ce qui suit:

- 1) La prise en compte de l'hétérogénéité des interfaces induit une amplification de la réponse sismique à la surface libre aussi bien dans le cas d'un sol ferme que dans le cas d'un sol mou, et pour les deux types de sollicitations. Ce phénomène a été en particulier observé lors du séisme de Mexico en 1985, appelé phénomène de piégeage des ondes.
- 2) Apparition de hautes fréquences dans le cas du multicouche à interfaces aléatoires par rapport au multicouche homogène aussi bien quand le sol est mou que quand il est ferme (les courbes sont plus serrées).
- 3) Le multicouche à interfaces aléatoires de type ferme amplifie plus par rapport au multicouche mou, ce qu'on voit clairement aussi sur les spectres de réponses figures (V-14) et (V-15).

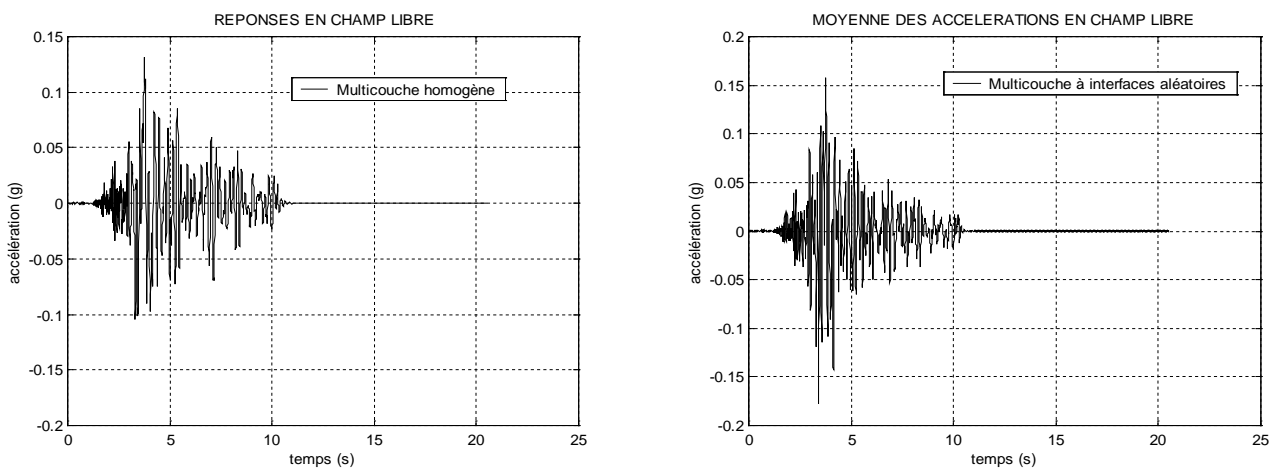


Figure (V-10): Amplification de la réponse en champ libre d'un multicouche ferme à interfaces aléatoires (signal réel).

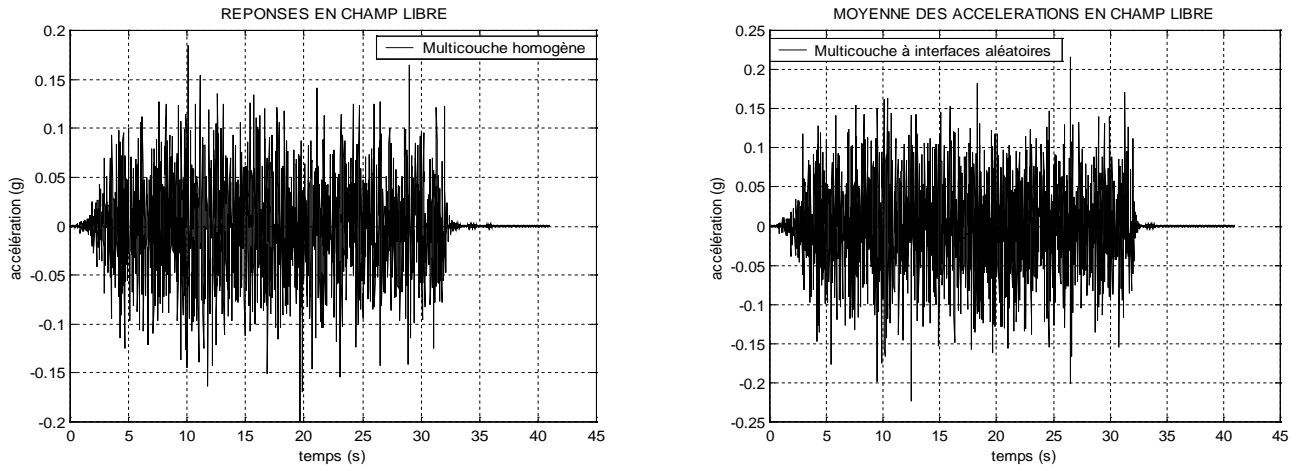


Figure (V-11): Amplification de la réponse en champ libre d'un multicouche ferme à interfaces aléatoires (bruit blanc).

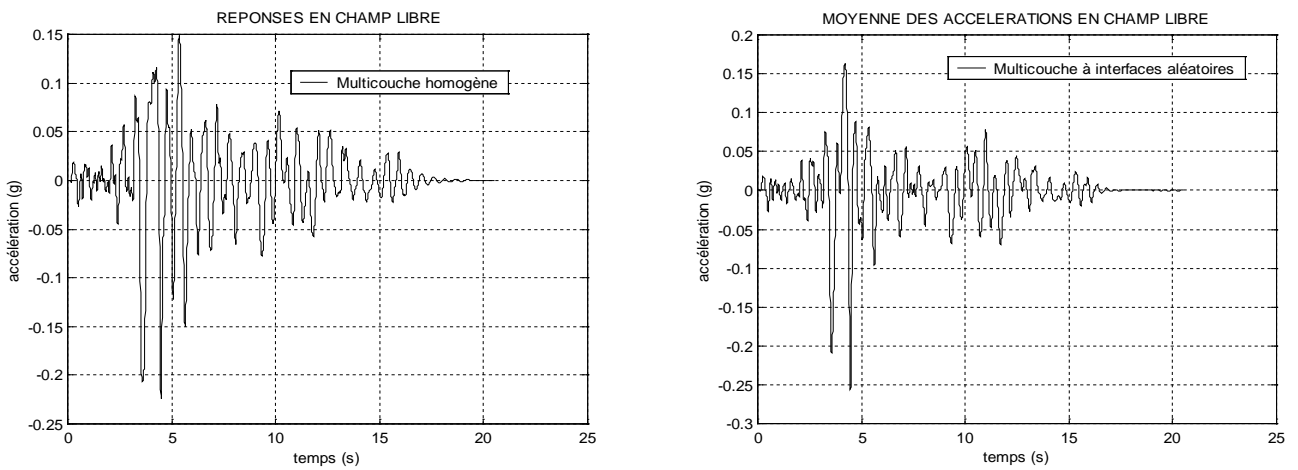


Figure (V-12): Amplification de la réponse en champ libre d'un multicouche mou à interfaces aléatoires (signal réel).

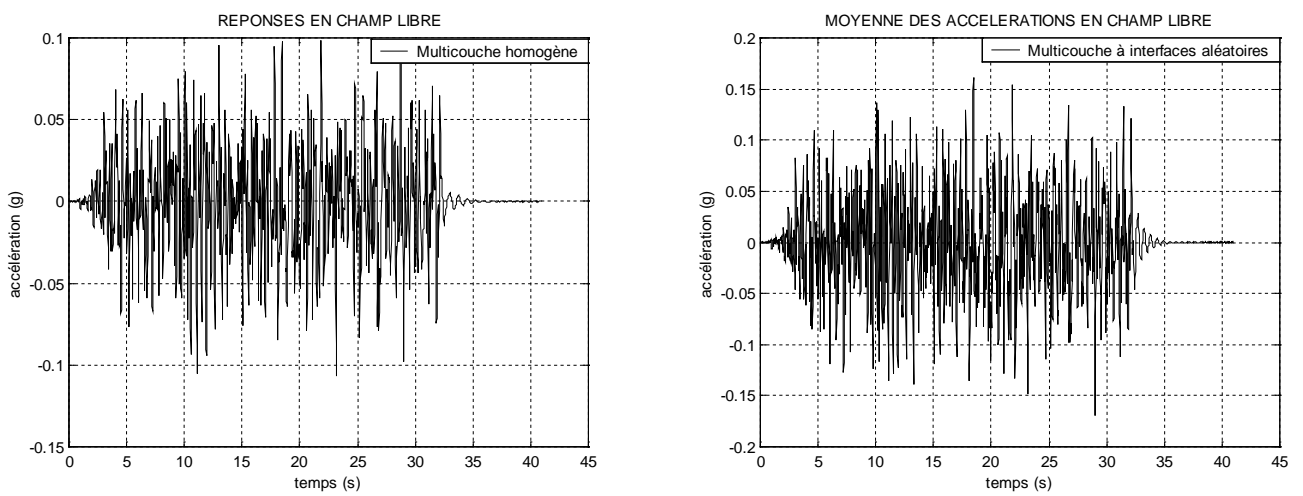


Figure (V-13): Amplification de la réponse en champ libre d'un multicouche mou à interfaces aléatoires (bruit blanc).

III.1.2 Effet de filtrage

Les figures (V-14) et (V-15) montrent la moyenne des spectres de réponses en surface libre de multicouches : homogène et à interfaces aléatoires, calculés pour les cas précédents. Les courbes tracées, montrent que:

- 1) L'hétérogénéité des interfaces induit un décalage de la fréquence fondamentale vers les hautes fréquences. Le multicouche à interfaces aléatoires est plus rigide que le multicouche homogène.
- 2) Cet effet est plus marqué en sol ferme qu'en sol mou.

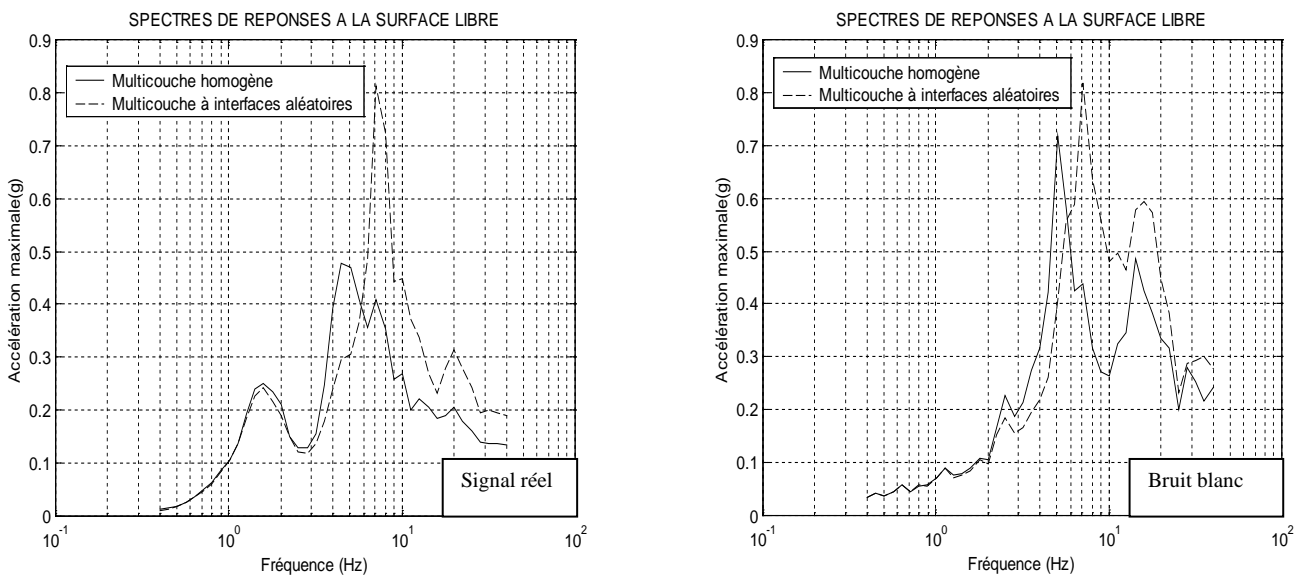


Figure (V-14): amplification et filtrage du spectre de réponse en champ libre d'un multicouche ferme a interfaces aléatoires

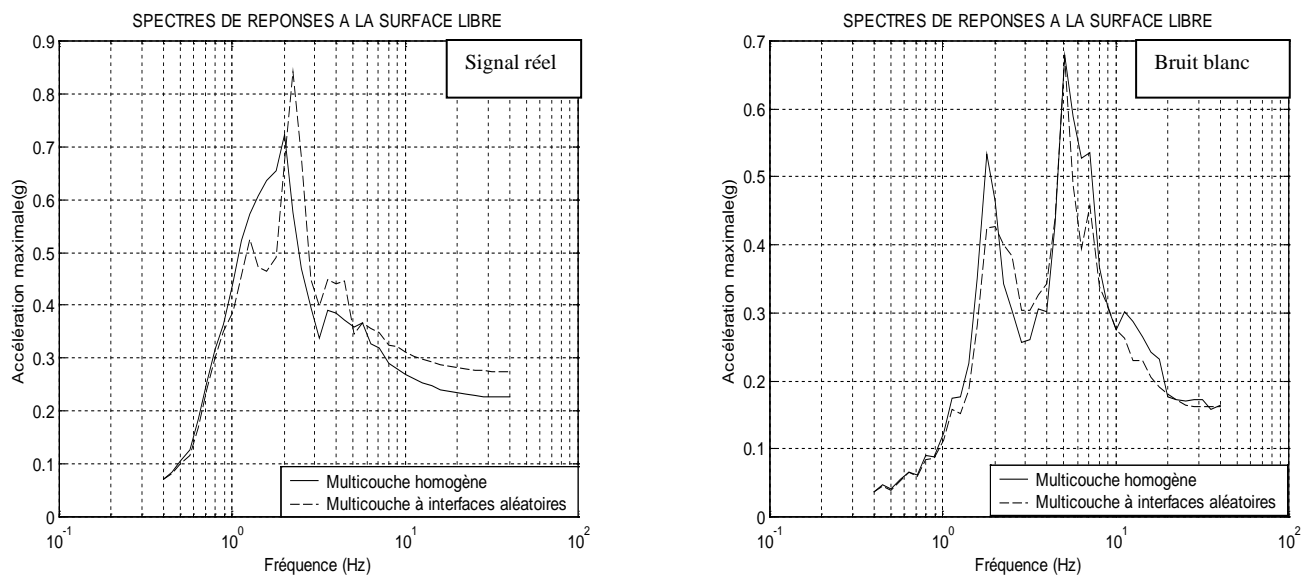


Figure (V-15): Amplification et filtrage du spectre de réponse en champ libre d'un multicouche mou à interfaces aléatoires

IV. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence les effets induits des hétérogénéités du sol sur la réponse sismique.

