



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

Direction Post-Graduation & Recherche Scientifique

Mémoire de Magister

Option : Matériaux et Structures

SADINE Imad Eddine

Ingénieur d'État en Travaux Publics

Diplômé de l'École Nationale Supérieure des Travaux Publics

Intitulé du Mémoire

**EFFET DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DES PROPRIÉTÉS DE
SOL SUR LA RÉPONSE DES STRUCTURES ÉTENDUES**

Soutenu le 24/04/2013 devant le Jury composé de :

A.ZERZOUR	Professeur, ENSTP	Président
M.HADID	Professeur, ENSTP	Rapporteur
M.BENSAIBI	Professeur, USDB	Examineur
N.MEZOUER	Maitre de Recherche A, CGS	Examineur
M.AMIEUR	Maitre de Conférences A, ENSTP	Examineur

Dédicaces

À Ma chère famille

Ma très chère mère

Mon très cher père

Mes chers frères

Mes chères sœurs

Remerciements

Toute notre gratitude, grâce et remerciements vont à DIEU le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour donner terme à ce travail.

Je remercie mon encadreur Monsieur **M. HADID**, professeur de l'ENSTP pour tous ses efforts et tous ses encouragements continus et d'avoir consacré leur temps précieux et de m'avoir accueillie au sein de son établissement.

Je remercie vivement Mr **A. ZERZOUR**, professeur et la président de l'ENSTP, d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire et de m'avoir reçu au sein de son établissement.

Je remercie vivement Mr **M. BENSAIBI**, professeur d' USDB. Je suis très reconnaissant à vous pour votre acception d'être un membre de mon jury.

J'adresse un grand remerciement à Mr **M. AMIEUR**, maître de conférences A à l'ENSTP, d'avoir accepté de participer au jury d'examen.

Un grand merci à Mr. **N. MEZOUER**, maitre de recherche A, CGS qui m'a orienté dans tous mes travaux de recherche de l'ingéniorat et de ce travail et qui représente sincèrement le frère moral de tous les techniciens dans le domaine du génie parasismique.

Je témoigne également ma parfaite reconnaissance, à l'ensemble du personnel de laboratoire de recherche (ENSTP), pour les moyens qui ont été mis à notre disposition durant toute la durée de la formation.

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre 1 Recherche Bibliographique et L'effet de l'inhomogénéité du sol sur sa fonction d'amplification	5
1.1 Introduction	6
1.2 Les méthodes stochastiques de simulations de la variabilité spatiale du sol	6
1.2.1 Les techniques statistiques pour la modélisation de la variabilité du sol	6
1.2.2 État de l'art sur l'investigation stochastique des milieux hétérogènes	7
1.3 Fonction d'amplification d'un profil de sol non homogène	9
1.3.1 Equations de mouvement	13
1.4 Influence du paramètre de non homogénéité ' p ' sur la fonction de transfert	15
1.4.1 L'amplitude	15
1.4.2 La fonction d'amplification en fonction $\tilde{\omega}$ et p	16
1.4.3 La fonction d'amplification en fonction $\tilde{\omega}$ et q	18
1.5 Conclusion	21
Chapitre 2 Classification des sites de la ville d'Alger et détermination des paramètres de non-homogénéitép	22
2.1 Introduction	23
2.2 La géologie	23
2.2.1 Généralités	23
2.2.2 L'état géologique local de la zone algéroise	23
2.2.3 Propriétés de la géologie locale	24
2.3 Classification des sites selon RPA99/2003	25
2.3.1 Classification selon RPA99/2003	25
2.3.2 Définition des sites	25
2.4 Détermination de paramètre de non homogénéité « p » pour chaque site	28
2.5 Conclusion	31
Chapitre 3 Simulation des propriétés des sols et l'Analyse probabiliste de la fonction DSP	32
3.1 Introduction	33
3.2 Simulation des propriétés du sol	33
3.2.1 Variabilité des propriétés du sol non-bornées (vitesse de cisaillement)	33
3.2.2 Variabilité des propriétés du sol bornées (paramètre de non homogénéité p)	41
3.3 Analyse probabiliste des fonctions de densités spectrales de puissance de la ville d'Alger	49
3.3.1 Modélisation de la fonction de densités spectrales de puissance (DSP)	49
3.3.2 Variabilité des fonctions de densités spectrales de puissance en fonction de p	52
3.3.3 Variabilité des fonctions de densités spectrales de puissance en fonction de Vs	57
3.4 Conclusion	62

Chapitre 4	Effets de la variabilité spatiale due aux effets de site sur les structures modélisées en poutres continues	64
4.1	Introduction	65
4.2	Description les effets de site	65
4.3	Fonction de cohérence due aux effets de site	67
4.4	Evaluation des réponses stochastiques des structures soumises à des excitations sismiques variables	68
4.5	Equation du mouvement des systèmes multi appuis	69
4.5.1	Système continu	69
4.5.2	Systèmes discrets	75
4.6	Application	78
4.6.1	Description de l'application	78
4.6.2	Les effets sur la moyenne des maxima des déplacements	80
4.6.3	Les effets sur la moyenne des maxima des moments fléchissant	83
4.6.4	Les effets sur la moyenne des maxima des efforts tranchants	85
4.7	Conclusion	88
	Conclusion générale et recommandations	90
	Références bibliographiques	95

Liste des Figures

Figure 1.1	Profil de sol non-homogène et distribution de module de cisaillement avec la profondeur	13
Figure 1.2	L'allure du module de cisaillement G en profondeur en fonction de ' p '	15
Figure 1.3	Fonction d'amplification de profil de sol non homogène ($q=0.25, 0.5, 0.75$)	17
Figure 1.4	Influence du paramètre de non homogénéité p sur la fonction d'amplification	18
Figure 1.5	Fonction d'amplification de profil de sol non homogène ($p=0,0.25, 0.5, 0.75$ et 1)	19
Figure 1.6	Influence du rapport d'impédance q sur la fonction d'amplification	20
Figure 2.1	Modèle du sol sous la terre (Etude JICA-CGS)	24
Figure 2.2	les droites de régression de vitesse des ondes S en fonction de (z/H) pour $H=20$ m	29
Figure 3.1(a)	Réalisations de la vitesse de cisaillement de dépôts de plage et de dune pour différentes valeurs de CV_{V_S}	35
Figure 3.1(b)	Réalisation typique des histogrammes de la vitesse de cisaillement de dépôts de plage et de dune	35
Figure 3.2(a)	Réalisations de la vitesse de cisaillement de dépôts alluvial (sable) pour différentes valeurs de CV_{V_S}	36
Figure 3.2(b)	Réalisation typique des histogrammes de la vitesse de cisaillement de dépôts alluvial (sable)	36
Figure 3.3(a)	Réalisations de la vitesse de cisaillement de dépôts alluvial (argile) pour différentes valeurs de CV_{V_S}	37
Figure 3.3(b)	Réalisation typique des histogrammes de la vitesse de cisaillement de dépôts alluvial (argile)	37
Figure 3.4(a)	Réalisations de la vitesse de cisaillement de dépôts alluvial ancien pour différentes valeurs de CV_{V_S}	38
Figure 3.4(b)	Réalisation typique des histogrammes de la vitesse de cisaillement de dépôts alluvial ancien	38
Figure 3.5(a)	Réalisations de la vitesse de cisaillement de terrasse marine pour différentes valeurs de CV_{V_S}	39
Figure 3.5(b)	Réalisation typique des histogrammes de la vitesse de cisaillement de terrasse marine	39
Figure 3.6(a)	Réalisations de la vitesse de cisaillement de grés calcaires et couches hastienne pour différentes valeurs de CV_{V_S}	40
Figure 3.6(b)	Réalisation typique des histogrammes de la vitesse de cisaillement de grés calcaires et couches hastienne	40
Figure 3.7(a)	Réalisations du paramètre p de site S2 ($p_0 = 0.41$; $p_{\min} = 0$; $p_{\max} = 1$) de 20 m	43
Figure 3.7(b)	Réalisation typique des histogrammes du paramètre p de site S2 de 20 m	43
Figure 3.8(a)	Réalisations du paramètre p de site S3 ($p_0 = 0.45$; $p_{\min} = 0$; $p_{\max} = 1$) de 20m	44
Figure 3.8(b)	Réalisation typique des histogrammes du paramètre p de site S3 de 20 m	44
Figure 3.9(a)	Réalisations du paramètre p de site S2 ($p_0 = 0.35$; $p_{\min} = 0$; $p_{\max} = 1$) de 30 m	45

Figure 3.9(b)	Réalisation typique des histogrammes du paramètre p de site S2 de 30 m	45
Figure 3.10(a)	Réalisations du paramètre p de site S3 ($p_0 = 0.58$; $p_{\min} = 0$; $p_{\max} = 1$) de 30 m	46
Figure 3.10(b)	Réalisation typique des histogrammes du paramètre p de site S3 de 30 m	46
Figure 3.11(a)	Réalisations du paramètre p de site S2 ($p_0 = 0.44$; $p_{\min} = 0$; $p_{\max} = 1$) de profil réelle	47
Figure 3.11(b)	Réalisation typique des histogrammes du paramètre p de site S2 de profil réelle	47
Figure 3.12(a)	Réalisations du paramètre p de site S3 ($p_0 = 0.57$; $p_{\min} = 0$; $p_{\max} = 1$) de profil réelle	48
Figure 3.12(b)	Réalisation typique des histogrammes du paramètre p de site S3 de profil réelle	48
Figure 3.13	Variation de l'amortissement du sol du modèle de Kanai Tajimi en fonction du rapport d'impédance et du paramètre de non homogénéité du sol	51
Figure 3.14	Variation de la fréquence fondamentale du sol normalisée du modèle de Kanai Tajimi en fonction du rapport d'impédance et du paramètre de non homogénéité du sol	51
Figure 3.15	la DSP en fonction de la variabilité du paramètre de non homogénéité p pour différentes valeurs de CV_p de site S2 (sol ferme)	54
Figure 3.16	la DSP en fonction de la variabilité du paramètre de non homogénéité p pour différentes valeurs de CV_p de site S3 (sol meuble)	55
Figure 3.17	la DSP en fonction de la variabilité du paramètre de non homogénéité p pour différentes valeurs de CV_p de site S2 (sol ferme)	55
Figure 3.18	la DSP en fonction de la variabilité du paramètre de non homogénéité p pour différentes valeurs de CV_p de site S3 (sol meuble)	56
Figure 3.19	la DSP en fonction de la variabilité du paramètre de non homogénéité p pour différentes valeurs de CV_p de site S2 (sol ferme)	56
Figure 3.20	la DSP en fonction de la variabilité du paramètre de non homogénéité p pour différentes valeurs de CV_p de site S3 (sol meuble)	57
Figure 3.21	la DSP en fonction de la variabilité de la vitesse de cisaillement pour différentes valeurs de CV_V de dépôts de plage et de dune	59
Figure 3.22	la DSP en fonction de la variabilité de la vitesse de cisaillement pour différentes valeurs de CV_{V_s} de dépôts alluvial (sable)	60
Figure 3.23	la DSP en fonction de la variabilité de la vitesse de cisaillement pour différentes valeurs de CV_{V_s} de dépôts alluvial (argile)	60
Figure 3.24	la DSP en fonction de la variabilité de la vitesse de cisaillement pour différentes valeurs de CV_{V_s} de dépôts alluvial ancien	61
Figure 3.25	la DSP en fonction de la variabilité de la vitesse de cisaillement pour différentes valeurs de CV_{V_s} de terrasse marine	61