1. L'hétérogénéité aléatoire du sol implique une atténuation non négligeable de la réponse sismique en tous points de la surface du sol, ainsi qu'un effet de filtrage.
2. Cette hétérogénéité induit des mouvements de rotation induits entre paires de 2 points en surface. Ces mouvements sont d'autant plus importants dans le cas de sol flexible, ils sont cependant inversement proportionnels à la distance de séparation entre les deux points de mesure considérés. Dans le cadre d'une thèse de Magister, Laouami et Tabbouche remarquent que l'amplitude de l'écart type des mouvements différentiels normalisés (rotations adimensionnelles) croît sensiblement avec le degré d'hétérogénéité du sol.
3. Le multicouche à interfaces aléatoires implique une amplification du mouvement moyen par rapport à la réponse du multicouche homogène. Nous pouvons expliquer cette amplification par la diminution de l'amortissement radiatif, due au piégeage de l'onde sismique au niveau des interfaces aléatoires; sachant que l'amortissement radiatif est responsable de l'évacuation de l'énergie vers l'infinie au niveau des frontières latérales. D'autre part, pour le cas de multicouche homogène, les effets de réfraction d'ondes atténuent l'amplitude du mouvement sismique.
4. Le multicouche à interfaces aléatoires présente un décalage de la fréquence fondamentale vers une valeur supérieure. Il apparaît par conséquent plus rigide que le multicouche homogène, ceci est dû au fait qu'il est plus difficile de déplacer relativement (faire glisser) deux couches à interfaces aléatoires.

REPONSES DU SYSTEME GLOBAL SOL-STRUCTURE EN MILIEU HETEROGENE ALEATOIRE

I. INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est d'étudier le problème d'interaction sol-structure en milieu hétérogène soumis à une excitation sismique. L'hétérogénéité considérée dans le présent chapitre est celle du module de cisaillement du profil de sol, c'est à dire une hétérogénéité aléatoire.

Nous allons essayer de relier l'hétérogénéité du sol aux réponses du modèle sol-structure, à travers l'écart type σ , qui désigne le taux de dispersion entre les deux dispositions de sol : homogène et hétérogène.

Le modèle que nous utilisons tient compte des effets d'interaction sol-structure. Nous allons aussi comparer les deux effets (hétérogénéité et interaction).

II. INFLUENCE DE L'HETEROGENEITE DU SOL SUR LES REPONSES DU SYSTEME GLOBAL SOL-STRUCTURE

Nous exposons dans cette partie l'analyse des réponses du système dynamique global sol-structure dans un milieu hétérogène, en comparant avec ceux du cas de sol homogène. Nous avons effectué l'étude avec un écart type $\sigma = 20\%$, 50% , 65% , 75% et 90% . A partir d'une dispersion de 75% , nous constatons des décalages quant aux réponses tracées dans les deux cas de sols homogènes et hétérogènes. Nous représentons dans ce qui suivra des résultats de type temporel et fréquentiel. Aussi, dans le souci de tirer des résultats qualitatifs assez clairs et des conclusions assez significatives, nous avons tracé dans certains cas, les réponses à un écart type égal à 90% .

II.1 Atténuation de la réponse sismique

Une atténuation du mouvement sismique induite par l'hétérogénéité du sol est examinée en comparant d'une part les courbes des réponses en accélérations à la base et au toit de la structure, et d'autre part celles des réponses spectrales au toit de la structure. Cette

atténuation est aussi examinée à travers les fonctions de transfert. Ces comparaisons sont faites pour les deux types de sols, ferme et mou disposés de manière homogène et hétérogène.

II.1.1 Cas de structure flexible sur sol mou

Il ressort globalement:

- Une atténuation de la réponse aussi bien à la base qu’au toit lorsqu’on tient compte de l’hétérogénéité du sol (courbes des figures (VI-1) et (VI-2)).
- Une atténuation des réponses spectrales au toit de la structure (figure (VI-9a)).
- Une désamplification des mouvements sismiques au toit de la structure montrée sur la figure (VI-10a). Il est à noter que l’amplification passe de 7.3 en milieu homogène à 6.2 en milieu hétérogène.

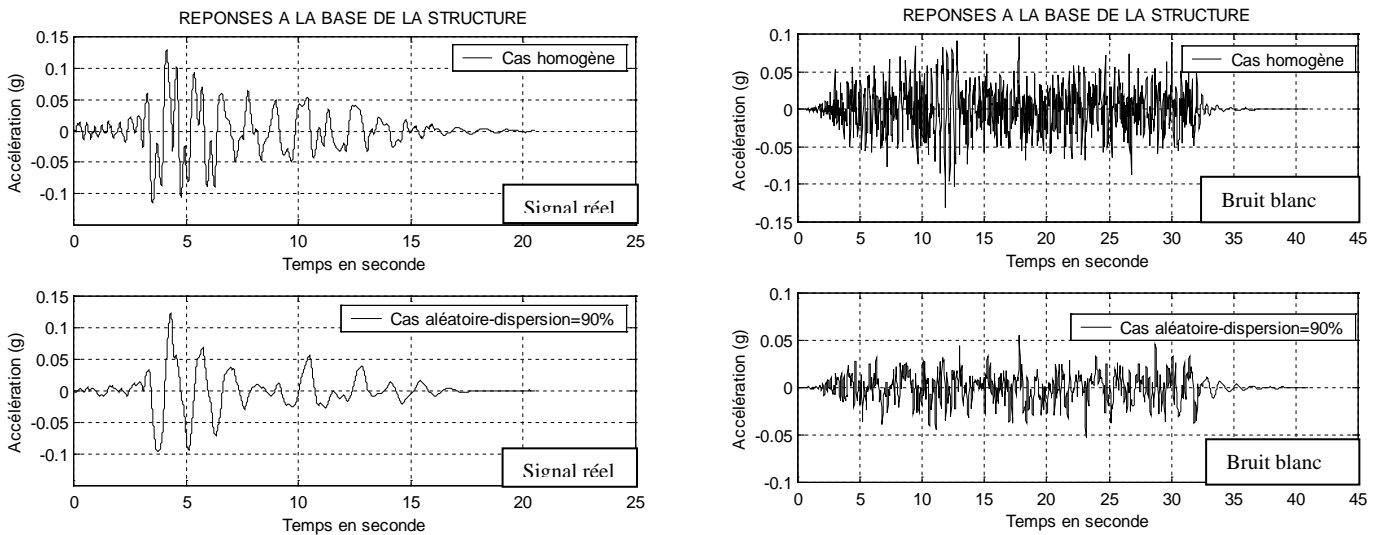


Figure (VI-1): Accélérations à la base d’une structure flexible sur sol mou

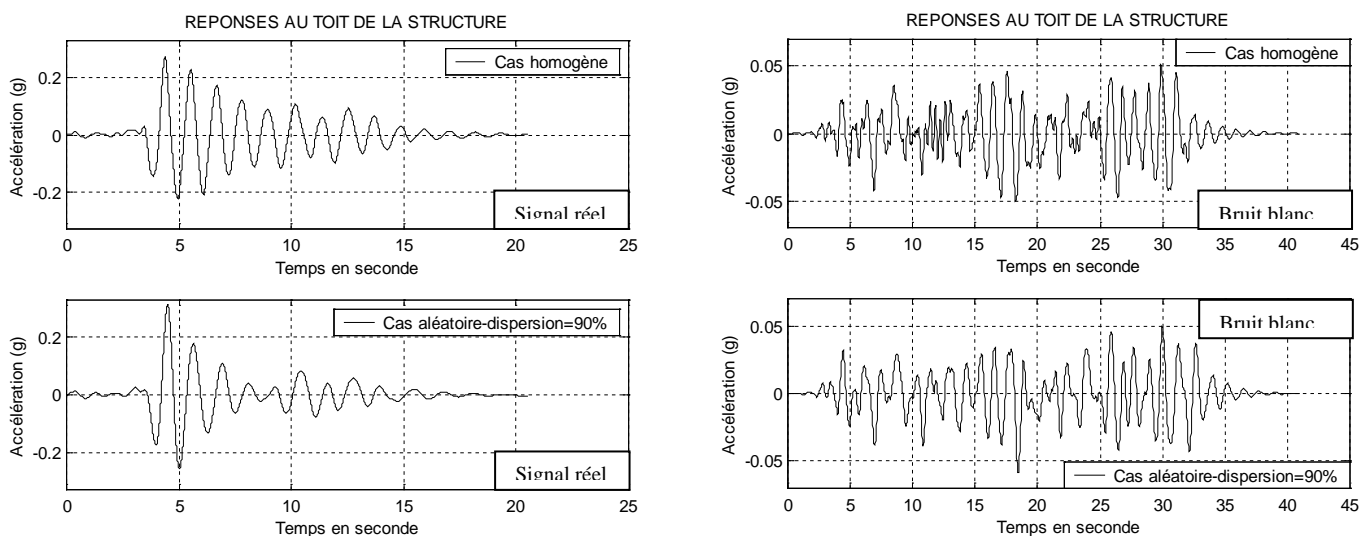


Figure (VI-2): Accélérations au toit d’une structure flexible sur sol mou.

II.1.2 Cas de structure rigide sur sol mou

Les figures (VI-3), (VI-4), (VI-9a) et (VI-10a) montrent que l'effet d'atténuation de la réponse sismique, observé dans le cas d'une structure flexible, reste valable pour une structure rigide sur sol mou, mais est plus important.

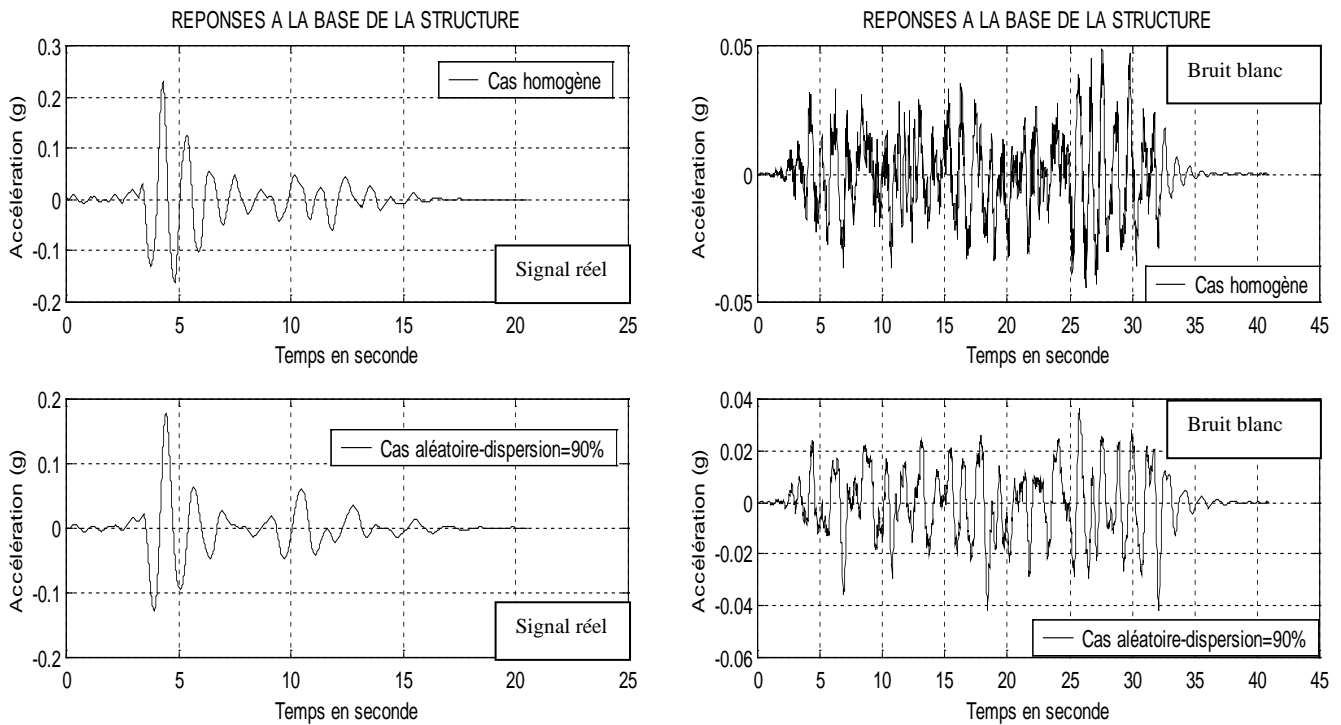


Figure (VI-3): Accélérations à la base d'une structure rigide sur sol mou.

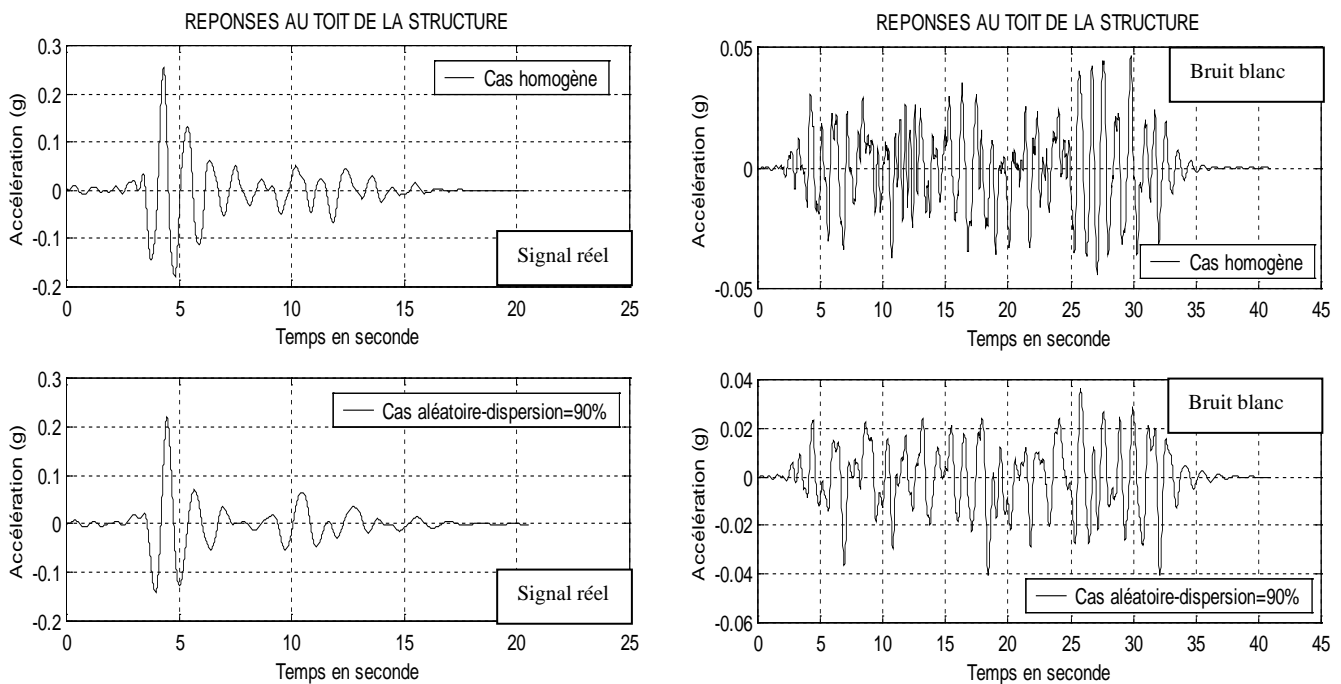


Figure (VI-4): Accélérations au toit d'une structure rigide sur sol mou

II.1.3 Cas de structure flexible sur sol ferme

Les figures (VI-5), (VI-6), (VI-9b) et (VI-10b) montrent une très légère atténuation de la réponse au toit.

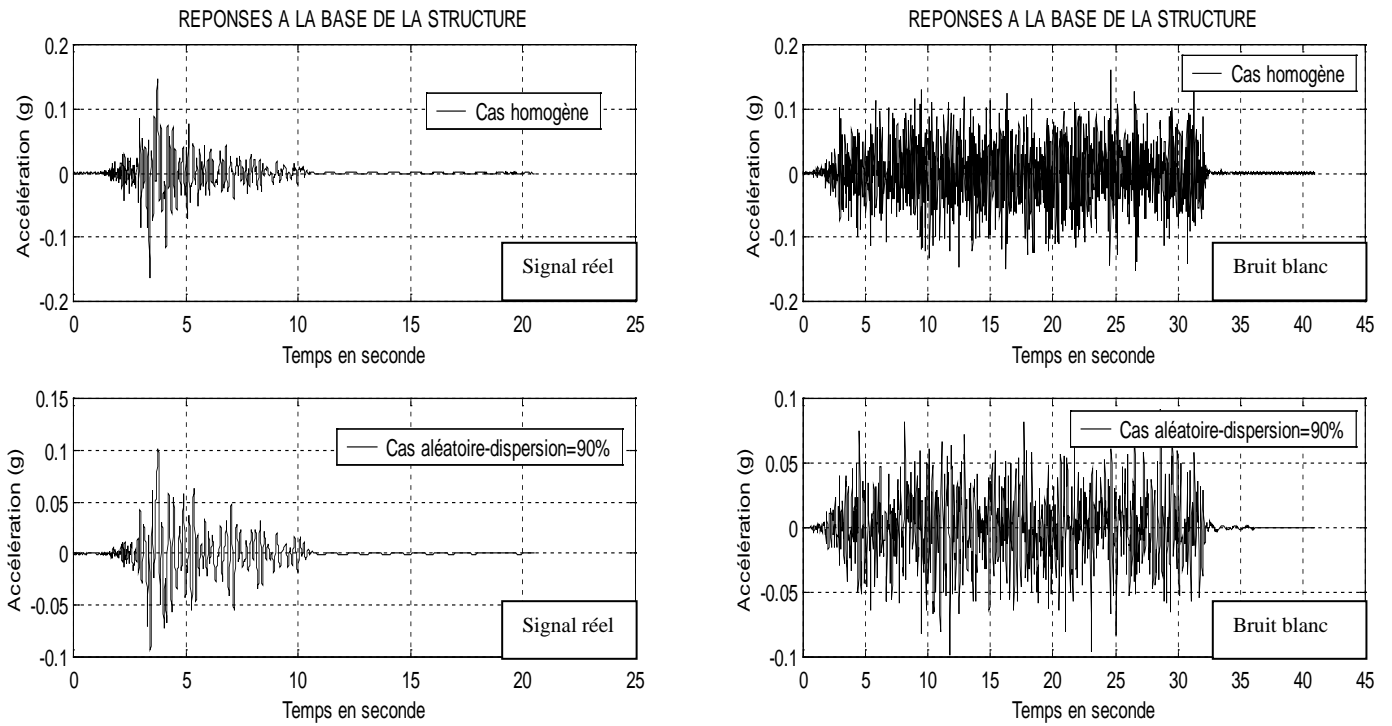


Figure (VI-5): Accélérations à la base de structure flexible sur sol ferme

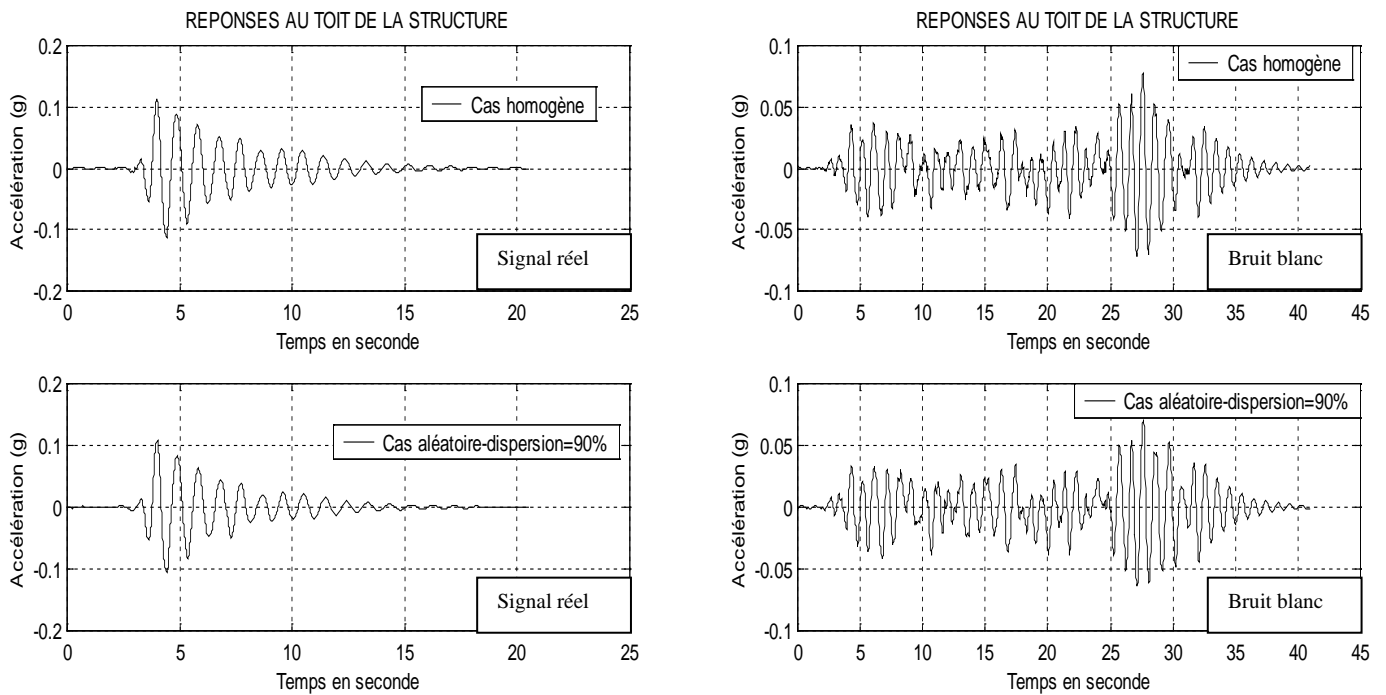


Figure (VI-6): Accélérations au toit de structure flexible sur sol ferme

II.1.4 Cas de structure rigide sur sol ferme

- Une atténuation de la réponse à la base et au toit de la structure (figures (VI-7) et (VI-8)).
- Une atténuation des réponses spectrales au toit de la structure (figure (VI-9b)).
- Une désamplification des mouvements sismiques au toit de la structure montrée sur la figure (VI-10b) via les tracés des fonctions de transfert rocher-toit. Il est à noter que l'amplification passe de 4.8 en milieu homogène à 3.7 en milieu hétérogène.

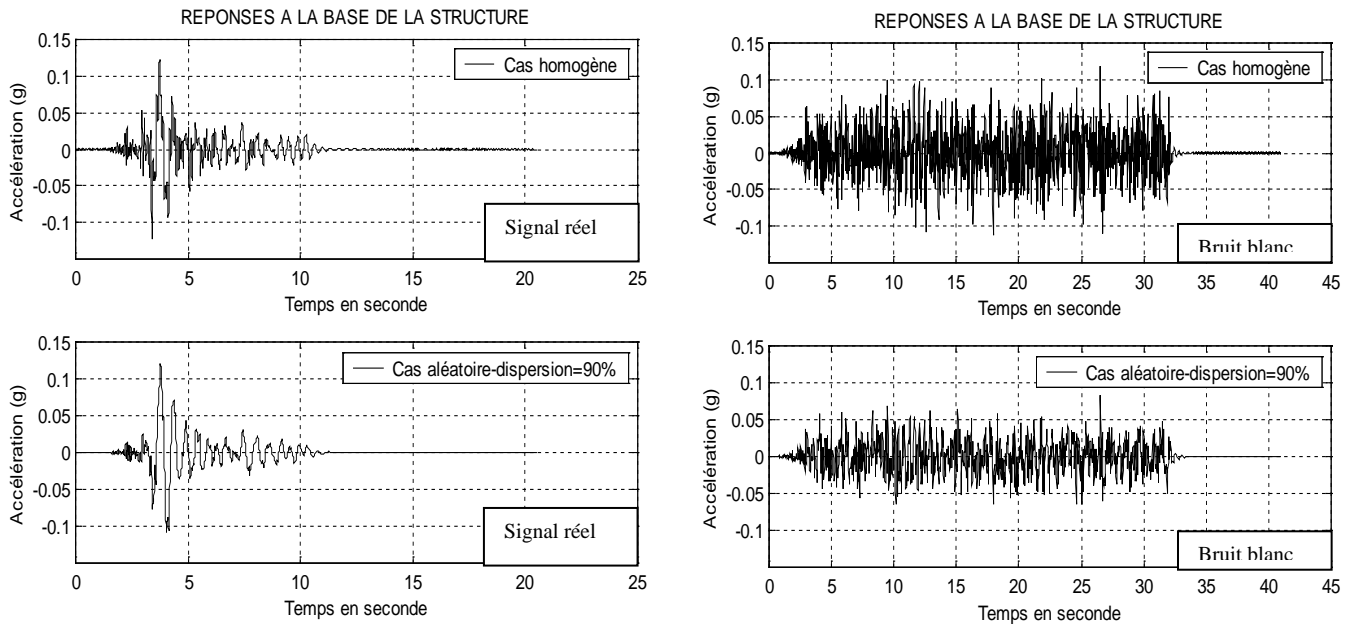


Figure (VI-7): Accélérations à la base de structure rigide sur sol ferme

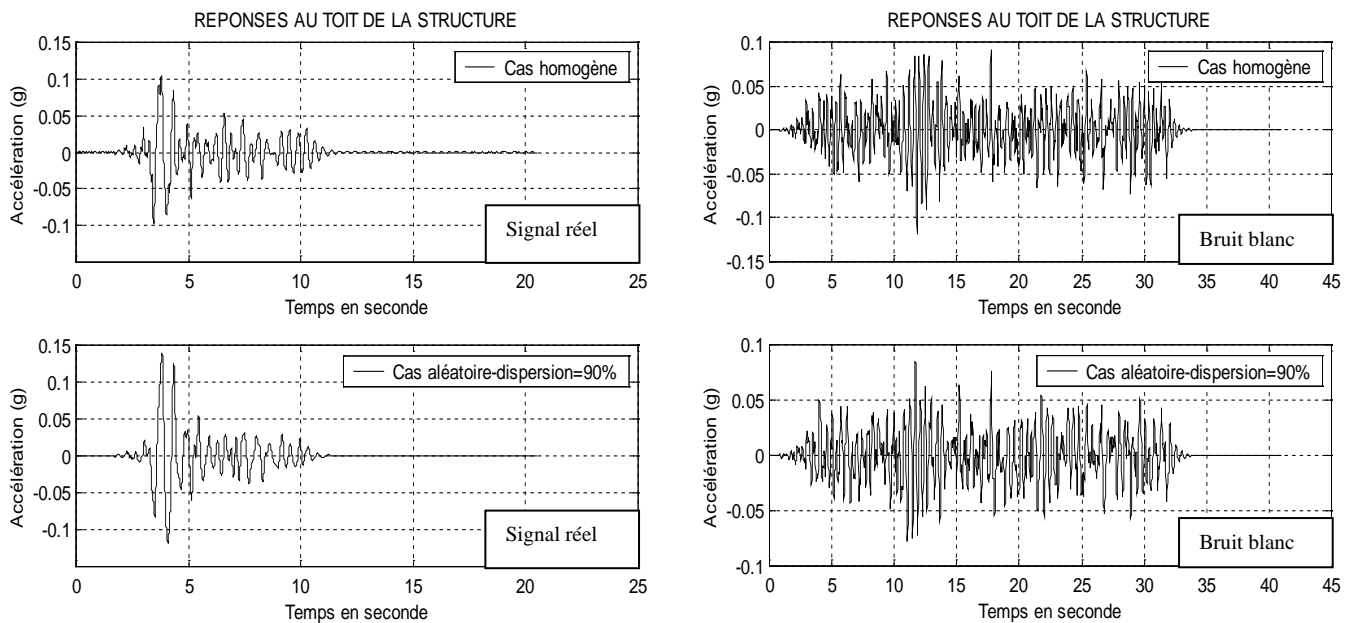


Figure (VI-8): Accélérations au toit de structure rigide sur sol ferme

II.2 Effet de filtrage de la réponse sismique

- Au vu des courbes des fonctions de transfert rocher-toit de la structure tracées, on peut souligner que la prise en compte de l’hétérogénéité du sol induit un effet de filtrage de la réponse sismique du système global sol-structure aussi bien dans le cas d’un sol ferme que dans le cas d’un sol mou.
- Nous enregistrons cependant le passage des fréquences fondamentales du système global en milieu homogène par rapport à celui hétérogène comme suit:

Le système structure flexible n'enregistre aucun effet de filtrage sur sol ferme et passe par contre de 0.9Hz à 0.75Hz sur sol mou. Le système structure rigide passe de 2.7Hz à 2Hz sur sol ferme et de 1Hz à 0.7Hz sur sol mou.