Figure 3.26	la DSP en fonction de la variabilité de la vitesse de cisaillement pour différentes valeurs de CV_{V_s} de Grés calcaires et Couches hastienne	62
Figure 4.1	Effets de site dus au piégeage des ondes sismique dans les couches de dépôts (meubles)	66
Figure 4.2	Modèle de structure pris dans l'application	78
Figure 4.3	Moyenne des maxima des composantes dynamiques des déplacements	81
Figure 4.4	Moyenne des maxima des composantes pseudo-statiques des déplacements	81
Figure 4.5	Moyenne des maxima des composantes dynamo-statiques des déplacements	82
Figure 4.6	Moyenne des maxima des déplacements totaux	82
Figure 4.7	Moyenne des maxima des composantes dynamiques des moments fléchissants	83
Figure 4.8	Moyenne des maxima des composantes pseudo-statiques des moments fléchissant	84
Figure 4.9	Moyenne des maxima des composantes dynamo-statiques des moments fléchissant	84
Figure 4.10	Moyenne des maxima des moments fléchissant totaux	85
Figure 4.11	Moyenne des maxima des composantes dynamiques des efforts tranchants	86
Figure 4.12	Moyenne des maxima des composantes pseudo-statiques des efforts tranchants	86
Figure 4.13	Moyenne des maxima des composantes dynamo-statiques des efforts tranchants	87
Figure 4.14	Moyenne des maxima des efforts tranchants totaux	87

Liste des Tableaux

Tableau 2.1	Propriétés de la géologie technologie (Etude JICA-CGS)	25
Tableau 2.2	Classification des sites selon RPA (99/2003)	25
Tableau 2.3	La classification des 33 sites selon l'RPA avec 20 et 30 m et profil réel	26
Tableau 2.4	le paramètre de non homogénéité « p » par la méthode des moindres	28
Tableau 3.1	Les valeurs moyennes du vitesse de cisaillement V_s .	34
Tableau 3.2	Caractéristiques de profil de sol de chaque site pour différentes modules	52
Tableau 3.3	Les valeurs moyennes de la vitesse de cisaillement V_s et la masse volumique ρ_0	58
Tableau 4.1	Caractéristiques des colonnes de sol	79

ملخص

تتغير الإثارة الزلزالية لهياكل طويلة ذو دعم متعدد من ناقل إلى آخر، هذا التحميل المتعدد (غير موحدة) يمكن أن يحدث استجابات مختلفة جدا لتلك المحسوبة في نفس إثارة القاعدة عند كل داعمة (حركة موحدة). التغيير المكاني الناجم على القوات المعروفة باسم قوات شبه ساكنه، والتي لا تظهر في حالة الإثارة موحدة. في الوقت نفسه، القوى الديناميكية الناجمة على آثار القصور الذاتي تميل إلى تخفيض في حالة حركة المتغيرات في الدعم، إن معامل قص الأرض يختلف باختلاف العمق من السطح الحر. إن معرفة الترددات الطبيعية للاهتزاز وكذلك دالة التضخيم من موقع مهم جدا لدراسة تأثير اختلاف الظروف الجيولوجية المحلية للموقع على هذا المنشأ.

في هذا البحث يتم تحليل ردود الهياكل التي تتعرض لآثار التغيير المكاني لخصائص التربة. إن نمذجة تأثير الموقع يتطلب توصيف خصائص التربة تحت كل داعمة بواسطة دالة النقل. هذه الدوال محددة تحليليا على أساس التدفق العمودي للموجات الزلزالية المسطحة في التربة التي تملك تغيير في معامل قص الأرض والذي يزيد بزيادة العمق فيجب تحليل آثار التغيير المكاني الناجم على تأثير الموقع على الهياكل المصممة بعوارض مستمرة.

أظهرت التحاليل المختلفة أن تأثير الموقع ظاهرة ذات أهمية كبرى ويجب أخذها بعين الاعتبار بكل تحفظ عند الحساب الزلزالي للهياكل المرتكزة على تربة ذات خصائص مختلفة عند كل أساس. البحث عن المكونة شبه الساكنة للإجابات مهم جدا لأنها المتسببة في انسيابات مختلفة تحت كل أساس وظهور قوى داخلية مضافة قد تتسبب في انهيارات في الهياكل.

مفتاح الكلمات: هياكل طويلة ذو دعم متعدد، التغيير المكاني، شبه الساكنة، معامل قص الأرض، دالة التضخيم، تأثير الموقع.

Résumé

Pour les structures étendues, multi appuis, l'excitation sismique varie d'un support à l'autre, ce chargement multiple (non uniforme) peut induire des réponses très différentes de celles calculées en considérant la même excitation à la base de chaque appui (mouvement uniforme). La variabilité spatiale induit des forces connues sous l'appellation de forces pseudo-statiques, lesquelles forces n'apparaissent pas dans le cas de l'excitation uniforme. Au même temps, les forces dynamiques dues aux effets d'inertie tendent à se réduire dans le cas de mouvements aux appuis variables, le module de cisaillement du sol varie en fonction de la profondeur, à partir de la surface libre. La connaissance des fréquences propres de vibration ainsi que la fonction d'amplification d'un site est très importante pour l'étude de l'effet de la variation des conditions géologiques locales du site sur les ouvrages à édifier sur ce site.

Dans le présent travail, l'analyse des réponses des structures soumise aux effets de la variabilité spatiale des propriétés de sol est effectuée. La modélisation de l'effet de site requiert la caractérisation des profils de sol sous chaque appui en termes de fonctions de transfert. Ces fonctions ont été déterminées analytiquement en se basant sur la propagation verticale des ondes sismiques planes S dans un profil de sol ayant une variation de module de cisaillement qui augmente avec la profondeur en puissance, il s'agit d'analyser effets de la variabilité spatiale due aux effets de site sur les structures modélisées en poutres continues.

L'analyse a montré que l'effet de site est tellement important qu'il faut le prendre en considération avec beaucoup d'attention lors de l'analyse sismiques des structures ancrées dans des conditions de sol différentes. La détermination des composantes pseudo-statiques des réponses est essentielles, ces dernières traduisent les déplacements différentiels et induisent des forces additionnelles qui peuvent causer des ruptures.

Mots clés : Structures étendues, variabilité spatiale, pseudo-statiques, module de cisaillement, fonction d'amplification, l'effet de site.

Abstract

For extended structures, multi support, the seismic excitation varies from one carrier to another, multiple loading (non-uniform) may induce very different responses to those calculated in the same excitation whereas the base of each support (uniform motion). Spatial variability induced forces known as the pseudo-static forces, which forces do not appear in the case of uniform excitation. At the same time, the dynamic forces due to inertia effects tend to be reduced in the case of movement at the supports variables, the shear modulus of the ground varies depending on the depth from the free surface. Knowledge of natural frequencies of vibration and the amplification function of a website is very important to study the effect of the variation of local geological conditions of the site works to build on this site. In this work, the analysis of the responses of structures subjected to the effects of spatial variability of soil properties is performed. Modeling the effect of site requires the characterization of soil profiles under each support in terms of transfer functions. These functions were determined analytically based on the vertical propagation of seismic waves in a flat S soil profile with a variation of the shear modulus increases with depth in power, it is to analyze the effects of spatial variability due to site effects on the structures modeled in continuous beams. The analysis showed that the site effect is so important that it must be considered carefully when analyzing seismic structures rooted in different soil conditions. Determining the components of the pseudo-static response is essential, these reflect the differential displacements and induce additional forces that can cause fractures.

Key words : extended structures, Spatial variability, pseudo static, shear modulus, amplification function, site effect .

Introduction Général

Introduction général

1. Introduction

Parmi les catastrophes naturelles qui affectent la surface de la terre, les séismes sont sans doute ceux qui ont les plus d'effets destructeurs dans les zones urbanisées. Ils sont responsables de la destruction de villes entières, la cause de la mort de milliers d'hommes et ont souvent des conséquences économiques désastreuses pour les pays touchés. Jusqu'à présent, malgré le progrès constant des connaissances scientifiques, il n'est pas possible de prévoir l'instant où un séisme se produira en un lieu donné. Ainsi, afin de réduire au maximum les endommagements éventuels dans les zones à haut risque sismique, il est impératif d'identifier les caractéristiques sismiques de ces zones (aléa, sismicité) et de prendre en compte le risque sismique dans la conception des ouvrages (construction parasismique).

La satisfaction des normes d'exigences en matière de sécurité dans la conception parasismique de structures étendues telles que les ponts, les bâtiments industriels, les barrages, les pipelines, les centrales nucléaires, etc ..., passe nécessairement par une meilleure connaissance du chargement sismique sollicitant de telles structures. L'aspect important du chargement sismique, sollicitant les structures étendues ou les structures fondées sur plusieurs fondations.

Pour les structures étendues, multi appuis, l'excitation sismique varie d'un support à l'autre, ce chargement multiple (non uniforme) peut induire des réponses très différentes de celles calculées en considérant la même excitation à la base de chaque appui (mouvement uniforme). La variabilité spatiale induit des forces connues sous l'appellation de forces pseudo-statiques, lesquelles forces n'apparaissant pas dans le cas de l'excitation uniforme. Au même temps, les forces dynamiques dues aux effets d'inertie tendent à se réduire dans le cas de mouvements aux appuis variables. La somme des deux forces peut être supérieure aux forces générées par une excitation uniforme selon les caractéristiques de la structure et celles du sol.

La comparaison des résultats d'analyse de différentes structures multi appuis soumises à des excitations variables dues à la variabilité spatiale montrent que les réponses sous de telles excitations ne sont pas toujours conservatives par rapport à un chargement sismique uniforme

à la base ; Ces réponses peuvent parfois être excessivement supérieures, ces différences dépendent de la configuration et les propriétés structurelles, de la caractérisation du mouvement variable à la base.

Les fréquences propres de vibration et la fonction d'amplification d'un profil de sol dépendent essentiellement de ses caractéristiques géométriques et mécaniques. Les caractéristiques mécaniques et, en particulier, le module de cisaillement du sol varient en fonction de la profondeur, à partir de la surface libre. Les expériences ont montré que cette variation est en puissance de la profondeur. Vu que l'effet de l'angle d'incidence peut être négligé dans le cas de profil de sol multicouches reposant sur un demi espace rigide, dans ce paragraphe on suppose une propagation verticale des ondes de type P ou S.

On commence d'abord, par la simulation des propriétés du sol, ainsi, on associe à la variable aléatoire non bornée la loi de distribution lognormale (vitesse de cisaillement), et à la variable aléatoire bornée la loi de distribution beta (paramètre de non homogénéité p). Ensuite, on calcul la fonction d'amplification d'un profil de sol multicouches viscoélastique.

2. Objectifs de la thèse

Cette étude a pour objectifs, entre autres, d'analyser :

- Les effets du degré d'inhomogénéité du sol pour différents sites d'Alger sur les réponses des structures soumises à la variabilité spatiale.
- Les déplacements différentiels qui apparaissent et leurs importances en fonction du degré d'inhomogénéité du sol.
- L'importance relative des effets de site sur les réponses des structures.