- L’effet de filtrage est plus accentué sur sol mou en présence de structure rigide.

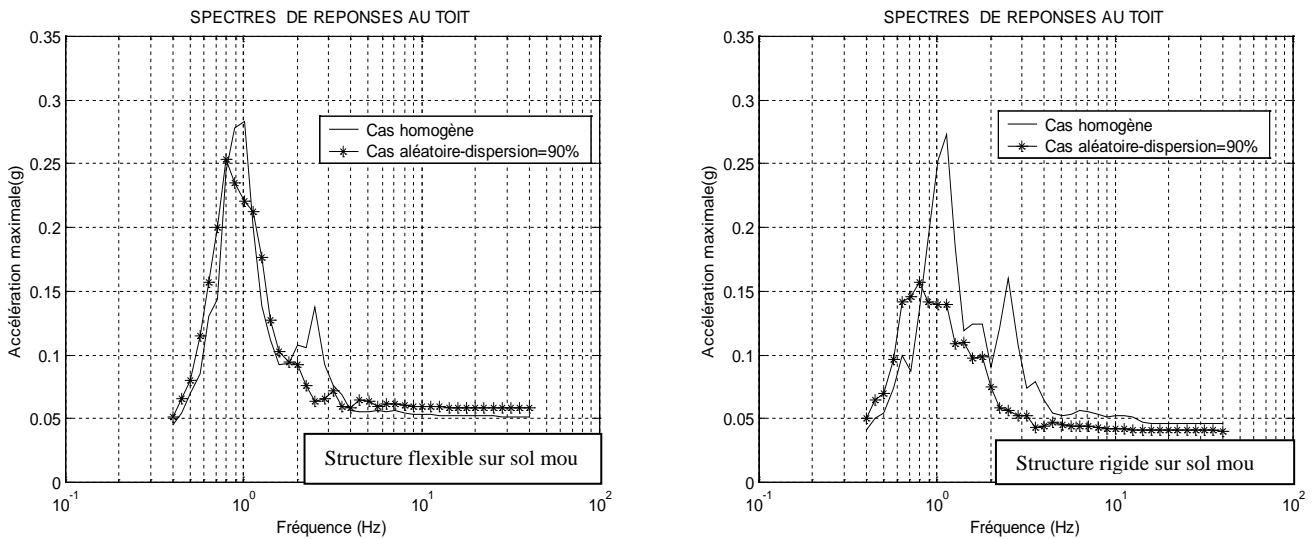


Figure (VI-9a) Spectres de réponses calculés au toit de structures sur sol mou

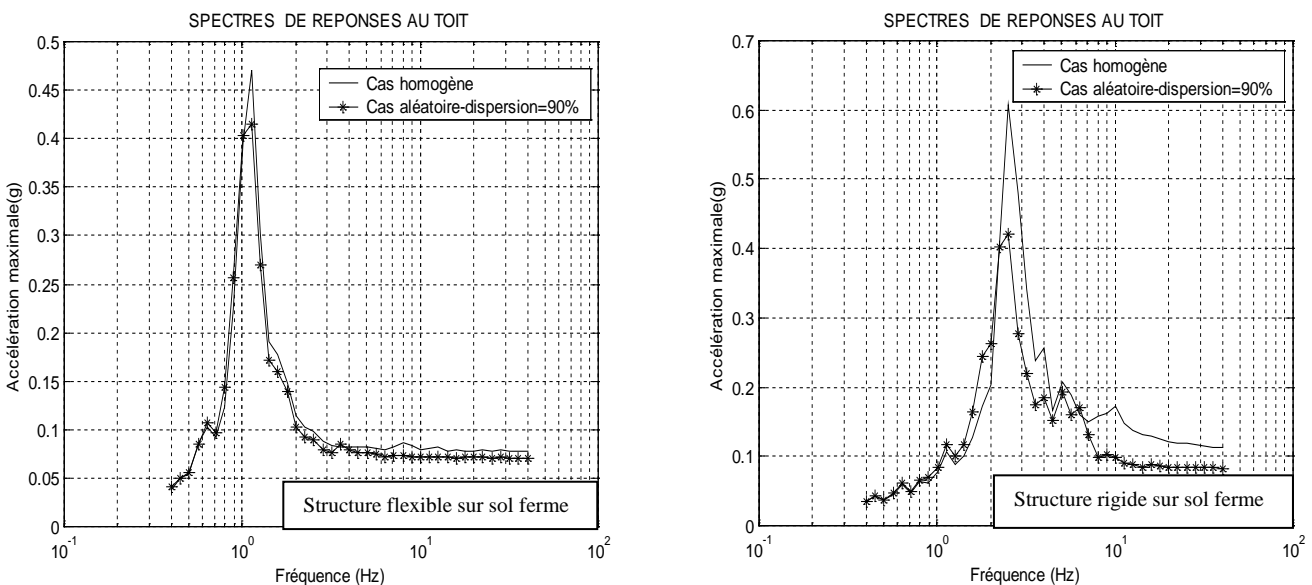


Figure (VI-9b): Spectres de réponses calculés au toit de structures sur sol ferme

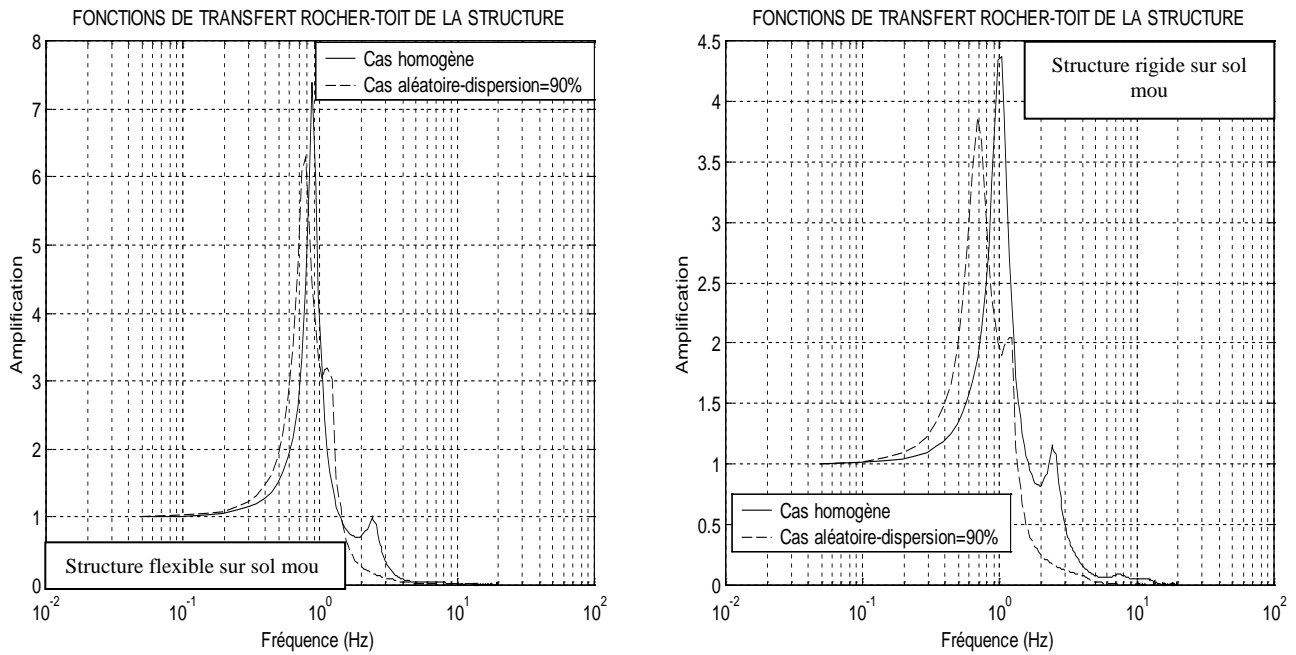


Figure (VI-10a): Fonctions de transfert rocher- toit de structures sur sol mou

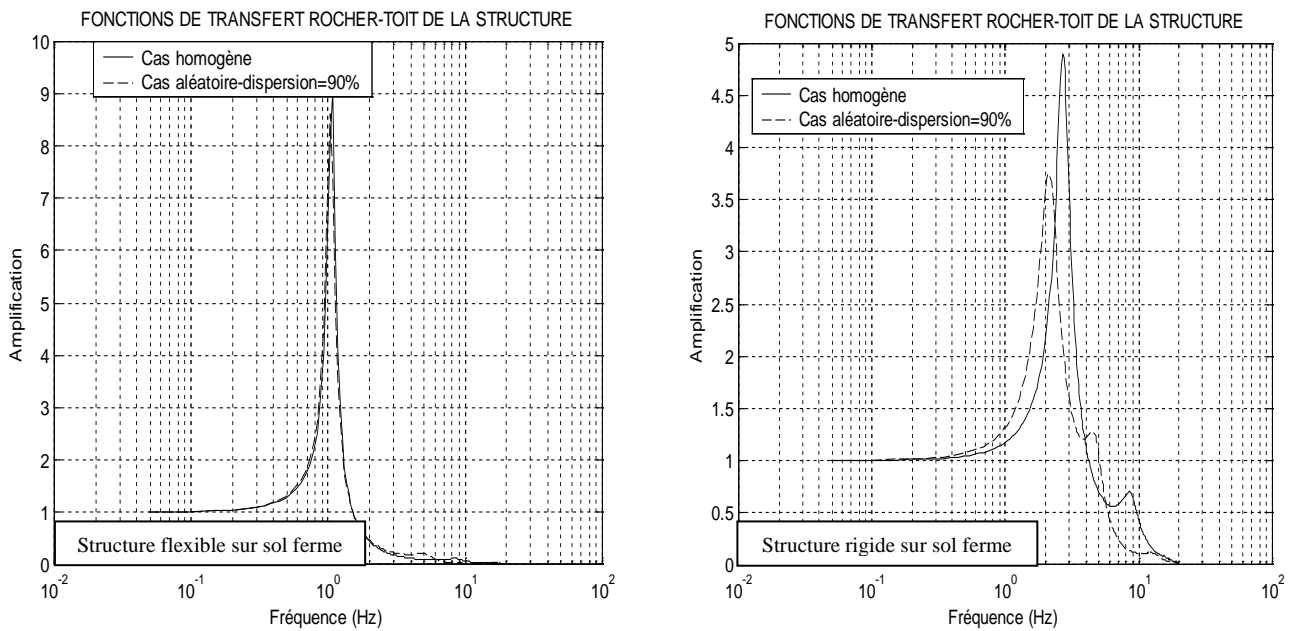


Figure (VI-10b): Fonctions de transfert rocher- toit de structures sur sol ferme

II.3 Mouvements différentiels à la base

Il ressort des figures (VI-11) et (VI-12) ce qui suit :

- En présence d'hétérogénéité dans le sol, des mouvements différentiels apparaissent à la base de la structure.

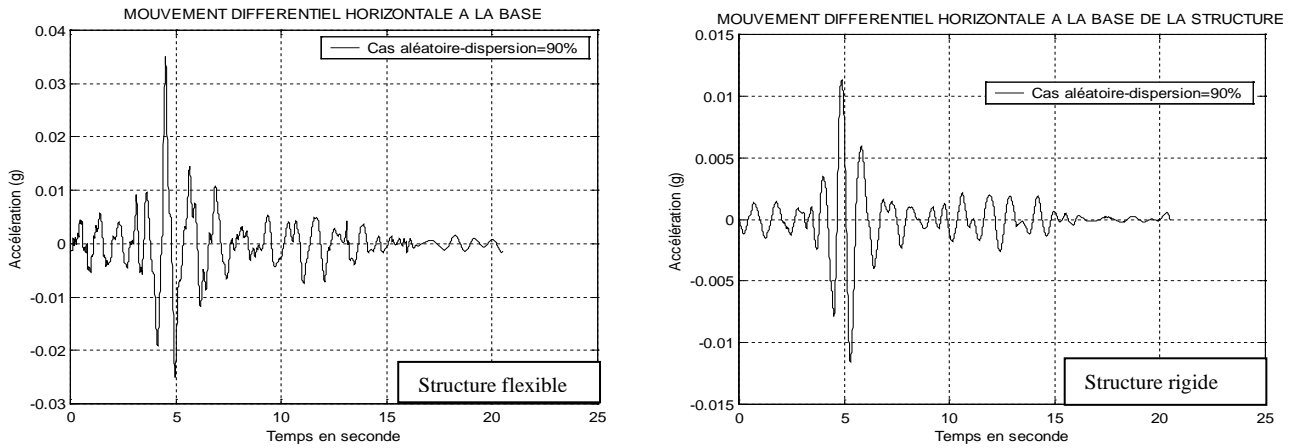


Figure (VI-11): Mouvements différentiels à la base, cas de structures sur sol mou.

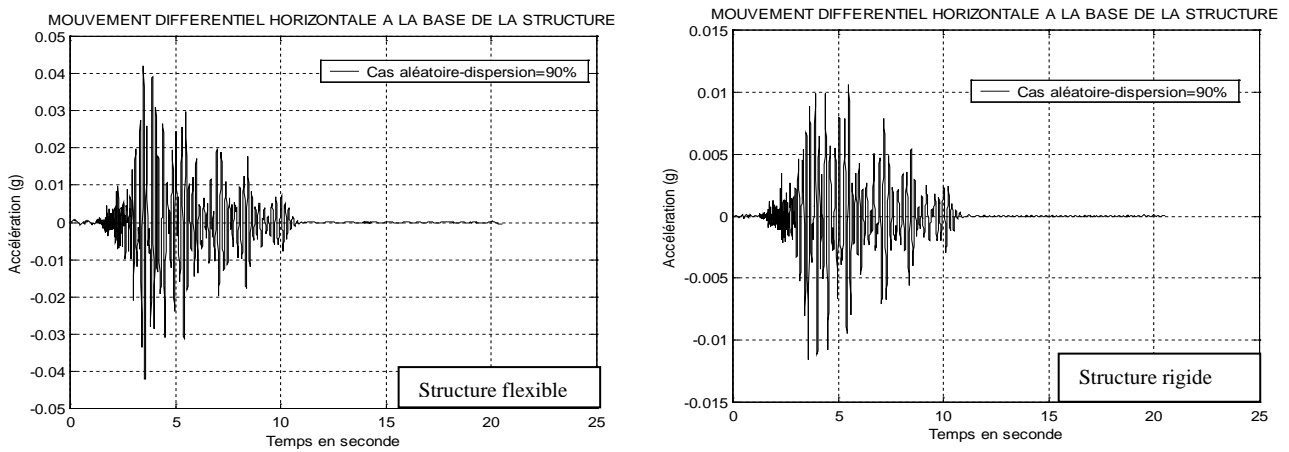


Figure (VI-12): Mouvements différentiels à la base, cas de structures sur sol ferme.

II.4 Accélérations verticales au toit

Les accélérations verticales s'amplifient plus en milieu hétérogène qu'en milieu homogène (figures (VI-13)(VI-14)). Cette amplification est plus marquée en sol mou qu'en sol ferme et encore plus en présence de structure rigide.

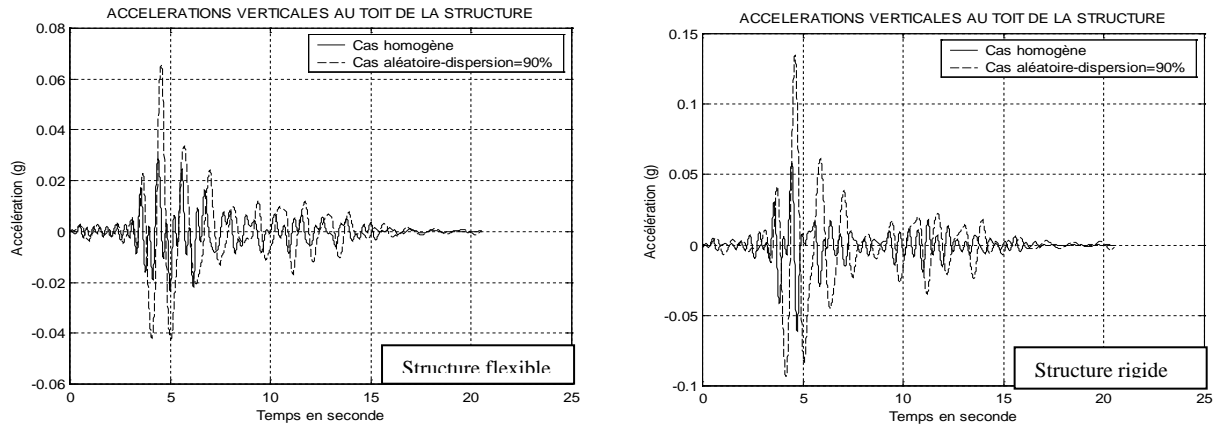


Figure (VI-13):Mouvements verticaux au toit, cas de structures sur sol mou.

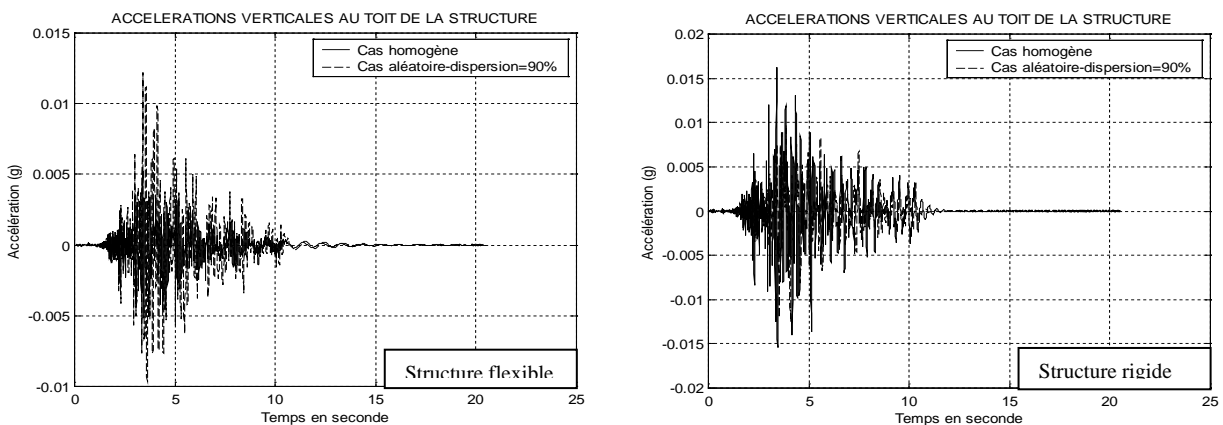


Figure (VI-14): Mouvements verticaux au toit, cas de structures sur sol ferme.

III. CONCLUSION

Les analyses faites dans ce chapitre, concluent que:

- 1) En général les réponses du système sol-structure en milieu homogène enveloppent celles en milieu hétérogène aléatoire. En d'autres termes, l'hétérogénéité du milieu induit des atténuations de toutes les réponses (à la base et au toit).
- 2) L'effet d'atténuation favorable à la conception des structures est cependant accompagné d'un autre effet défavorable, à savoir le filtrage des fréquences propres du système total.
- 3) Les conséquences citées ci-dessus, sont en faite reliées entre elles. En excluons toute possibilité d'apparition de non-linearité quelle que soit sa nature, nous estimons que ces effets d'atténuation et de filtrage sont dus au phénomène de diffraction et réflexion d'ondes dans un milieu hétérogène d'après les travaux de [Chernov (1969), Aki et Richards (1980), Franckel et Clayton (1984)]. (1) :l'effet de filtrage est probablement expliqué par le fait qu'étant hétérogène le sol devient lâche, ainsi plus flexible;

- (2) :l'amplification des frottements entre particules (le sol est hétérogène) induira une augmentation de l'amortissement, ceci résulte en une atténuation du mouvement à la base de la structure et par conséquent au niveau du toit; (3) :En d'autres part ce mécanisme physique génère une variabilité spatiale du mouvement sismique à la base de la structure (apparition de mouvements différentiels), ceci est interprété mathématiquement par un moyennage de l'excitation sismique à la base, la réponse sismique se trouve alors atténuée.
- 4) D'autres parts, plus la structure est rigide plus cet effet de perte de cohérence devient plus prédominant. Ceci concorde bien avec les travaux de Der Kiureghan (1996). Celui-ci justifie ces résultats par le fait que la perte de cohérence (due à l'hétérogénéité du milieu) est plus importante à partir des hautes fréquences, où il est probable que les fréquences fondamentales de la structure rigide coïncident avec celles de la gamme des hautes fréquences, où il y a perte rapide de la cohérence entre les mouvements aux multiples appuis.
- 5) Nous pouvons conclure aussi que les effets d'interaction sol-structure et effets de l'hétérogénéité du sol sur la réponse de la structure sont similaires, il s'agit de l'atténuation de la réponse sismique et effet de filtrage.

II.3 Mouvements différentiels à la base

Il ressort des figures (VII-11) et (VII-12) ce qui suit :

- En présence d'hétérogénéité des interfaces dans le sol, des mouvements différentiels apparaissent à la base de la structure.

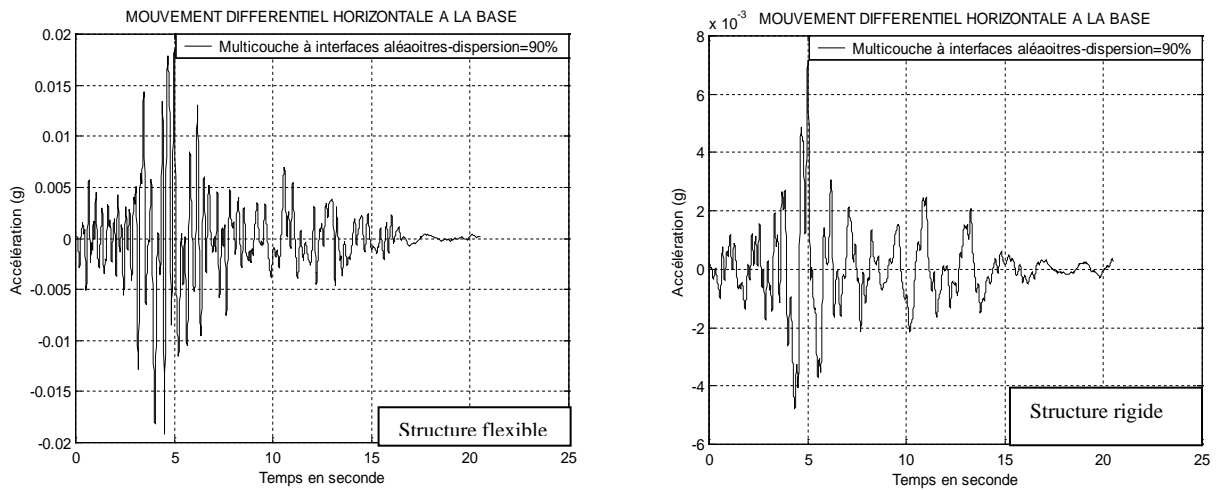


Figure (VII-11): Mouvements différentiels à la base, cas de structures sur sol mou.

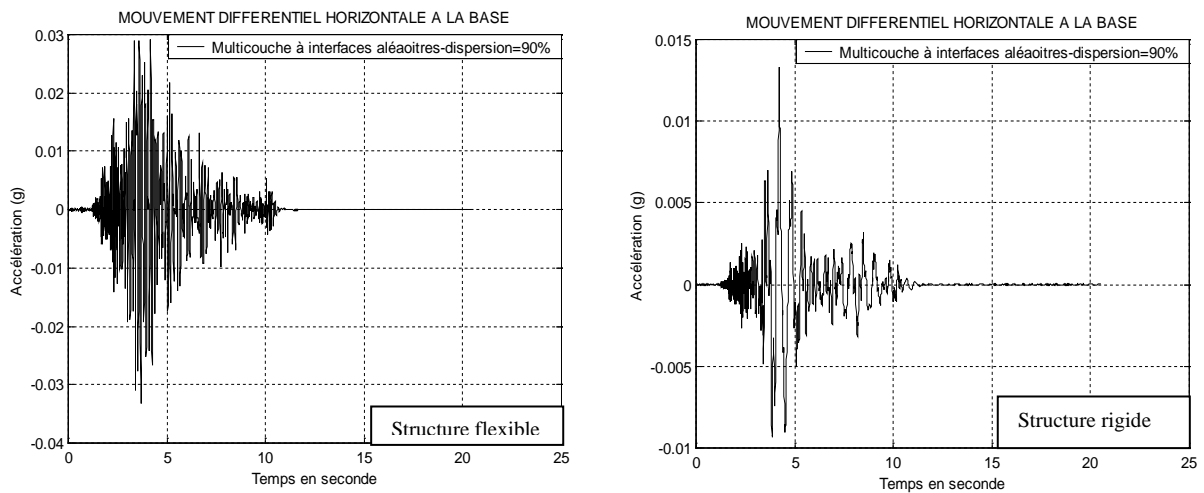


Figure (VII-12): Mouvements différentiels à la base, cas de structures sur sol ferme.

II.4 Accélérations verticales au toit

Les accélérations verticales s'amplifient plus en milieu hétérogène qu'en milieu homogène (figures (VII-13)(VII-14)). Cette amplification est plus marquée en sol mou qu'en sol ferme et encore plus en présence de structure rigide.