3. Organisation de la thèse

Après cette introduction, le premier chapitre cette une synthèse des travaux antérieurs est consacrée à un exposé de l'état de l'art en matière d'analyse les méthodes stochastiques de simulations de la variabilité spatiale du sol et nous présenterons l'expression analytique permettant d'estimer les fonctions d'amplification d'un profil de sol non-homogène, dont les caractéristiques mécaniques varient en fonction de la profondeur et surmontant un demi-espace est déterminée.

Introduction général

Dans la deuxième chapitre, nous présenterons Une formulation pour déterminer le paramètre de non homogénéité « p » pour chaque site de la ville d'Alger, nous utilisons la méthode des moindres carrés et la méthode par la droite de régression. Les relations ou fonctions non linéaires doivent être préalablement transformées afin que les principes de l'ajustement linéaire leur soient appliqués.

Dans le chapitre 3, on a présenté une formulation stochastique pour la simulation des propriétés du sol non bornées et bornées.

Dans le chapitre 4, on étudie les effets de la variabilité spatiale due aux effets de site sur les structures modélisées en poutres continues. Enfin, nous présenterons une conclusion de l'ensemble des travaux présentés et nous émettrons des recommandations et suggestions dans le dernier étape.

Chapitre 1

Recherche Bibliographique et L'effet de l'inhomogénéité du sol sur sa fonction d'amplification

1.1 Introduction

Le phénomène d'amplification du mouvement sismique en présence de dépôts de sol meubles est connu. Les amplitudes du mouvement sismique augmentent significativement en surface libre d'un site, plusieurs chercheurs ont analysé ce phénomène et ont développé un certain nombre de modèles analytiques de la fonction d'amplification de site.

Tenant compte de cette modélisation, une formulation analytique de la fonction de transfert établie par (Pecker et Afra, 1995) pour une vitesse de l'onde de cisaillement nulle en surface et par (Hadid et Afra, 2000) pour une vitesse de l'onde de cisaillement non nulle en surface, a été présentée dans ce chapitre. L'effet de l'inhomogénéité et de l'impédance du sol sur l'amplitude de la fonction de transfert.

1.2 Les méthodes stochastiques de simulations de la variabilité spatiale du sol

La plupart des propriétés des sols sont fortement variables et sont rarement homogènes. L'hétérogénéité du sol peut être classée en deux principales catégories (Elkateb et al., 2003). La première est l'hétérogénéité lithologique qui se manifeste sous la forme de couches minces molles ou fermes ancrées dans un milieu ferme ou mou. La seconde source de l'hétérogénéité est attribuée à la variabilité spatiale inhérente des sols, qui représente la variation des propriétés du sol d'un point à un autre due aux différentes conditions de dépôts des sols et aux différentes histoires de chargement. Les regains d'intérêts envers l'hétérogénéité du sol, sa compréhension phénoménologique, sa modélisation et son influence sur le comportement des ouvrages, ont été entrepris grâce à l'ingénierie pétrolière, où beaucoup d'efforts ont été dévoués dans le cadre de la recherche et la prospection pétrolières.

1.2.1 Les techniques statistiques pour la modélisation de la variabilité du sol

Les outils conventionnels utilisés pour tenir compte de l'hétérogénéité du sol en géotechnique consistaient à introduire d'importants coefficients de sécurité, et de se servir de l'expérience locale. D'où le besoin de développer des outils fiables pour incorporer l'hétérogénéité du sol d'une manière quantitative exploitable par les ingénieurs lors du dimensionnement et du calcul des ouvrages.

Idéalement, il serait préférable d'établir des fonctions déterministes permettant de décrire la variabilité spatiale des propriétés du sol. Cependant la description déterministe n'est pas faisable à cause du coût prohibitif du prélèvement d'échantillons et des incertitudes induites par les erreurs de mesure. De plus, la variabilité spatiale des propriétés du sol est extrêmement irrégulière et complexe, car les dépôts de sols présentent souvent des discontinuités et des anisotropies (Jaksa, 1995). Par conséquent, la recherche dans la matière s'est beaucoup concentrée sur un nombre limité de techniques statistiques pour modéliser et estimer la variabilité spatiale des caractéristiques géotechniques.

Parmi ces techniques, on note, l'analyse par régression, la géostatistique ainsi que les techniques basées sur des champs aléatoires. Le concept des statistiques classiques utilisé pour l'analyse par régression n'est pas suffisant car les matériaux en géotechnique ne sont pas totalement indépendants, mais ils sont autocorrélés. L'utilisation des analyses par régression n'est recommandée que pendant les phases préliminaires d'explorations géotechniques, ou quand le nombre d'échantillons est relativement petit et les distances entre échantillons sont larges. Alors que les techniques basées sur les géostatistiques s'avèrent très efficaces, leur application en géotechnique doit se faire avec une grande prudence. Cela est dû principalement au fait que pour les applications en géotechnique, le nombre d'échantillons requis est très petit comparé à celui exigé par les géostatistiques. Par conséquent, cette situation génère des erreurs statistiques qui jouent un rôle important dans l'évaluation de la fiabilité.

L'application de la théorie des champs aléatoires en géotechnique, a démontré son utilité comme outil très efficace pour caractériser la variabilité spatiale des sols. Plusieurs approches ont été développées, les unes plus performantes que les autres. On peut citer la méthode de Monte Carlo s'applique aux problèmes dont on n'a pas à priori une information sur la distribution de probabilité, la technique de la moyenne mobile (MA), le modèle auto-régressive (AR), la méthode de la ligne tournante, la technique de la moyenne subdivisée (LAS) et enfin, la technique basée sur la transformée de Fourier et l'analyse spectrale. Soulignons tout de même l'efficacité et l'attractivité des deux dernières techniques pour leur précision et leur domaine d'application large.

1.2. L'investigation stochastique des milieux hétérogènes

Pendant longtemps, les systèmes dynamiques étaient toujours supposés avoir des propriétés bien définies, ou du moins, les variations de ces propriétés étaient faibles devant les

variations des forces appliquées. Par conséquent, la plupart des travaux introduisaient l'aléa au niveau de l'excitation sismique en considérant la structure et/ou le sol comme homogène. Dans sa thèse, Romo-Organista (1977) a analysé l'interaction sol-structure dans un environnement stochastique (charge sismique). Vanmarcke (1977a et 1977b) a exposé l'étendue de l'applicabilité des outils de la théorie des vibrations aléatoires aux problèmes de dynamique des sols, à savoir, la détermination de la réponse sismique non-linéaire des profils de sol, ainsi que l'estimation du potentiel de liquéfaction. Faccioli (1977) a proposé une méthodologie pour évaluer l'amplification des profils de sols sous excitation stochastique. Gazetas et al. (1982) ont investigué la réponse non-linéaire d'un barrage en terre sous une excitation non stationnaire. Hao (1992) a analysé la réponse sismique d'une plaque rigide à supports multiples où la variabilité spatiale de l'excitation est spécifiée par le modèle de cohérence de Harichandran et Vanmarcke (1986).

Le développement récent de la méthode des éléments finis stochastiques, a offert une nouvelle dimension à l'analyse des systèmes complexes incertains en dynamique. En dynamique des sols, on peut citer les travaux utilisant un modèles 1D. Tian et Jie (1992) ont analysé l'influence des caractéristiques mécaniques aléatoires sur la réponse sismique des sites, Zaiguang et Goucheng (1992) ont déterminé la réponse sismique d'un profil de sol multicouche à caractéristiques mécaniques aléatoires, Suzuki et Asano (1992) se sont intéressés à l'évaluation des fonctions de transferts d'un profil de sol à caractéristiques incertaines.

Rahman et Yeh (1999) ont investigué la variabilité de la réponse sismique des profils de sols par une formulation en utilisant la méthode des éléments finis à paramètres stochastiques. Les auteurs dans leur travail ont introduit l'aléa au niveau de l'excitation sismique ainsi qu'au niveau du module de cisaillement. Ils ont utilisé une formulation probabiliste basée sur la méthode des éléments finis déterministes. Le champ aléatoire du module de cisaillement est simulé en le considérant suivre une loi normale (Gaussienne), cela a limité les analyses pour des coefficients de variations ne dépassant pas les 30%. Ainsi, les simulations de Monte Carlo ont été utilisées pour générer le champ aléatoire (1000 réalisations), et analyser des profils de sols à caractéristiques mécaniques non-linéaires.

D'autre part, Wang et Hao (2002), ont investigué l'effet de la variation aléatoire des propriétés du sol sur l'amplification sismique des sites. Les propriétés du sol considérées sont le module de cisaillement, les coefficients de Poisson et d'amortissement, ainsi que le niveau de la nappe phréatique. La méthode de Rosenblueth (1975 ; 1981) a été utilisée pour le calcul

de la réponse probabiliste dynamique des sites. Une étude paramétrique a été menée pour étudier l'effet des divers paramètres sur l'amplification des ondes sismiques des sites. Les réponses moyennes et maximales à la surface du sol des sites sont estimées. Les résultats obtenus indiquent que les mouvements estimés à la surface libre diffèrent sensiblement si la variation aléatoire des propriétés du sol et du niveau de la nappe phréatique est prise en compte dans l'analyse.

D'autres auteurs ont mené des analyses avec des modèles 2D/3D ; ainsi, Fenton (1990), Fenton et Vanmarcke (1991 ; 1998) ont étudié la variation spatiale du risque de liquéfaction en utilisant la méthode de simulation de Monte Carlo combinée avec un modèle d'éléments finis déterministes. Les auteurs ont analysé le risque de liquéfaction en considérant la variabilité spatiale de l'input sismique ainsi que celle des propriétés du sol. Ils ont mené une analyse 3D pour la simulation de la variabilité spatiale de l'input sismique, et des propriétés du sol, en l'occurrence, le module élastique, la perméabilité, la porosité, le coefficient de Poisson et l'angle de frottement. La perméabilité et le module élastique ont été modélisés en considérant la distribution lognormale. Les autres propriétés du sol sont considérées comme des champs aléatoires bornés, et modélisés par la fonction de Boltzmann sous sa forme exponentielle. Le problème avec cette modélisation est que le coefficient intégrant la largeur de la bande de la fonction de Boltzmann est déterminé par tâtonnement et n'obéit à aucune règle physique, comme mentionné par les auteurs. Malgré que la simulation est en 3D, l'analyse déterministe menée est 1D approximative 3D, car les auteurs ont analysé plusieurs colonnes de sol 1D permettant de donner un nuage de points dans l'espace pour estimer le risque de liquéfaction d'un site donné. De leur côté, Zerva et Harada (1997) ont analysé analytiquement l'effet de la stochasticité des formations géologiques en surface sur la cohérence du mouvement sismique.

1.3 Fonction d'amplification d'un profil de sol non homogène

Les fréquences propres de vibration et la fonction d'amplification d'un profil de sol dépendent essentiellement de ses caractéristiques géométriques et mécaniques. Les caractéristiques mécaniques et, en particulier, le module de cisaillement du sol varient en fonction de la profondeur, à partir de la surface libre. Les expériences ont montré que cette variation est en puissance de la profondeur (Richart, Hall et Woods 1970). Par exemple (Idris et Seed 1968), pour un site uniforme d'argile molle normalement consolidée, le module de cisaillement du sol varie linéairement en fonction de la profondeur z ; pour un site uniforme de sol cohérent, il

varie en racine carrée de z et pour un site d'argile raide surconsolidée, il est constant. La connaissance des fréquences propres de vibration ainsi que la fonction d'amplification d'un site est très importante pour l'étude de l'effet de la variation des conditions géologiques locales du site sur les structures multi appuis.