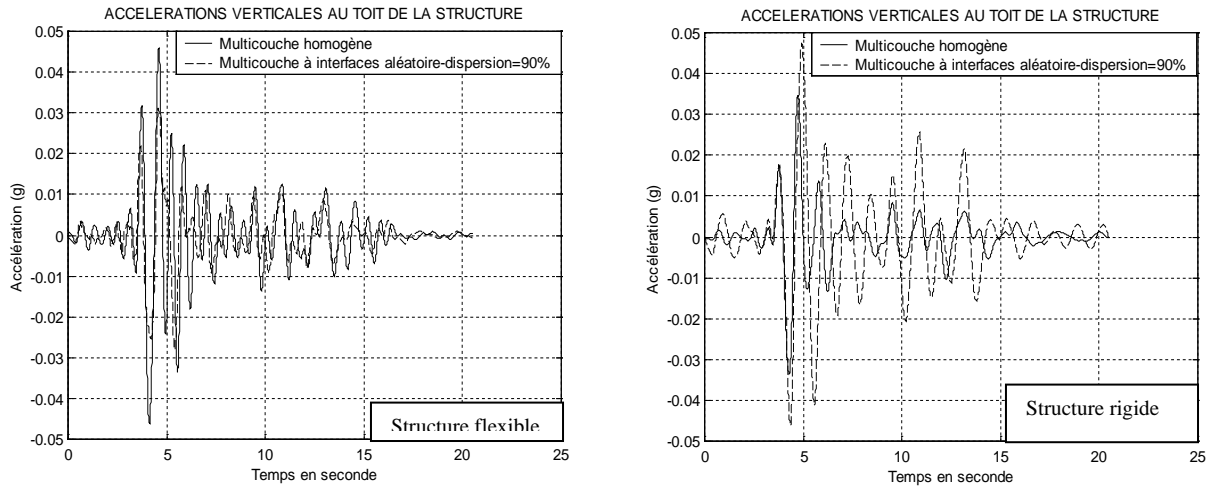


Figure (VII-13):Mouvements verticaux au toit, cas de structures sur sol mou.

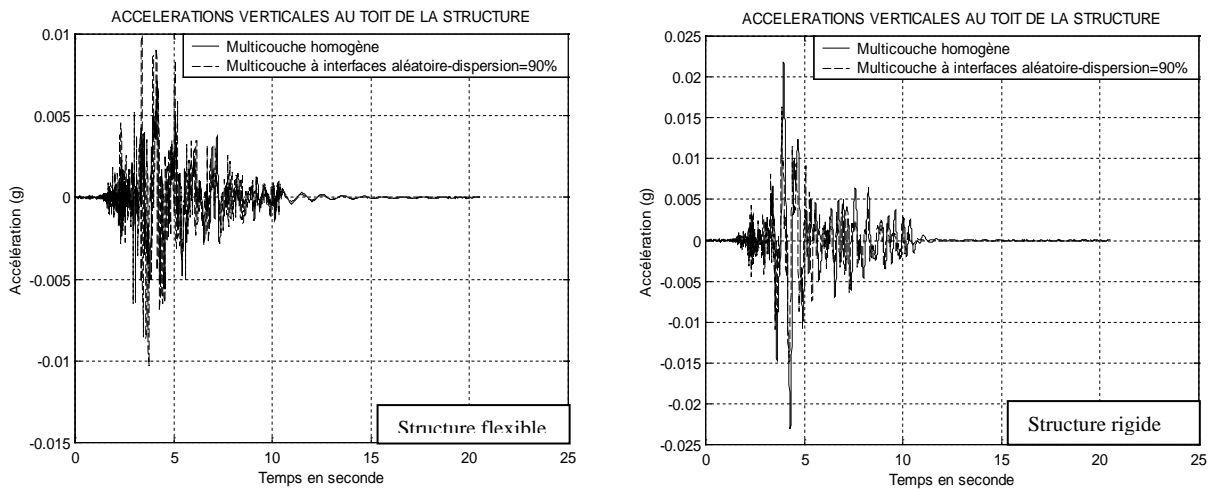


Figure (VII-14): Mouvements verticaux au toit, cas de structures sur sol ferme.

III CONCLUSION

A partir des analyses des différentes courbes (accélérations, spectres de réponses et fonctions de transfert), on peut conclure ce qui suit:

- 1) En général les réponses du système sol-structure en multicouche à interfaces aléatoires enveloppent celles calculées en multicouche homogène. En d'autres termes l'hétérogénéité des interfaces du multicouche induit l'amplification de toutes les réponses sismiques (à la base et au toit). Toutefois ces effets induits s'accroissent en présence de structure rigide reposant sur sol mou.
- 2) L'effet d'amplification défavorable à la conception des structures est cependant accompagné d'un autre effet, à savoir le passage de la fréquence fondamentale du système global sol-structure vers les hautes fréquences. Ainsi le système est plus rigide sur multicouche à interfaces aléatoires que sur multicouche homogène.
- 3) Nous proposons d'expliquer l'amplification par la diminution de l'amortissement radiatif, due au piégeage de l'onde sismique au niveau des interfaces aléatoires; sachant que l'amortissement radiatif est responsable de l'évacuation de l'énergie vers l'infini au niveau des frontières latérales. D'autre part le cas de multicouche homogène, les effets de réflexion d'ondes atténuent l'amplitude du mouvement sismique
- 4) Apparition de mouvements différentiels contribuant à l'amplification des mouvements verticaux.

ETUDE PARAMETRIQUE

I. INTRODUCTION

Dans cette dernière partie, nous allons mener une étude paramétrique du problème d'interaction sol-structure en milieu hétérogène. Cette étude nous permettra de déterminer le nombre nécessaire d'échantillons du processus aléatoire $G(x,y)$ à générer pour une étude rigoureuse. Par la suite, nous fixerons la longueur du portique (le pont) à 50m, et varierons la longueur de corrélation horizontale et verticale du milieu. Au vu des conclusions précédentes, il est plus intéressant de traiter uniquement le cas de sol mou.

II. EFFET DU NOMBRE D'ECHANTILLONS ALEATOIRES SUR LA REPONSE DE LA STRUCTURE

Nous allons chercher dans cette partie le nombre de réalisations à retenir pour le cas hétérogène. Ceci étant, nous traçons la moyenne des accélérations horizontales maximales calculées au toit de la structure en fonction du nombre de réalisations pris: $N= 2, 3, 5, \dots, 30$. Nous traçons aussi le coefficient de variation, qui est par définition le rapport entre l'écart type et la moyenne, celui-ci permet de justifier la représentativité de la moyenne. Cette étude est menée dans le cas de sol aléatoire et de multicouches à interfaces aléatoires.

Les courbes des figures (VIII-1a), (VIII-1b), (VIII-2a) et (VIII-2b) montrent respectivement les réponses moyennes obtenues pour N échantillons et le coefficient de variation, pour un modèle aléatoire et un modèle de multicouche à interfaces aléatoires en fonction du nombre d'échantillons. A la lumière de ces courbes, il ressort que les accélérations moyennes au toit se stabilisent au bout de dix (10) échantillons. Au bout du même nombre, le coefficient de variation converge vers une valeur minimale. Le nombre $N=10$ donne des valeurs satisfaisantes de la réponse recherchée. Ce nombre a été retenu pour le reste de l'étude.

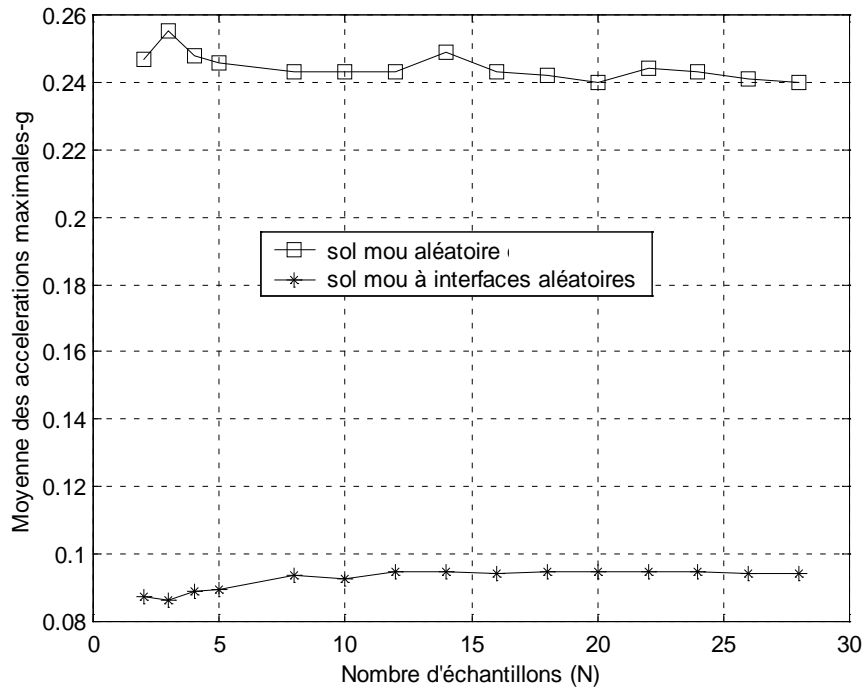


Figure (VIII-1a): Moyenne des accélérations maximales en fonction du nombre d'échantillons, cas de sol mou.

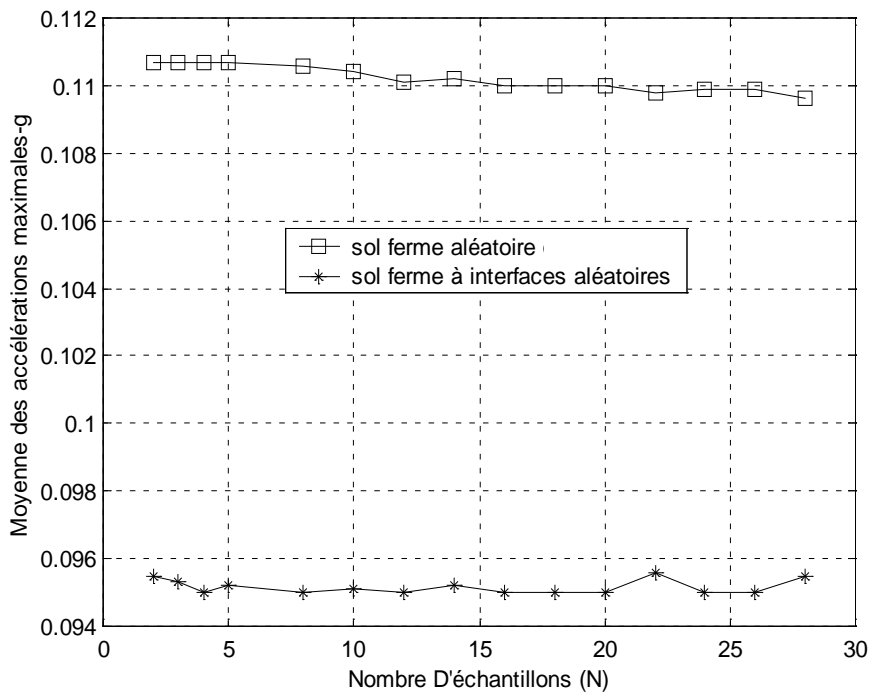


Figure (VIII-1b): Moyenne des accélérations maximales en fonction du nombre d'échantillons, cas de sol ferme.

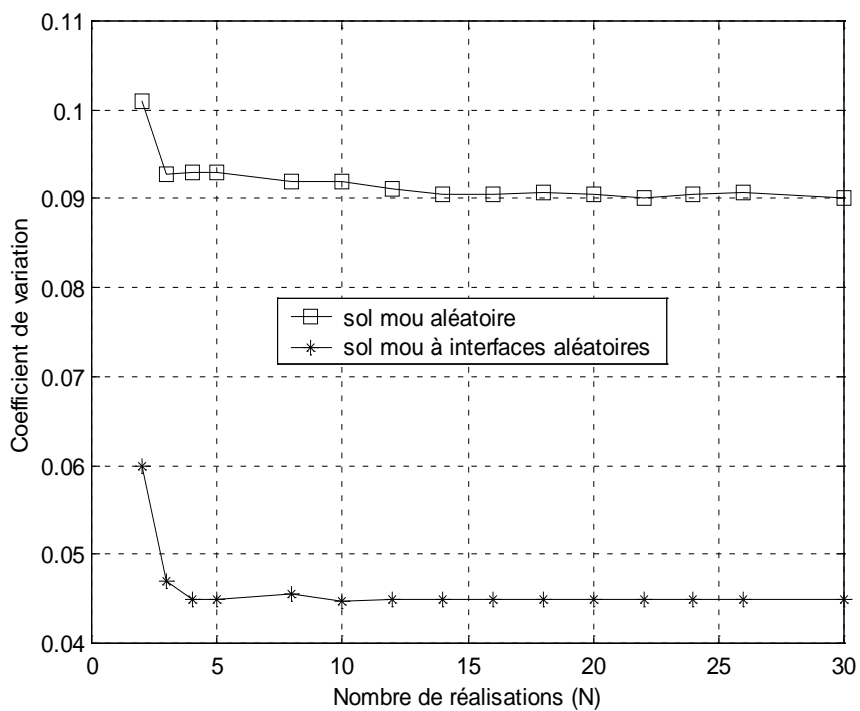


Figure (VIII-2a): Coefficient de variation en fonction du nombre d'échantillons, cas de sol mou

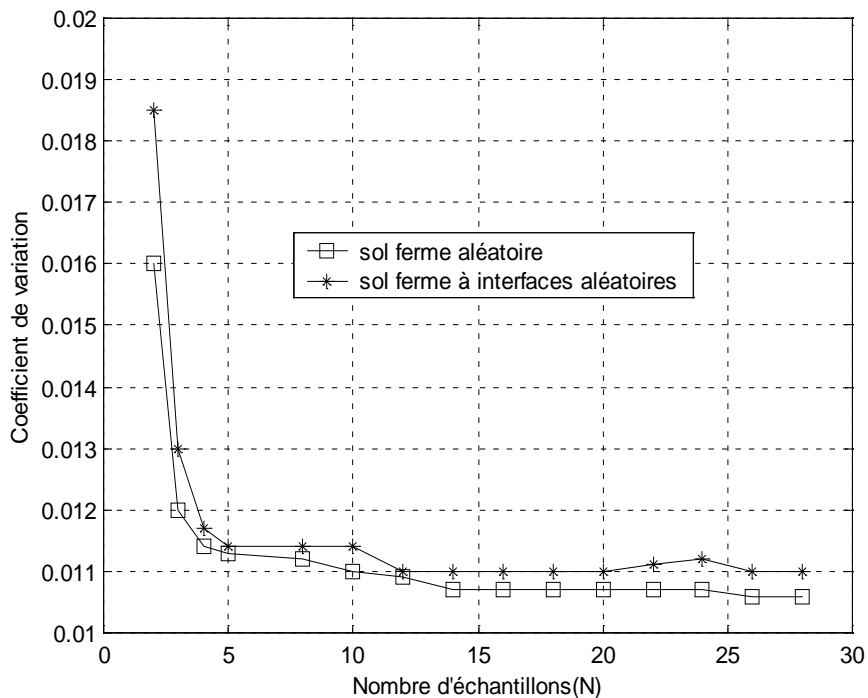


Figure (VIII-2b): Coefficient de variation en fonction du nombre d'échantillons, cas de sol ferme

III EFFET DU RAPPORT ADIMENSIONNEL, LONGUEUR D'OUVRAGE SUR LONGUEUR DE CORRELATION

Nous retenons dans cette partie les moyennes des réponses maximales calculées au toit de la structure avec 10 réalisations. Nous allons voir l'effet des rapports L/r_x et L/r_y sur l'atténuation de la réponse dans le cas d'un sol hétérogène. Pour cela, nous traçons le taux d'atténuation (rapport de la réponse sismique en milieu hétérogène sur la réponse en milieu homogène) en fonction des rapports adimensionnels L/r_x et L/r_y respectivement

Avec: L : longueur de l'ouvrage.

r_x, r_y : longueur de corrélation suivant l'axe horizontal et vertical respectivement.