Des méthodes simplifiées peuvent être utilisées pour l'évaluation de la réponse sismique d'un profil de sol surmontant un substratum rocheux, en se basant sur l'hypothèse de multicouches, chaque couche est homogène et présente des caractéristiques constantes (Idris et Seed 1968). Dans le présent travail, le modèle de sol est considéré ayant des caractéristiques continues en profondeur, ceci évite en général les erreurs de discrétisation lors de l'évaluation des fonctions de transfert. Le profil est alors représenté par une variation de son module de cisaillement en augmentant avec la profondeur en puissance qui dépend du type du sol. Le profil de la figure 1.1, surmontant un substratum ou un demi-espace élastique, de hauteur H . La variation de son module de cisaillement établie par (Hadid et Afra, 2000) pour une vitesse de l'onde de cisaillement non nulle en surface est de la forme suivante:

$$G_s(z_s) = G_0 \left(\frac{z_s}{H} \right)^p, \quad 0 \leq p \leq 1 \quad (1.1)$$

Où G_0 est le module de cisaillement du sol à l'interface couche de sol-substratum rocheux. Le paramètre « p », appelé paramètre de non-homogénéité, peut être obtenu en minimisant, au sens des moindres carrés, l'écart entre les valeurs réelles des vitesses de cisaillement fournies par l'essai sismique des puits (Cross-Hole par exemple) $\hat{V}(z_i)$, et les valeurs théoriques $V(z_i)$, on définit cet écart $E(p)$ par :

$$E(p) = \int_0^H (\text{Log } V(z_i) - \text{Log } \hat{V}(z_i))^2 dz_i$$

Le minimum de $E(p)$ est obtenu sous les deux conditions suivantes :

$$\frac{dE(p)}{dp} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{d^2E(p)}{dp^2} > 0$$

On a $G(z_i) = \rho V^2(z_i)$, donc on obtient $V(z_i) = V_0 \left(\frac{z_i}{H} \right)^{p/2}$

V_0 est la vitesse des ondes de cisaillement du sol à l'interface avec le substratum rocheux.

On remplace $V(z_i)$ dans l'équation de $E(p)$:

$$\text{Alors} \quad E(p) = \int_0^H \left(\text{Log } V_0 + \frac{p}{2} \text{Log} \left(\frac{z_i}{H} \right) - \text{Log } \hat{V}(z_i) \right)^2 dz_i \quad (1.2)$$

$$\frac{dE(p)}{dp} = 0 \Rightarrow \int_0^H 2 \left(\text{Log } V_0 + \frac{p}{2} \text{Log} \left(\frac{z_i}{H} \right) - \text{Log } \hat{V}(z_i) \right) \left(\frac{1}{2} \text{Log} \left(\frac{z_i}{H} \right) \right) dz_i = 0 \quad (1.3)$$

$$\Rightarrow \int_0^H \text{Log} \left(\frac{z_i}{H} \right) \text{Log } V_0 dz_i + \frac{p}{2} \int_0^H \text{Log}^2 \left(\frac{z_i}{H} \right) dz_i - \int_0^H \text{Log} \left(\frac{z_i}{H} \right) \text{Log } \hat{V}(z_i) dz_i = 0$$

On a :

$$\int_0^H \text{Log} \left(\frac{z_i}{H} \right) dz_i = -H \quad \int_0^H \text{Log}^2 \left(\frac{z_i}{H} \right) dz_i = 2H$$

Donc

$$p = \text{Log } V_0 + \frac{1}{H} \int_0^H \text{Log} \left(\frac{z_i}{H} \right) \text{Log } \hat{V}(z_i) dz_i \quad (1.4)$$

Le terme intégral de cette équation peut s'intégrer numériquement pour déterminer le paramètre p .

On a $G(z_i) = \rho V^2(z_i)$, donc on obtient $V(z_i) = V_0 \left(\frac{z_i}{H} \right)^{p/2}$

Pour déterminer le paramètre de non homogénéité « p », nous utilisons la méthode des moindres carrés. Les relations ou fonctions non linéaires doivent être préalablement transformées afin que les principes de l'ajustement linéaire leur soient appliqués.

Ce type de fonction de puissance permet de décrire les relations de variables X et Y dont les taux de variations sont liés par une valeur constante a . Ces fonctions sont de la forme :

$$Y = bX^a$$

où a et b sont les constantes.

Le logarithme d'égalité s'écrit :

$$\text{Log } y = \text{log } b + a \text{ log } x = a \text{ log } x + \text{log } b$$

On pose :

$$Y = \log y ; X = \log x ; B = \log b$$

L'égalité devient : $Y = aX + B$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (1.5)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$

\bar{X} et \bar{Y} les valeurs moyennes

Dans notre exemple nous avons $V(z_i) = V_0 \left(\frac{z_i}{H} \right)^{p/2}$

Le logarithme d'égalité s'écrit :

$$\text{Log} V(z_i) = \text{Log} V_0 + \frac{p}{2} \text{Log} \left(\frac{z_i}{H} \right) \quad (1.6)$$

On pose :

$$\begin{cases} Y = \text{Log} V(z_i) \\ a = \frac{p}{2} \\ X = \text{Log} \left(\frac{z_i}{H} \right) \\ B = \text{Log} V_0 \end{cases}$$

Donc

$$p = 2 \frac{\sum_{i=1}^n \left(\text{Log} \left(\frac{z_i}{H} \right) - \bar{X} \right) \left(\text{Log} V(z_i) - \bar{Y} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\text{Log} \left(\frac{z_i}{H} \right) - \bar{X} \right)^2} \quad (1.7)$$

Où \bar{X} La valeur moyen de $\text{Log}\left(\frac{z_i}{H}\right)$

\bar{Y} La valeur moyen de $\text{Log}V(z_i)$

1.3.1 Equations de mouvement

L'équation de propagation d'onde de cisaillement dans un profil de sol non-homogène peut être obtenue en considérant l'équilibre dynamique d'un élément infinitésimal de dimension latérale infini (figure 1.1)

$$\rho_s \frac{\partial^2 u_s(z_s, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial z_s} \left[G_s(z_s) \frac{\partial u_s(z_s, t)}{\partial z_s} \right] \quad (1.8)$$

avec les conditions aux limites $u_s(H, t) = 0$ et $\tau_s(h, t) = 0$. ρ_s et ρ_r sont les masses volumiques de la couche de sol et du substratum rocheux, respectivement, G_r est le module de cisaillement du substratum rocheux, u_s est le déplacement horizontal de sol, z_s est la variable spatiale verticale et t est la variable temps.

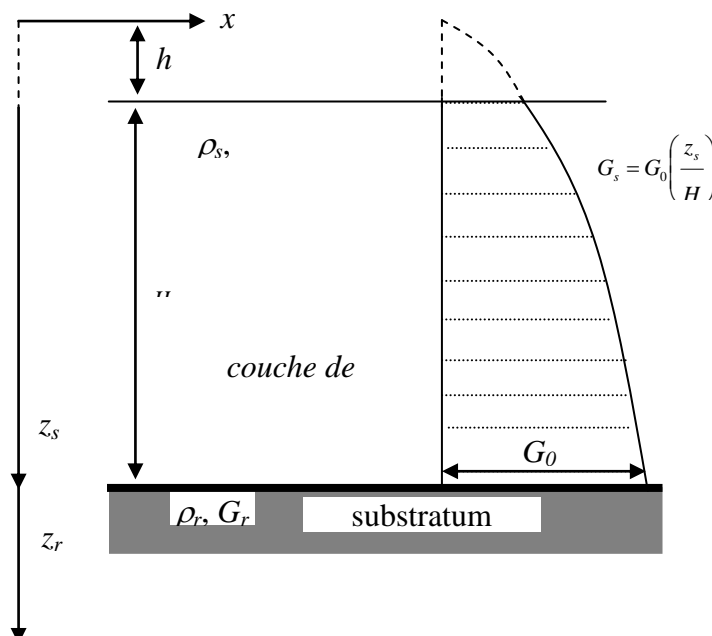


Figure 1.1: Profil de sol non-homogène et distribution de module de cisaillement avec la profondeur

La solution générale de l'équation (1.8) est une série infinie. Cette équation peut être écrite en fonction de la fréquence adimensionnelle, $\tilde{\omega}_0 = \frac{\omega(H-h)}{V_0} = \tilde{\omega}(1-\lambda)$, comme suit (Hadid et Afra, 2000)

$$H^*(\tilde{\omega}_0) = \lambda^{\frac{1-p}{2}} \frac{C_\nu \left(\frac{2}{2-p} \frac{\lambda^{1-\frac{p}{2}}}{1-\lambda} \tilde{\omega}_0 \right)}{C_\nu \left(\frac{2}{2-p} \frac{1}{1-\lambda} \tilde{\omega}_0 \right) + iq C_{\nu+1} \left(\frac{2}{2-p} \frac{1}{1-\lambda} \tilde{\omega}_0 \right)} \quad (1.9)$$

où $q = \frac{\rho_s V_0}{\rho_r V_r}$ est le rapport d'impédance

avec $\lambda = \frac{h}{H}$

et

$$C_\mu(\cdot) = J_\mu(\cdot) Y_{\nu+1} \left(\frac{2}{2-p} \tilde{\omega} \lambda^{1-\frac{p}{2}} \right) - J_{\nu+1} \left(\frac{2}{2-p} \tilde{\omega} \lambda^{1-\frac{p}{2}} \right) Y_\mu(\cdot) \quad (1.10)$$

J_ν et Y_ν sont des fonctions de Bessel de première et deuxième espèce respectivement et d'ordre $\nu = \frac{p-1}{2-p}$

L'équation (1.9) peut être écrite explicitement pour les valeurs de $\lambda \ll 1$ comme suit (Hadid et Afra, 2000)

$$H^*(\tilde{\omega}) = \frac{1}{\Gamma \left(\frac{1}{2-p} \right)} \frac{\left(\frac{1}{2-p} \tilde{\omega} \right)^\nu}{J_\nu \left(\frac{2}{2-p} \tilde{\omega} \right) + iq J_{\nu+1} \left(\frac{2}{2-p} \tilde{\omega} \right)} \quad (1.11)$$

où Γ désigne la fonction Gamma.

On note que l'amortissement peut être pris en compte en substituant G_0 dans les équations précédentes par $G_0(1+2i\beta)$, où β désigne le coefficient d'amortissement. L'amortissement matériel du sol considéré est pris égal à 0.05.

La prise en compte du module de cisaillement non nul au niveau de la surface libre a une influence non négligeable sur la réponse des profils de sols lâches de faible résistance (sables et graviers lâches, argiles molles normalement consolidées, vases, etc.). Cet effet est négligeable pour les autres types de sol tels que les sols cohérents (roches altérées, sables et graviers moyennement compacts, argiles de raideur moyenne) et les sols rigides (sables et graviers compacts ou argiles raides surconsolidées).