Au vu des conclusions tirées du chapitre précédent, il est plus intéressant de traiter uniquement le cas de sol mou. Les courbes (VIII-3a) et (VIII-3b) représentent le taux d'atténuation de la réponse en fonction respectivement des rapports adimensionnels précités.

De ces figures nous constatons que le taux d'atténuation du mouvement est très significatif pour des valeurs de L/r comprise entre 1 et 5 ($1 \leq L/r \leq 5$). Nous déduisons ainsi que pour des longueurs de corrélation r_x et r_y trop grandes ou très petites, le calcul des réponses des structures reposantes sur un milieu hétérogène peut être ramené à un calcul plus simple qui est celui d'une structure sur sol homogène.

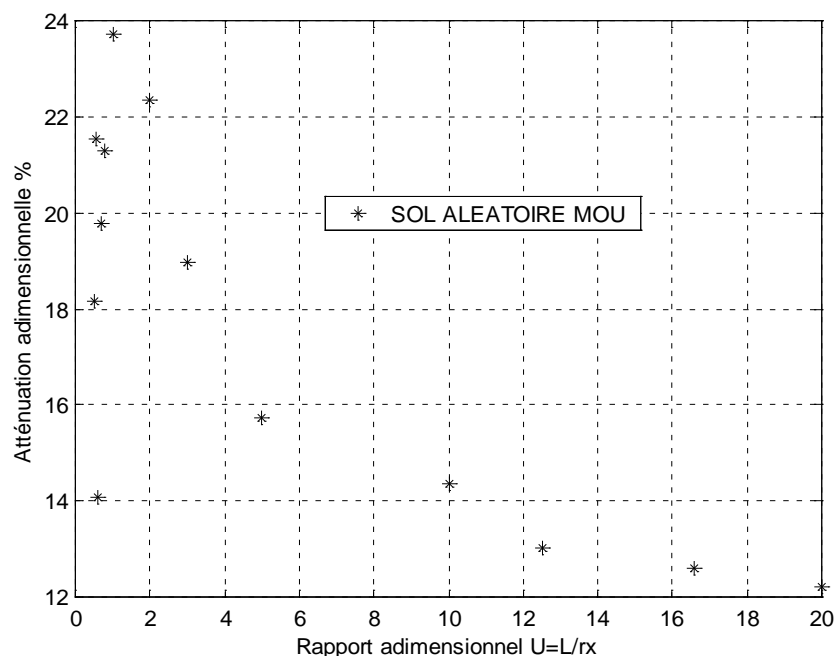


Figure (VIII-3a): Atténuation de la réponse au toit de la structure en fonction du rapport adimensionnel L/r_x

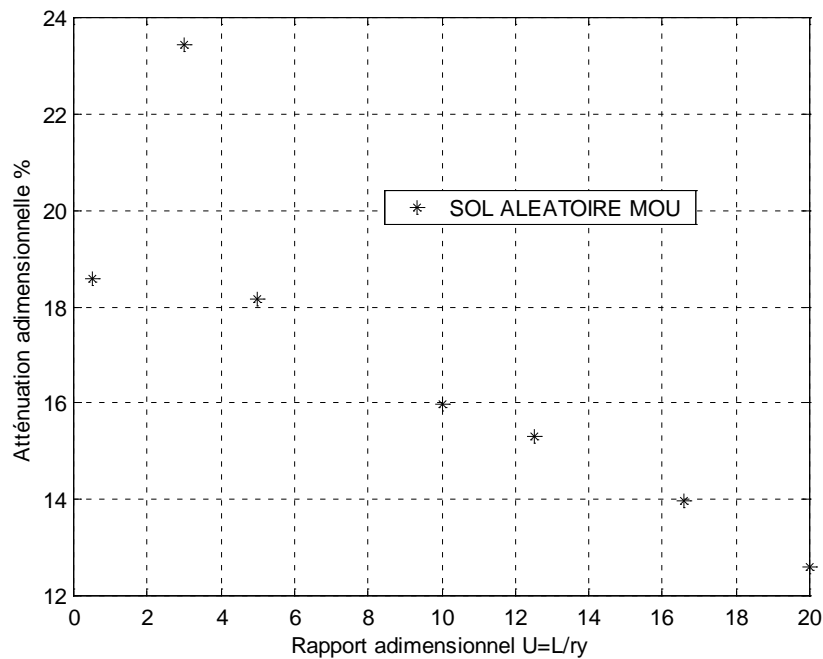


Figure (VIII-3b): Atténuation de la réponse au toit de la structure en fonction du rapport adimensionnel $\frac{L}{r_y}$

IV CONCLUSION

Nous avons étudié dans cette partie l'effet d'un paramètre d'une importance capitale dans les problèmes de calcul de structures à excitations multiples aux supports. Il s'agit du rapport distance entre supports sur longueur de corrélation. Dans le cas de fondation large, nous retrouvons dans la littérature la dimension longueur de fondation. A cette fin, nous avons fait varier la longueur de corrélation du milieu aléatoire tout en fixant la longueur du portique égale à 50m. Nous avons constaté ce qui suit:

- La précision des résultats recherchés (accélération, spectre et fonction de transfert) est atteinte au bout de 10 échantillons.
- En terme de rapport (distance entre supports/ longueur de corrélation), nous constatons que l'hétérogénéité du milieu a pour effet d'atténuer significativement les réponses dans la bande : $1 \leq L/r \leq 5$. En dehors de cet intervalle, les résultats pour le cas de sols homogène et aléatoire convergent.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Ce travail inscrit dans le cadre de ma thèse de Magister, nous a permis d'étudier le phénomène d'interaction sol-structure en milieux hétérogènes soumis à une excitation sismique. Une approche probabiliste pour modéliser la variabilité spatiale des caractéristiques mécaniques du sol, a été utilisée. Deux types d'hétérogénéité de sol ont été considérés, à savoir l'hétérogénéité aléatoire du milieu et l'hétérogénéité des interfaces du multicouche. Pour se faire, plusieurs notions ont été introduites pour mener à bien cette étude. Il s'agit de notions d'écart type, de corrélation et de longueurs de corrélation. Le long de cette étude, toutes les réponses recherchées sont comparées à celles calculées en milieux homogènes (monocouche et multicouches).

Le premier point mis en exergue dans ce travail est l'effet de l'hétérogénéité sur la réponse sismique en surface libre d'une couche de sol. Ces effets peuvent être résumés comme suit :

1. L'hétérogénéité aléatoire du sol implique une atténuation non négligeable de la réponse sismique en tous points de la surface du sol, ainsi qu'un effet de filtrage des amplitudes des mouvements en hautes fréquences. Cette hétérogénéité induit des mouvements différentiels entre paires de 2 points en surface appelés effet du mouvement de rotation induit. Ces mouvements sont d'autant plus importants dans le cas de sol flexible, ils sont cependant inversement proportionnels à la distance de séparation entre les deux points de mesure considérés.
2. Le multicouche à interfaces aléatoires implique une amplification du mouvement moyen par rapport à la réponse du multicouche homogène. Le multicouche à interfaces aléatoires présente un décalage de la fréquence fondamentale vers une valeur supérieure. Il apparaît par conséquent plus rigide que le multicouche homogène, ceci est dû au fait qu'il est plus difficile de déplacer relativement (faire glisser) deux couches à interfaces aléatoires.

Dans une deuxième partie, nous avons étudié les effets d'interaction sol-structure en milieux hétérogènes. Les analyses faites, concluent dans le cas d'hétérogénéité aléatoire que:

1. En général les réponses du système sol-structure en milieu homogène enveloppent celles en milieu hétérogène aléatoire. En d'autres termes l'hétérogénéité du milieu induit des atténuations de toutes les réponses (à la base et au toit). Cet effet d'atténuation favorable à la conception des structures est cependant accompagné d'un autre effet défavorable, à savoir le filtrage des fréquences propres du système total sol-structure.
2. Les effets de l'hétérogénéité du sol sont prépondérants dans le cas d'interaction de structure rigide avec sol mou.

Dans le cas d'hétérogénéité des interfaces, on peut conclure :

1. En général les réponses du système sol-structure en multicouche à interfaces aléatoires enveloppent celles calculées en multicouche homogène, cette observation est probablement liée au phénomène de piégeage des ondes. Cet effet d'amplification est cependant accompagné d'un passage de la fréquence fondamentale du système global sol-structure vers les hautes fréquences. Ainsi le système est plus rigide dans le cas d'une multicouche à interfaces aléatoires que dans le cas d'une multicouche homogène.
2. Apparition de mouvements différentiels contribuant à l'amplification des mouvements verticaux.
3. Les effets induits s'accroissent en présence de structure rigide reposant sur sol mou.

Dans la dernière partie, nous avons étudié l'effet du nombre d'échantillons, ainsi que du rapport distance entre supports dans le cas d'excitation d'appuis multiples ou longueur de fondation dans le cas de structures à fondations larges sur longueur de corrélation. Nous avons fait varier la longueur de corrélation du milieu aléatoire tout en fixant la longueur du portique à 50m, nous avons constaté ce qui suit:

1. La convergence des résultats recherchés (accélérations, spectre et fonction de transfert) est atteinte au bout de 10 échantillons.
2. En terme de rapport (distance entre supports/ longueur de corrélation), nous constatons que l'hétérogénéité du milieu a pour effet d'atténuer significativement les réponses dans la bande : $1 \leq L/r \leq 5$. Au delà de cet intervalle, les résultats convergent vers ceux du cas homogène.

La complexité certaine du problème d'**interaction sol-structure en milieux hétérogènes**, dans le cadre de ce travail ne nous a pas permis d'aborder l'ensemble des phénomènes influants. Nous proposons pour de futures recherches l'introduction d'autres paramètres pour compléter et enrichir la présente étude, modeste certes. Il s'agit de:

- Non linéarité du sol,
- Effet de site,
- Génération d'excitations artificielles par simulation.
- Généralisation à d'autres types d'ondes d'incidence non nulle,
- Autres types de fondations à base large,
- Autres types de fonctions de corrélations (Gaussienne ou de Von Karmen),
- Autres types de lois de distribution, par exemple la loi lognormale,
- Variation spatial d'autre paramètres du sol en plus du module de cisaillement (densité, ...etc.),
- Effet tridimensionnel du problème.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Abdel-Ghafer A.M and Rubbin L.I., (1982). 'Suspension bridge response to multiple support excitations', *J. eng. mech. div. ASCE108*, pp 419-435.
- [2] Abrahamson N.A., (1985). 'Estimation of seismic wave coherency and rupture velocity using the SMART1 strong motion array recording', *EERC report N° UCB/ EERC-85/02*.
- [3] Abrahamson N.A, Shneider J.F and Stepp N., (1991). 'Emprical spatial coherency functions for application to the soil-structure interaction analysis', *Earthquake Spectra*, vol.7 N°1.
- [4] Aki K and Richards P.G., (1980). 'Quantitative Seismology', *W.H.Freeman, San Francisco, California*.
- [5] Antoinet E., (1995). 'Intégration de la variabilité spatiale dans l'estimation probabiliste du tassement et du dévers de grands ouvrages', *Thèse de Doctorat. Université de Bordeaux I (France)*.
- [6] Beacher G.B and Ingra T.S., (1981). 'Stochastic FEM in settlement predictions', *Journal of Geotechnical engineering division*, GT4.
- [7] Berrah M.K and Kausel E., (1990). 'Modified response spectrum model for the design of structures subjected to spatially varying excitations', *Report R90-2*, Department of Civil Engineering, MIT, Cambridge, MA.
- [8] Berrah M.K and Kausel E., (1992). 'Response spectrum analysis of structures subjected to spatially varying motions', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 21, pp 461-470.
- [9] Bogdanoff J.L., Goldberg J.E and Schiff A.J., (1965). 'The effect of ground transmission time on the response of long structures', *Bull.Seism.Soc America.55*, pp 627-640
- [10] Bolle A.,(1988). 'Approche probabiliste en mécanique des sols avec prise en compte de la variabilité spatiale', *Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*.
- [11] Bolt B.A., Penzien J and Tsai Y.B., (1981). 'Preliminary results from the strong motion accelerograph array in Taiwan', *Newsletter, earthquake eng. Res. Inst.* 15 (5), pp 24-27.
- [12] Bolt B.A., Tsai Y.B., Yeh K and Hsu M.K., (1982). 'Earthquake strong motions records by large bear source array of digital seismographs. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 10, pp 561-573.
- [13] Boulfkhad T., (1986). 'Influence de la variabilité des propriétés des sols sur le calcul des tassements des fondations', *Thèse de Doctorat, Université de Clermont 2*.
- [14] Bycroft G.N., (1980). 'Soil-foundation interaction and differential ground motion', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 8, pp 397-404.