1.4 Influence du paramètre de non homogénéité ' p ' sur la fonction de transfert

1.4.1 L'amplitude

Lorsque ' p ' augmente, l'allure du module de cisaillement G en profondeur a la forme parabolique et converge vers une forme linéaire pour $p = 1$ (figure 1.2).

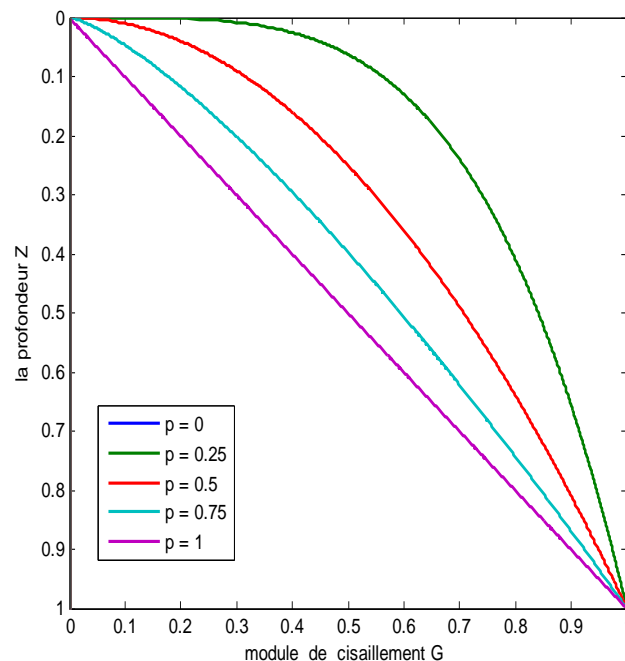


Figure 1.2 : L'allure du module de cisaillement G en profondeur en fonction de ' p '

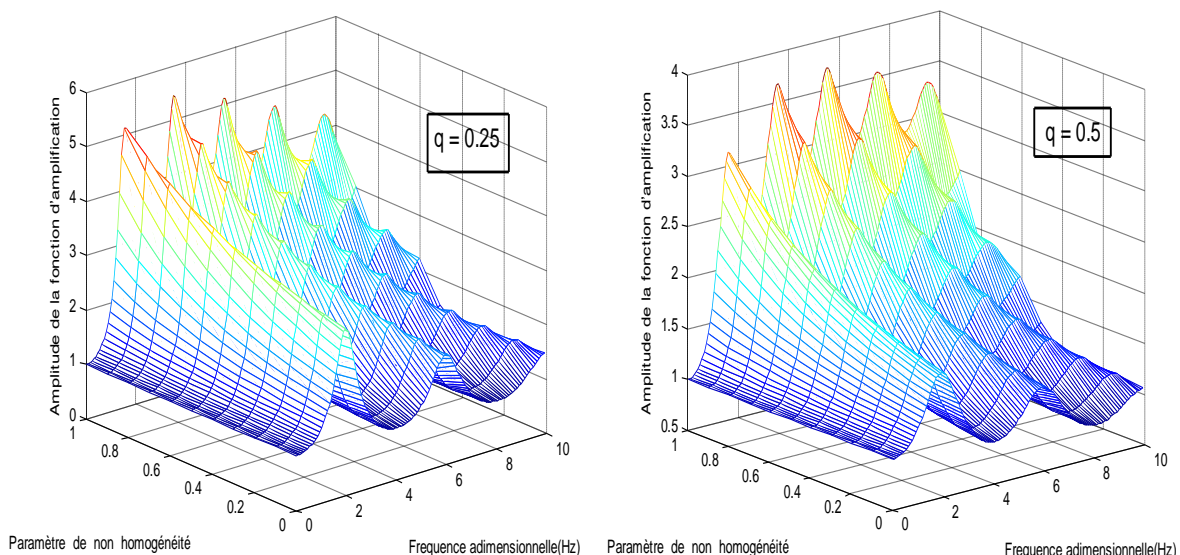
L'amplitude de la fonction d'amplification augmente généralement au niveau de toutes les fréquences lorsque le paramètre d'inhomogénéité ' p ' augmente et plus particulièrement au niveau des fréquences de résonance, (figure 1.3 et 1.4).

En d'autres termes, l'amplification est plus importante pour les sols lâches que pour les sols cohérents et rigides. De plus, lorsque le degré d'inhomogénéité devient important, l'amplitude des modes supérieurs (particulièrement le 2^{eme} et 3^{eme} mode) devient plus importante que celle du mode fondamental et plus particulièrement lorsque le rapport d'impédance ' q ' est important ($q > 0.5$), (figure 1.5 et 1.6). En d'autres termes, l'effet de l'inhomogénéité du sol fait augmenter l'amplitude des oscillations au niveau des modes de vibration et peut même induire à une excitation plus importante des modes supérieurs par rapport au 1^{er} mode.

La flexibilité du substratum rocheux définie par le paramètre adimensionnel ' q ' n'affecte que l'amplitude de la fonction d'amplification (figure 1.5 et 1.6). La dissipation radiative augmente avec l'augmentation du paramètre ' q '

1.4.2 La fonction d'amplification en fonction $\tilde{\omega}$ et p :

La fonction d'amplification donnée par l'équation (1.11) est schématisée sur la figure 1.3 en fonction de la fréquence adimensionnelle $\tilde{\omega}$ et du paramètre de non homogénéité p , pour différents valeurs du rapport d'impédance ($q = 0.25, 0.5, 0.75$).



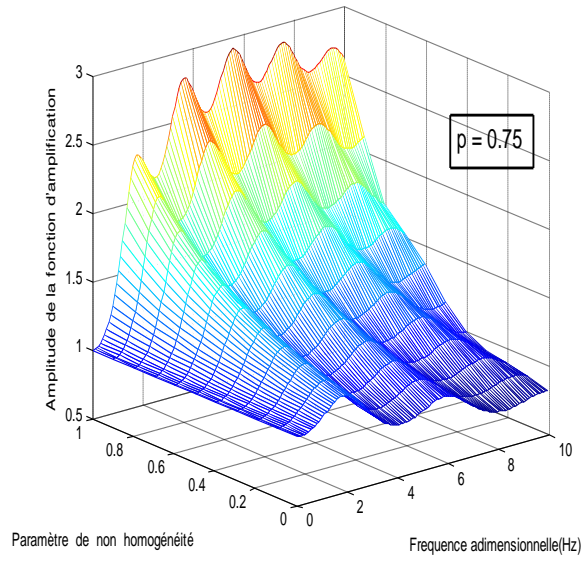
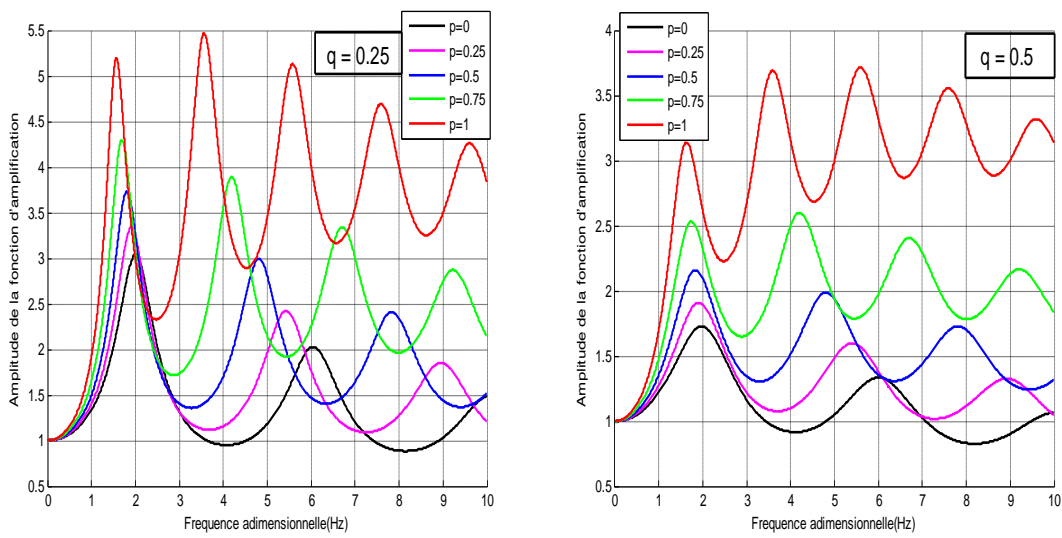


Figure 1.3 : Fonction d'amplification de profil de sol non homogène ($q=0.25, 0.5, 0.75$)



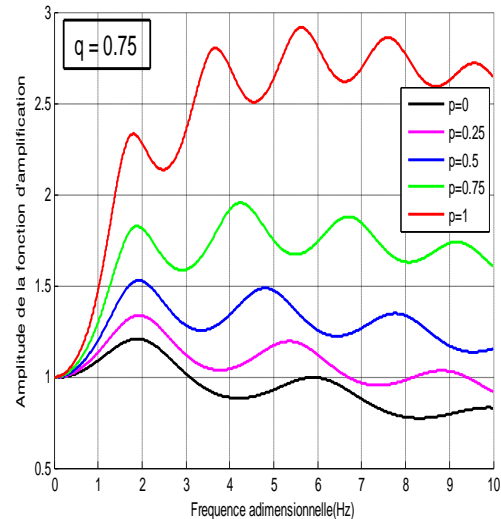


Figure 1.4 : Influence du paramètre de non homogénéité p sur la fonction d'amplification

Lorsque le paramètre ' p ' augmente, les fréquences de vibration diminuent et l'écart entre deux fréquences modales successives diminue (Figure 1.4) et on peut observer en conséquence un nombre de modes plus important sur une certaine plage de fréquences. En d'autres termes, on peut observer que la réduction de la fréquence de résonance est de plus en plus importante en allant vers un mode supérieur. Néanmoins, pour une valeur donnée du paramètre d'inhomogénéité ' p ', cette réduction augmente graduellement à partir du deuxième mode de vibration.

1.4.3 La fonction d'amplification en fonction $\tilde{\omega}$ et q :

La fonction d'amplification donnée par l'équation (1.11) est schématisée sur la figure 1.5 et figure 1.6 en fonction de la fréquence adimensionnelle $\tilde{\omega}$ et du rapport d'impédance q , pour différents types de dépôts de sol, ayant des paramètres de non homogénéité différents ($p=0,0.25,0.5,0.75$ et 1).

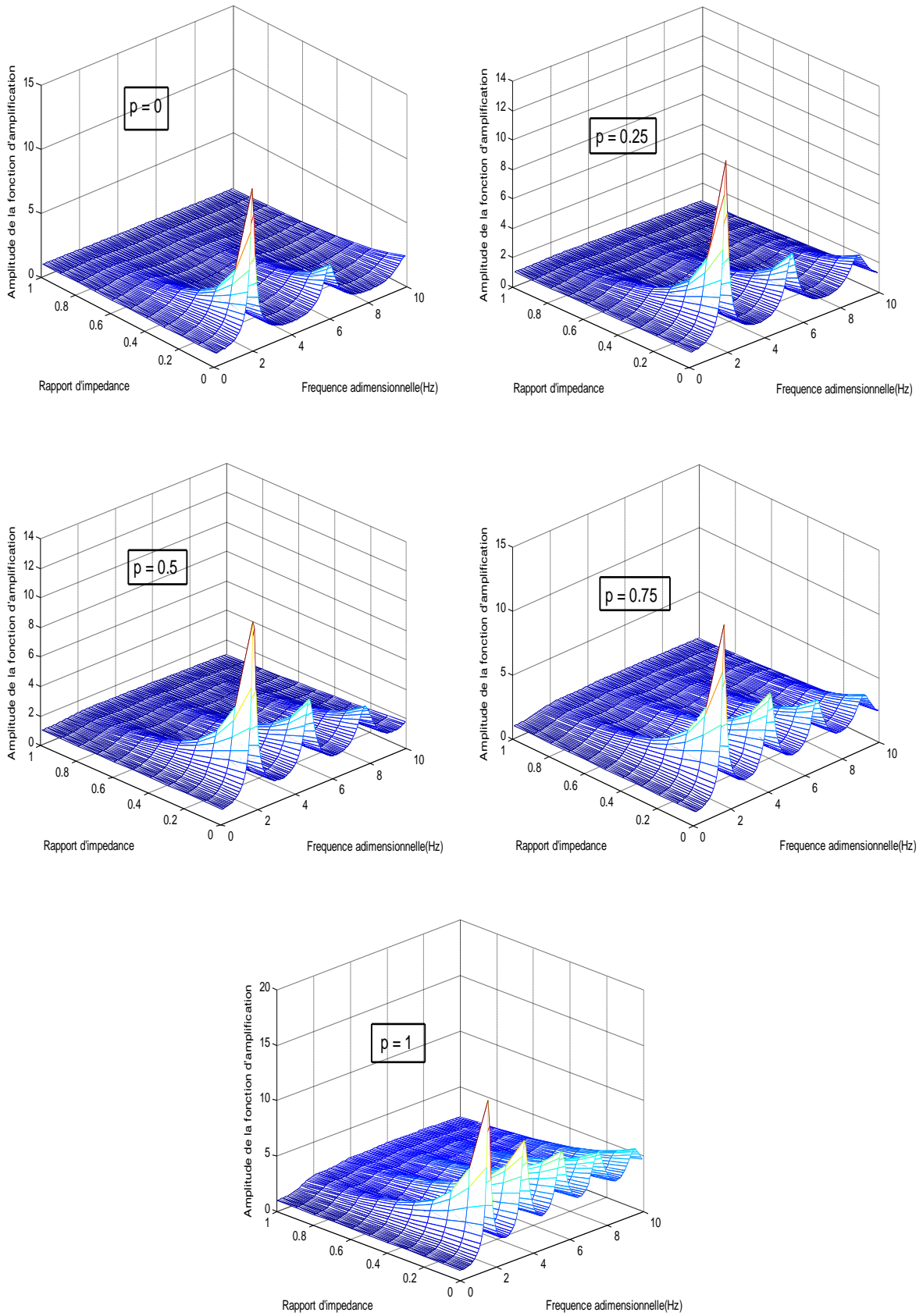


Figure 1.5 : Fonction d'amplification de profil de sol non homogène ($p=0,0.25, 0.5, 0.75$ et 1)

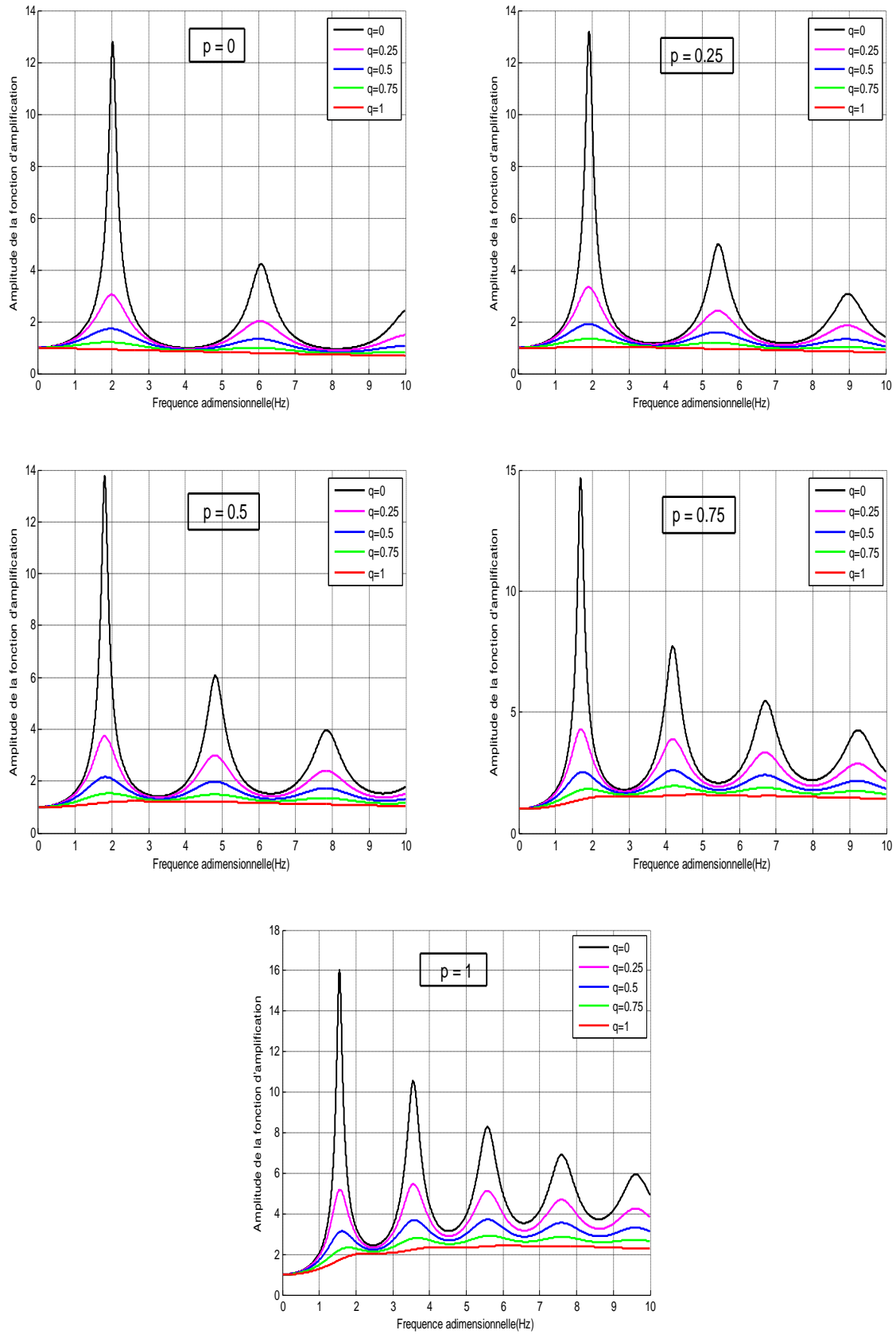


Figure 1.6 : Influence du rapport d'impédance q sur la fonction d'amplification

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une expression analytique permettant d'estimer les fonctions d'amplification d'un profil de sol non-homogène, dont les caractéristiques mécaniques varient en fonction de la profondeur et surmontant un demi-espace est déterminée. L'analyse des résultats obtenus fait ressortir les conclusions suivantes :

La variation du module de cisaillement en profondeur définie par un paramètre adimensionnel p affecte le contenu fréquentiel et l'amplitude de la fonction d'amplification. L'amplification est plus importante pour les sols lâches que pour les sols cohérents et rigides.

La flexibilité du substratum rocheux définie par le paramètre adimensionnel q n'affecte que l'amplitude de la fonction d'amplification. La dissipation radiative augmente avec l'augmentation de q .

La prise en compte du module de cisaillement non nul au niveau de la surface libre a une influence non négligeable sur la réponse des profils de sol lâches de faible résistance (sables et graviers lâches, argiles molles normalement consolidées, vases, etc.). Cet effet est négligeable pour les autres types de sol tels que les sols cohérents (roches altérées, sables et graviers moyennement compacts, argiles de raideur moyenne) et les sols rigides (sables et graviers compacts ou argiles raides surconsolidées).

Chapitre 2

**Classification des sites de la ville
d'Alger et détermination des
paramètres de non-homogénéité p**

2.1 Introduction

Dans ce contexte, le problème majeur à résoudre par les ingénieurs et les géotechniciens dans les régions de forte sismicité est d'évaluer la réponse sismique ou la réponse spectrale d'un site constitué d'un profil de sol dont les caractéristiques mécaniques et physiques varient avec la profondeur.

Ainsi, ce chapitre est destiné à mettre en exergue l'importance du paramètre de non homogénéité de sol considérée dans l'analyse de réponse de structure et par conséquent dans la classification des sites. Cette importance est illustrée pour déterminer les paramètres de non homogénéité de 33 sites localisés dans la ville d'Alger. Les vitesses de cisaillement moyennes de ces sites seront calculées selon trois modèles définis par la profondeur de profil de sol.

2.2 La géologie

2.2.1 Généralités

Le pays comprend quatre grands domaines du Nord au Sud : l'Atlas Tellien, constitué de reliefs escarpés et de plaines littorales dont les plus riches d'Algérie sont la Mitidja au centre, le Chelif à l'Ouest et le Seybouse à l'Est ; l'Atlas saharien forme une longue suite de reliefs orientés NE-SO s'étendant du Maroc à la Tunisie ; le Sahara est un désert formé de grandes étendues de dunes, de plaines caillouteuse et parsemé d'oasis.

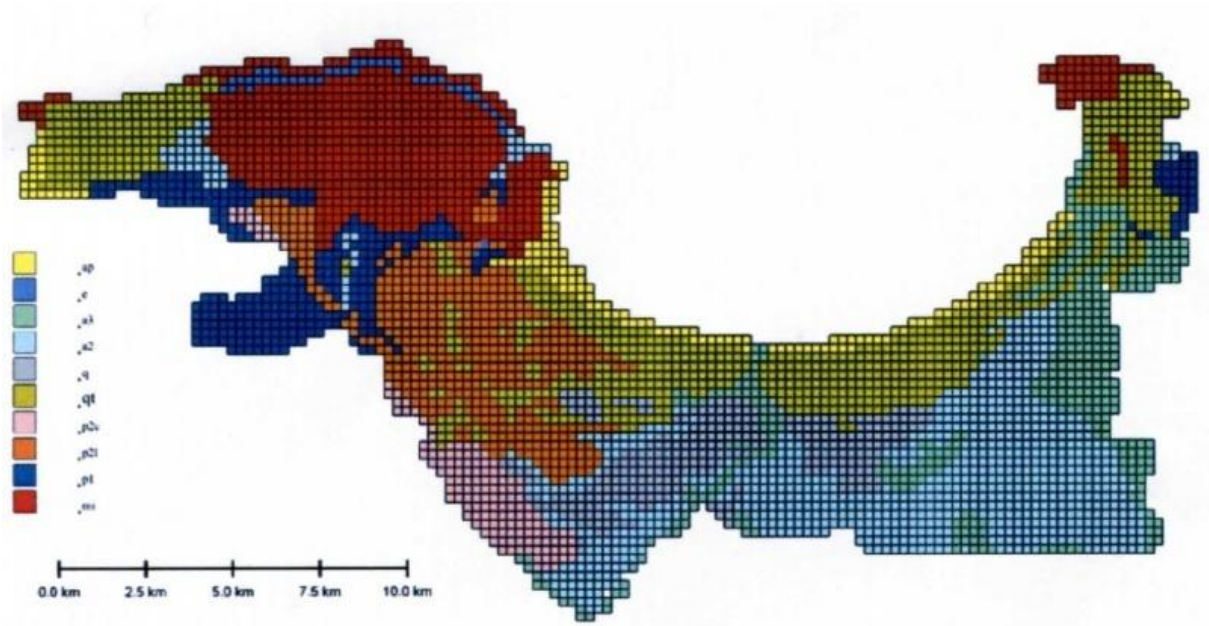
L'Algérie est divisée en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille sud-atlasique : Le Nord du pays porte l'empreinte de la tectonique alpine tandis que le Sud formé par la plate-forme saharienne est relativement stable et la tectonique y est moins prononcée.