- [15] Cambou B., (1975). 'Application of first order uncertainty analysis in the finite elements method in linear elasticity', *Proceed. 2nd int. Conf. on Appl. Of Statis and Prob. in soil and structural Eng, London, England*, vol 2. pp 153-160.
- [16] Casagrand A., (1965). 'Role Of « calculated risk » in earthwork and foundation engineering', *ASCE, Jl of SMFD*, vol.91, n° SM4.
- [17] Chen J.C and Wada B.K., (1977). 'Matrix perturbation for structural dynamic analysis', *AIAA*, vol.15, n° 8.
- [18] Chopra A.K., (1984). 'Earthquake responses of structures with partial uplift analysis', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 12, pp 265-281.
- [19] Clough R.W. and Penzien J., (1975). 'Dynamics of structures', Mc Graw Hill, New York.
- [20] Cornell C.A., (1971). 'First order uncertainty analysis in soils deformation and stability', *Proceed. 1st int. Conf. on Appl. Of Statis and Prob. in soil and structural Eng, London, England*, vol 1. pp 78-102.
- [21] Deodatis G., Popescu R and Prevost J.H., (1996). 'Effect of stochastic variability on soil liquefaction resistance', *Eleventh world conference on earthquake engineering. N° 393*.
- [22] Der Kiureghhan A and Newenhofer A., (1992). 'Response spectrum method for multiple-support seismic excitation', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. vol. 21, pp 713-740.
- [23] Der Kiureghhan A, (1996a). 'A coherency model for spatially varying ground motion', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. vol. 25, pp 99-111.
- [24] Der Kiureghhan A and P.Keshishian, (1996b). 'Effect of site response on spatial variability of ground motion', *Elsevier science Ltd. Paper No.705*.
- [25] Dong K.K and Wielland M., (1988). 'Application of response spectrum method to a bridge subjected to multiple support excitations', *Proceeding of the 9th world conference on earthquake engineering, Tokyo-Kyoto, Japan*, VI, 531-536.
- [26] Franckel A and Clayton R.W., (December 1984). 'A finite-difference simulation of wave propagation in two-dimensional random media', *Bulletin of seismological society of America*, vol. 71, No.7, pp 2167-2186.
- [27] Franckel A and Clayton R.W., (May, 10, 1986). 'Finite difference simulation of seismic scattering: Implication for the propagation of short period seismic waves in the crust and model of crustal heterogeneity'. *Journal of geophysical Research*, vol. 91, No. B6 pp 6465-6489.
- [28] Genevois B., (1984). 'Rôle de la variabilité spatiale des paramètres de sols sur la capacité portante des fondations superficielles', *Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Paris*
- [29] Hao H., (1989). 'Effects of spatial variation of ground motions on large multiply support structures', *Report N° UCB/EERC-89/06, University of California at Berkley*.

- [30] Hao H., (1991). 'Response of multiply supported rigid plate to spatially correlated seismic excitation'. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 20, pp 821-838.
- [31] Hao H., (1996). 'Characteristics of torsional ground motions'. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 25, pp 599-610.
- [32] Harada T., (1984). 'Probabilistic modeling of spatial variation of strong earthquake ground displacements', *Proceeding of the 8th world conference on earthquake engineering*, San Francisco, vol 2, pp 605-612.
- [33] Harichandran R.S and Vanmarcke E., (1986). 'Stochastic variation of earthquake motion in space and time', *Jl. eng. mech. div. ASCE*, vol 12, pp 154-174.
- [34] Harichandran R.S., (1987). 'Stochastic analysis of rigid foundation filtering', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 15, pp 889-899.
- [35] Harichandran R.S and Wang W., (1988). 'Response of indeterminate two-span beams to spatially varying seismic excitation', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 19, pp 173-187.
- [36] Hiddale C., (1971). 'Probabilistic approach to estimating differential settlement of footing on sand', *Ph.D. Thesis, MIT, Cambridge*.
- [37] Hoshiya et Ishii., (1982). 'Potential loss of ground motion due to kinematic interaction in a 4-story RC building', *Trans JSCE appl.mech. struct. eng. div.* 14, pp 129.
- [38] Hoshiya M and Ishii K., (1983). 'Evaluation of kinematic interaction of soil-foundation systems by a stochastic model', *Soil dyn. Earthquake eng.* 2, pp 128-134.
- [39] Hryniewicz Z., (1984). 'Intensity of waves in a randomly non-homogeneous layered medium', *Earthquake Engineering and structural dynamics*, vol.12, pp1-8.
- [40] Hryniewicz Z and Hermans A.J., (1987). 'Effective solution for Rayleigh-type waves in a randomly inhomogeneous medium', *Journal of Sound and vibration*, pp 351-362.
- [41] Hryniewicz Z and Hermans A.J., (1989). 'Free-field response from inclined body waves in a viscoelastic random medium', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol.18, pp 1025-1040.
- [42] Idriss I.M and al., 'Seismic response of soil layers', *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, pp1003-1031.
- [43] Kausel E and Pais A., (1987). 'Stochastic deconvolution of earthquake motions', *J.eng. mech. div. ASCE*, 113, n^o 2, pp 266-277.
- [44] Keller J.B., 'Stochastic equations and wave propagation in random media', *Air Force Cambridge Research Laboratories*.
- [45] King J.L., (1981). 'Observation on the seismic response of sediment filled valleys', *Ph.D Dissertation, university of California, San Diego, CA*.

- [46] Laouami N et Labbé P., (1996a). 'Spectre de torsion induit par la variabilité spatiale du mouvement sismique', *4ème Colloque National de Génie Parasismique, AFPS, France*, 1, pp.84-92.
- [47] Laouami N et Labbé P., (1996b). 'Effet de la variabilité spatiale du mouvement sismique dans la réponse des structures', *4ème Colloque National de Génie Parasismique, AFPS, France*, 1, pp.84-92.
- [48] Loh C.H, Penzien J and Tsai Y.H.,(1982). 'Engineering analyses of Smart1 array accelerograms', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 10, pp 575-591.
- [49] Loh C.H and Yeh Y.,(1982). 'Spatial variation and stochastic modeling of seismic differential ground movement', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 16, pp 583-596.
- [50] Luco J.E and.Wong H.L.,(1986). 'Response of rigid foundation to a spatially random ground motion', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. vol. 14, pp 891-908.
- [51] Lumb P., (1966). 'Variability of natural soils', *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 3, n° 2, pp 74-97.
- [52] Lysmer J., Udaka T., Tsai C-F and Seed H.G., (November 1975). 'FLUSH a computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems', *Earthquake Engineering Research Center ,Report No.EERC 75-30*.
- [53] Magnan J-P., (1982). 'Les méthodes statistiques et probabilistes en mécanique des sols'. *Presse de l'école nationale des ponts et chaussées*.
- [54] Masri S. F., (1976). 'Response of beams to propagating boundary excitations', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. vol. 4, pp 497-509.
- [55] Mathéron G., (1969). 'Le krigeage universel', *Cahiers du centre de morphologie mathématique de Fontainebleau*.
- [56] Matlab, (1992). 'High performance numeric computation and visualization software reference guide. *Math works, Inc*.
- [57] Max J., (1985). 'Méthode et technique du traitement du signal et application aux mesures physiques. *Masson 4ème édition*.
- [58] Menke W., (1983). 'A formula for apparent attenuation of acoustic waves in randomly layered media', *Geophysics. J. R. Astr. Soc.*, vol. 75, pp 541-544.
- [59] Messaoudi A. et Laouami N., (2000). 'Interaction sol-structure en milieu hétérogène', Actes du 2^{ème} Colloque National de Génie parasismique, Alger Shératon-Club des Pins, 08, 09 et 10 octobre 2000.
- [60] Mok C.H and Muray E.A., (1965). 'Free vibrations of a slender bar with non uniform characteristics', *J.Acoust. Soc. Am*, vol. 40, pp 386-389.

- [61] Mylonakis G., Nikolaou A and Gazetas G., (1997). 'Soil-pile-bridge seismic interaction: kinematic and inertial effects. Part I: soft soil', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. vol. 26, pp 337-359.
- [62] Naprestek J and Fischer O., (1996). 'Dispersion of two- dimensional waves through continuum with randomly variable parameters', *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering. Paper 1174*.
- [63] Newmark N.M., (1969). 'Torsion in symmetrical building', *Proceeding of the 4th world conference on earthquake engineering, Santiago, Chile*, vol 11, pp A3.19-A3.32.
- [64] Niazi M., (1986). 'Inferred displacements, velocities and rotations of a long rigid foundation located at El-Centro differential array site during the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 14, pp 531-542.
- [65] Nour A, (1997). 'Simulation numérique du champ lointain dans l'interaction dynamique sol-structure par les frontières de transmission'. *Thèse de Magister. USTHB (Algérie)*.
- [66] Oliviera C.S and Bolt B.A., (1989). 'Rotational components of surface strong ground motion', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 18, pp 517-528.
- [67] Pecker A., (1984). 'Dynamique des sols', *Presse de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris*.
- [68] Penzien C.H and Tsai Y.B., (1982). 'Engineering Analysis of Smart 1 Array accelerograms', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 10, pp 575-591.
- [69] Prasthofer P.H and Beadle C.W., (1975). 'Dynamic response of structures with uncertainties in their stiffness', *Jl. sound and vibration*, vol. 42, pp 477-493.
- [70] Ramos J.A., (1970). 'Predictions of patterns of settlement of structures on sand', *Ph.D Thesis, MIT, Cambridge*
- [71] Resendiz D and Herrera I., (1969). 'A probabilistic formulation of settlement controlled design', *Proceeding of the 6th world conference on soil mechanics and foundation eng*, vol 3.
- [72] Richart F.E., Hall J.R and Woods R.D., (1970). 'Vibrations of Soils and Foundations', *Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey*.
- [73] Sato T. And Kawase H., (1992). 'Finite element simulation of seismic wave propagation in near-surface random media', *Proceeding of the international symposium on the effects of surface geology on seismic motion, I*, pp257-262
- [74] Schimminig B.B and Garvey W.A., (1967). 'Monte Carlo simulation of pile performance', *Highway research record, n^o 190*.
- [75] Schueller G.I, Shinozuka M., (1987). *Stochastic methods in structural dynamics. Martinus Nijhoff Publishers, A member of the Kluwer Academic Publishers Groups , Dordrecht / Boston / LANCASTER.*

- [76] Slimani A., (1997). Analyse dynamique des structures étendues soumises à l'effet de la variabilité spatiale de l'action sismique. *Thèse de Magister. Ecole Nationale Polytechnique (Algérie)* .
- [77] Smith S.W., Ehrenenberg J.E and Hernandez E.N., (1982). 'Analysis of the El Centro differential array for the 1979 Imperial Valley earthquake', *Bull. Seis. Soc. Am*, 72, pp 237-258.
- [78] Somerville P.G., Mc Laren J.P., Sen M.K., (1988). 'The Influence of Site Conditions on the Spatial Incoherence of Ground Motions', *International workshop on spatial variation of earthquake ground motion, Dunwalke, New Jersey*.
- [79] Song Y.H., (1993). 'An improved two-spring model for foundation uplift analysis', *Computers and structures*, vol 46 n° 5, pp 791-805.
- [80] Soung T.T., (1973). 'Random differential equations in science and engineering', *Academic Press, New York*.
- [81] Tabbouche B., (1999). 'Analyse sismique d'une couche de sol hétérogène-Variabilité spatiale du mouvement sismique et effet de filtrage', *Thèse de Magister. U.S.T.Blida (Algérie)*
- [82] Tamura C., Noguchi T and Kato K., (1977). 'Earthquake observations along measuring lines on the surfaces of alluvial soft ground', *Proceeding of the 6th world conference on earthquake engineering, New Delhi, India I*, pp 389-394.
- [83] Toubalem F., (1996). 'Interaction sol-structure en milieu hétérogène', *Thèse de Doctorat. Ecole centrale de Lyon (France)* .
- [84] Tso W.K and Hsu T.I., (1978). 'Torsional spectrum for earthquake motions', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 18, pp 517-528.
- [85] Tsuchida H., Kurata E and Hayashi S., (1977). 'Observation of earthquake response of ground with horizontal and vertical seismometer arrays', *Proceeding of the 6th world conference on earthquake engineering, New Delhi, India I*, pp 509-515.
- [86] Wolf J.P., (USA 1985). 'Dynamic soil-structure interaction'. *Editions Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey*.
- [87] Wu T.H and Kraft L.M., (1967). 'Probability of foundation safety', *ASCE, Jl of SMFD*, vol. 93, n° SMS.
- [88] Yamamura N and Tanaka H., (1990). 'Response analysis of flexible MDF systems for multiple-support seismic excitations', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 19, pp 345-357.
- [89] Zeitoun D.G and al., (1987). 'Application of random elasticity to soil engineering', *Elsevier Science Publishers B.V*, pp77-93.
- [90] Zembaty Z., (Dec, 1997). 'Spatial seismic effect on multi-support structures', *19th European Regional Earthquake Engineering Seminar, Cairo, Egypt*.

[91] Zerva A., (1990). 'Response of multi-span beams to spatially incoherent seismic ground motions', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 19, pp 819-832.

[92] Zerva A., (1992). 'Spatial incoherence effects on seismic ground strains. Probabilistic', *Engineering Mechanics* 7, pp 2117-226.

[93] Zerva A and Harada T., (1987). ' A site-specific model for the spatial incoherence of seismic ground motions', *Proceeding of the 6th world conference on earthquake engineering*, vol 14, pp 931-940.

[94] Zienkiewicz O.C.,(1979). 'La méthode des éléments finis'. *Groupe Mc-Hill Inc, Paris*.