2.2.2 L'état géologique local de la zone algéroise

L'histoire géologique des bassins sédimentaires algériens s'inscrit dans le processus de géodynamique globale de la tectonique des plaques qui a structuré l'Algérie en deux domaines: au Nord, l'Algérie alpine ; au Sud, la plate-forme saharienne. L'algérois est intégré dans l'Algérie alpine et est essentiellement structuré par la plaine de la Mitidja qui est un bassin de type intra montagneux, bordé au sud par le domaine des nappes formant l'Atlas Tellien. La série sédimentaire du bassin de la Mitidja s'étend du Jurassique au Miocène. Au pliocène, la mer y dépose des marnes bleues à intercalations gréseuses d'une épaisseur pouvant atteindre 1000 m. À l'est la Mitidja est bordée par des affleurements de socle de type granitoïde apparaissant à Boumerdès et le long de la faille de Thénia.

Le remplissage sédimentaire quaternaire de la Mitidja représente localement une épaisseur de 120 m. Proche des côtes se sont des sables rouges du Pliocène supérieur très compactes qui affleurent et recouvrent les marnes. C'est sur ce type de terrain que s'est construit notamment la ville de Boumerdès.

La figure 2.1 montre la classification de la géologie de substratum.



ap : Dépôts de plage et de dune.

qt : Terrasse marine.

e : Dépôt en pente.

p2c : Couches hastienne.

a3 : Dépôt alluvial (sable).

p2L : Grés calcaires.

a2 : Dépôt alluvial (argile).

p1 : Couches plaisanciennes.

q : Dépôt alluvial ancien.

mi : Roches métamorphiques, couches miocènes.

Figure 2.1 : Modèle du sol sous la terre (Etude JICA-CGS)

2.2.3 Propriétés de la géologie locale

Le tableau suivant qui résumé les résultats des données qui a fourni par LNHC (laboratoire nationale d'habitant et construction) de plusieurs essais in situ pour évalué la

vitesse de cisaillement V_s et au laboratoire pour estimées les densités de la géologie technologique.

Le tableau suivant qui représente les donnes de propriétés de la géologie d'ingénieur.

Tableau 2.1 : Propriétés de la géologie d'ingénieur (Etude JICA-CGS)

symbole	Géologie sous la terre	Vitesse moyen V_s (m/s)	Densité ρ (g/cm^3)	$G_0 = \rho V^2$ Module de cisaillement moyen (Mpa)
ap	Dépôts de plage et de dune	275	1.8	136
a3	Dépôts alluvial (sable)	240	1.8	104
a2	Dépôts alluvial (argile)	270	1.74	127
q	Dépôts alluvial ancien	300	1.81	163
qt	Terrasse marine	330	1.9	207
p2l et p2c	Grés calcaires et Couches hastienne	310	1.92	185

2.3 Classification des sites selon RPA99/2003

2.3.1 Classification selon RPA99/2003

La classification de règlement parasismique algérien (RPA2003) qui se base sur la classification des sites selon leurs vitesses d'ondes de cisaillement sur une profondeur de 20 m. Le RPA classe les sites selon le tableau suivant

Tableau 2.2 : Classification des sites selon RPA (99/2003)

Catégorie	Description	V_s (m/s)
S₁	Rocheux	≥ 800
S₂	Ferme	≥ 400 et < 800
S₃	Meuble	≥ 200 et < 400
S₄	Très Meuble ou Présence de 3m au moins d'argile molle	≥ 100 et < 200

2.3.2 Définition des sites

Plusieurs sites dans la région d'Alger sont considérés dans cette étude. Le choix a été fait sur trente- trois profils (33) disponibles définissant toute la région d'Alger (Rapport LNHC).

La réponse sismique d'un site dépend très fortement de la variation de ces propriétés mécaniques et physiques en fonction de la profondeur de sol. Pour mettre en évidence l'importance de la profondeur de sol dans les calculs des fonctions de densité spectrale de puissance, nous avons considéré trois modèle de profile de sol avec des profondeurs différentes, profile de sol avec une profondeur égale à 20m, 30 m et l'autre avec profile réelle pour compare les résultats.

La classification des 33 sites selon l'RPA avec 20 ,30 m et profil réelle est représentée dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 : La classification des 33 sites selon l'RPA avec 20 et 30 m et profil réel

Profil	Lieu	Vs (m/s)			Classification			Densité ρ (g/cm ³)		Formation
		RPA(20m)	RPA(30m)	Pr totale	(20m)	(30m)	Pr Total	ρ_s	ρ_r	
P1	Ain benian	443	420	419	S ₂	S ₂	S ₂	1.85	2.11	ap +p12 +p1
P2	Ain benian	475	586	642	S ₂	S ₂	S ₂	1.95	#	p2c
P3	Bab el oued	681	796	745	S ₂	S ₂	S ₂	#	#	a3+e+mi
P4	Oued koriche	345	390	290	S ₃	S ₃	S ₃	#	#	#
P5	Bouzareah	571	664	641	S ₂	S ₂	S ₂	1.94	#	a3
P6	Bouzareah	442	520	356	S ₂	S ₂	S ₃	#	#	a3+mi
P7	Beni messous	289	325	319	S ₃	S ₃	S ₃	1.84	2	a3+p1
P8	Ben aknoun	617	618	618	S ₂	S ₂	S ₂	2.15	2.26	p2L+p1
P9	Alger center	336	381	512	S ₃	S ₃	S ₂	1.95	2.11	a3+p2c +p1
P10	Belouizdad	448	517	549	S ₂	S ₂	S ₂	1.95	2.1	q+p2c +p1

Chapitre 2

P11	Hussein dey	624	622	605	S ₂	S ₂	S ₂	#	2	qt+p2c +p2L +p1
P12	Bir-mourad-raïs	392	418	584	S ₃	S ₂	S ₂	1.94	2.2	q+p2c +p2L
P13	Bir khadem	439	458	400	S ₂	S ₂	S ₂	#	#	p2L
P14	Gue de constantine	304	357	310	S ₃	S ₃	S ₃	2	2.22	p2L
P15	Gue de constantine	250	315	367	S ₃	S ₃	S ₃	2.06	2.2	ap+ p2c+p2L
P16	Bachdjarah	229	232	230	S ₃	S ₃	S ₃	1.87	2.1	q+ p2c+p2L
P17	Bourouba	222	268	422	S ₃	S ₃	S ₂	1.97	2.19	ap+ p2c+p2L
P18	Dar-el-beida	277	313	450	S ₃	S ₃	S ₂	1.99	2.19	a2+ p2c +p2L
P19	Mohamadia	338	360	400	S ₃	S ₃	S ₂	1.98	2.26	p2c+p1
P20	Mohamadia	599	589	572	S ₂	S ₂	S ₂	1.74	2.17	qt+ p2c+p2L+p1
P21	Bab ezzouar	243	284	262	S ₃	S ₃	S ₃	1.96	2.14	a2+p2L
P22	Bab ezzouar	201	226	357	S ₃	S ₃	S ₃	#	#	#
P23	Dar-el-beida	264	341	452	S ₃	S ₃	S ₂	1.98	2.11	a2+p2c+p2L
P24	Dar-el-beida	274	316	363	S ₃	S ₃	S ₃	#	#	#
P25	Bordj el bahri	332	362	355	S ₃	S ₃	S ₃	1.98	2.24	qt+p1
P26	Bordj-el-kiffan	393	426	427	S ₃	S ₂	S ₂	1.97	2.05	a3+ap+ p2c+mi
P27	El mouhamadia	488	488	606	S ₂	S ₂	S ₂	1.7	2.1	sable+argile+marne sableuse
P28	El mouhamadia	502	530	599	S ₂	S ₂	S ₂	1.6	2.1	sable+argile+marne gris
P29	Rouiba	463	479	489	S ₂	S ₂	S ₂	1.7	1.83	sable+graviers+argile sableuses et marneuses
P30	Rouiba	498	499	514	S ₂	S ₂	S ₂	1.68	#	sable+graviers+argile sableuses et marneuses
P31	Rouiba	535	585	598	S ₂	S ₂	S ₂	1.84	#	sable+graviers+argile sableuses et marneuses
P32	Rouiba	404	473	498	S ₂	S ₂	S ₂	1.82	#	sable+graviers+argile marneuses
P33	Port	554	580	564	S ₂	S ₂	S ₂	1.91	1.95	sable de plage+marne dure

ap : Dépôts de plage et de dune.	qt : Terrasse marine.
e : Dépôt en pente.	p2c : Couches hastienne.
a3 : Dépôt alluvial (sable).	p2L : Grés calcaires.
a2 : Dépôt alluvial (argile).	p1 : Couches plaisanciennes.
q : Dépôt alluvial ancien.	mi : Roches métamorphiques,couches miocènes.

2.4 Détermination de paramètre de non homogénéité « p » pour chaque site

Dans le présent travail, le modèle de sol est considéré ayant des caractéristiques continues en profondeur, ceci évite en général les erreurs de discrétisation lors de l'évaluation des fonctions de densité spectrale de puissance. Le profil est alors représenté par une variation de son module de cisaillement en augmentant avec la profondeur en puissance qui dépend du type du sol. Le profil de la figure 1.1, surmontant un substratum ou un demi-espace élastique, de hauteur H . La variation de son module de cisaillement établie par (Hadid et Afra 2000) pour une vitesse de l'onde de cisaillement non nulle en surface est de la forme suivante :

$$G_s(z_s) = G_0 \left(\frac{z_s}{H} \right)^p, \quad 0 \leq p \leq 1 \quad (2.1)$$

✓ Par la méthode des moindres carrés

Après de détermination de paramètre de non homogénéité « p » pour chaque site de la ville d'Alger par la méthode des moindres carrés au chapitre 1 par l'équation (1.7).

On obtient la résultat dans le tableau suivant :

Tableau 2.4 : le paramètre de non homogénéité « p » par la méthode des moindres

	H=20m	H=30m	Profil réel
P de S2	0.41	0.35	0.44
P de S3	0.45	0.58	0.57

✓ Par les droites de régression non linéaire (exemple de H=20 m) $y = bx^a$

La régression permet d'étudier l'association entre deux variables quantitatives, pour décrire le lien entre deux variables x et y , la régression consiste à décrire au mieux la façon dont y varie en fonction de x , à décrire la distribution de y pour chaque valeur de x .

Il existe un lien entre x et y si la distribution varie selon les valeurs de x , et au contraire, il n'existe pas de lien entre x et y si la distribution de y reste la même quelque soit la valeur de x .

La distribution de y lorsque x est fixé s'appelle la Distribution conditionnelle de y par rapport à x . Il y a autant de distribution conditionnelle que de valeur de x . Par simplification, on caractérise ces distributions par leurs moyennes.

La figure suivante qui représente les profile des sites d'Alger avec les droites de régression de chaque site.

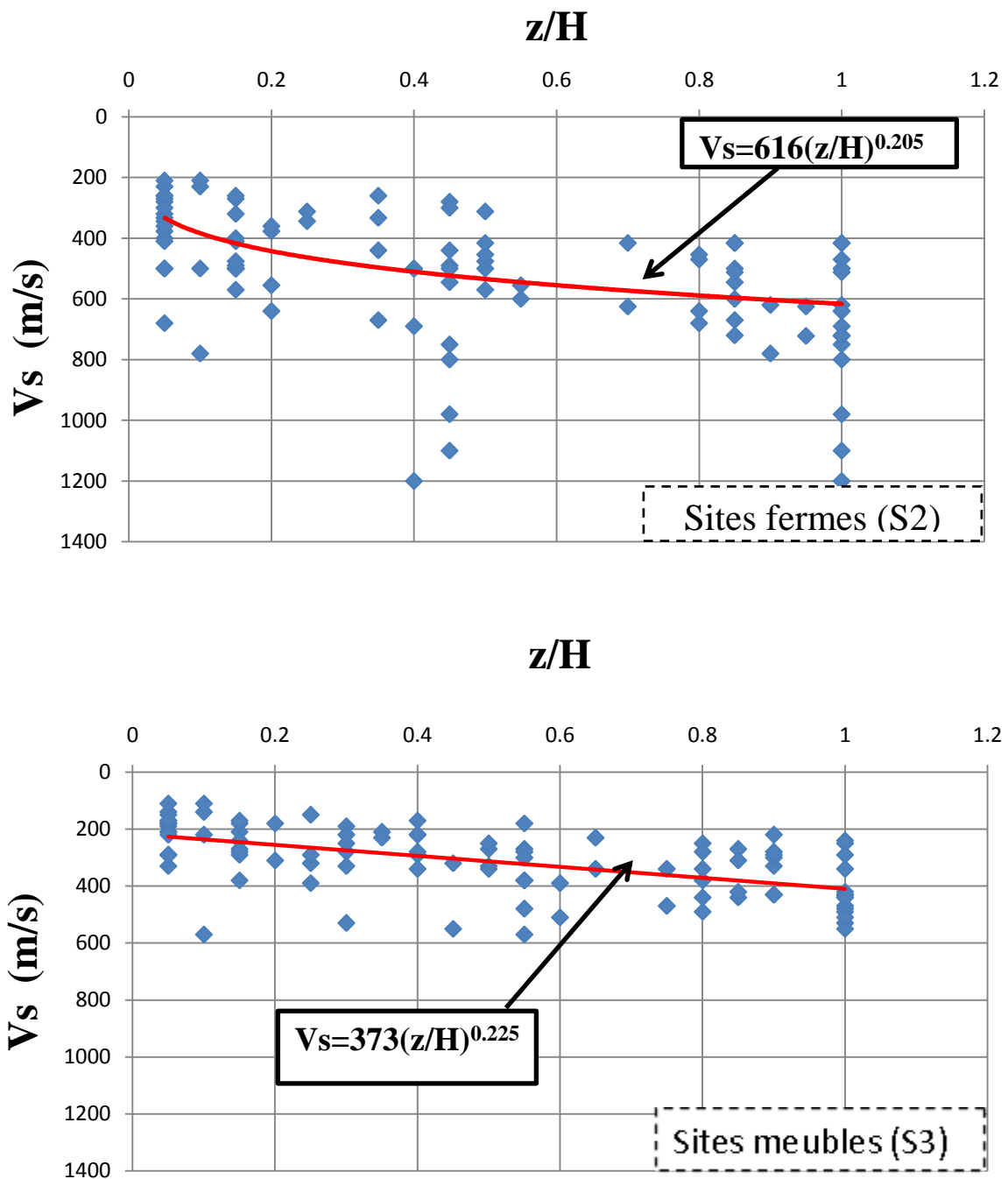


Figure 2.2 : les droites de régression de vitesse des ondes S en fonction de (z/H) pour $H=20$ m

✓ **Site S2**

La droite de régression permettant de mieux représenter les points est :

$$V_s = 616(z/H)^{0.205} \quad (2.2)$$

Avec
$$V(z_i) = V_0 \left(\frac{z_i}{H} \right)^{p/2} \quad (2.3)$$

Par coïncidence l'équation (2.2) et (2.3) et on obtient :

$$V_0 = 616 \text{ m/s}$$

$$\frac{p}{2} = 0.205$$

Donc

$$p_{moyS2} = 0.41$$

✓ **Site S3**

La droite de régression permettant de mieux représenter les points est :

$$V_s = 373(z/H)^{0.225} \quad (2.4)$$

Avec
$$V(z_i) = V_0 \left(\frac{z_i}{H} \right)^{p/2} \quad (2.5)$$

Par coïncidence l'équation (2.4) et (2.5) et on obtient :

$$V_0 = 373 \text{ m/s}$$

$$\frac{p}{2} = 0.225$$

Donc

$$p_{moyS3} = 0.45$$

Des exemples typiques des valeurs de p ont été rapportés dans la littérature (Idris 1968, Hadid 2000 et Afra 2002) :

zéro pour des dépôts d'argiles surconsolidés très raides (fermes), proche de l'unité pour les mêmes dépôts quand ils sont normalement consolidés et varie de 0.45 à 0.6 pour les sols non cohérents (meubles).

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une formulation pour déterminer le paramètre de non homogénéité « p » pour chaque site de la ville d'Alger, nous utilisons la méthode des moindres carrés et la méthode par la droite de régression. Les relations ou fonctions non linéaires doivent être préalablement transformées afin que les principes de l'ajustement linéaire leur soient appliqués. Il ressort des résultats obtenus que le paramètre de non homogénéité p plus importante pour les sols lâches (site S3 meubles) que pour les sols cohérents et rigides (site S2 ferme).

Chapitre 3

**Simulation des propriétés des sols et
l'Analyse probabiliste de la fonction
DSP**

3.1 Introduction

Il est bien connu que les propriétés du sol et les paramètres de non homogénéité p du sol sont fondamentalement variables d'un site à l'autre. Cela est dû principalement à des processus variés et complexes qui ont des effets directs sur la formation des dépôts de sol. Parmi ces effets, on note la sédimentation, les effets climatiques et d'érosion, la topographie, les failles sismiques (déformations tectoniques), etc. De ce fait, la variabilité des sols est une caractéristique naturelle, et a trouvé un grand intérêt de recherche dans plusieurs disciplines d'ingénierie telles que : la géotechnique, la géophysique, le génie minier et récemment le génie parasismique.

Dans ce chapitre on va présenter une formulation stochastique pour la simulation des propriétés du sol non bornées et bornées, Ainsi, on associe à la variable aléatoire non bornée la loi de distribution lognormale (vitesse de cisaillement), et à la variable aléatoire bornée la loi de distribution beta (paramètre de non homogénéité p).

3.2 Simulation des propriétés du sol

Nous avons présenté une approche pour simuler des variables suivant une loi dont la forme varie avec ses paramètres. L'idée développée utilise un algorithme d'acceptation dont la loi candidate est sélectionnée parmi d'autres lois choisies a priori. L'approche est ensuite appliquée au cas particulier de la génération de variables aléatoires normales à support positif, et les intervalles sur lesquelles elles sont le plus performantes en termes de taux d'acceptation ont été déterminés. Des simulations ont illustré le fait que la méthode fonctionne bien et rapidement dans toutes les situations possibles.

3.2.1 Variabilité des propriétés du sol non-bornées (vitesse de cisaillement)

Les propriétés du sol non bornés telles que le module élastique E , le vitesse de cisaillement V , la perméabilité k , etc., sont supposées être distribuées d'une manière lognormale. Ce choix est motivé par le fait que ces propriétés sont des paramètres positifs, et que la distribution lognormale permet d'analyser leur grande variabilité, avec des paramètres $V_{0,\ln V}$ et $\sigma_{\ln V}$, sont désignent respectivement la moyenne et l'écart type du vitesse de cisaillement, de la distribution normale associée $V_{0,V}$, σ_V .

avec

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma^2_{\ln V_s} = \ln \left(1 + \frac{\sigma^2_{V_s}}{V_{0,V_s}^2} \right) \\ V_{0,\ln V_s} = \ln(V_{0,V_s}) - \frac{1}{2} \sigma^2_{\ln V_s} \end{array} \right. \quad \text{où} \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma^2_{\ln V_s} = \ln(1 + CV_{V_s}^2) \\ V_{0,\ln V_s} = \ln(V_{0,V_s}) - \frac{1}{2} \sigma^2_{\ln V_s} \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Où $CV_{V_s} = \sigma_{V_s}/V_{0,V_s}$ désigne le coefficient de variation.

La vitesse des ondes de cisaillement et la masse volumique du substratum sont respectivement : $V_r = 630 \text{ m/s}$ et $\rho_r = 2.09 \text{ g/cm}^3$.

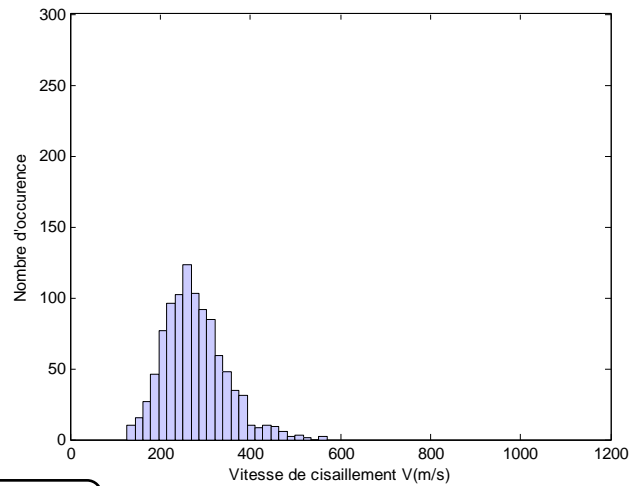
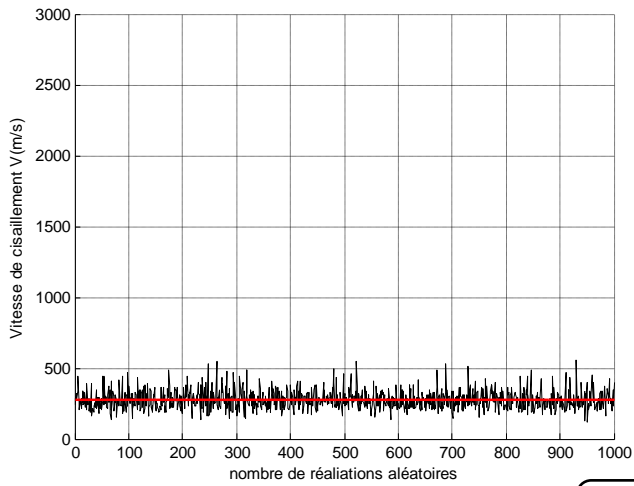
Les valeurs moyennes du vitesse de cisaillement V_s , sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 3.1 : Les valeurs moyennes du vitesse de cisaillement V_s .

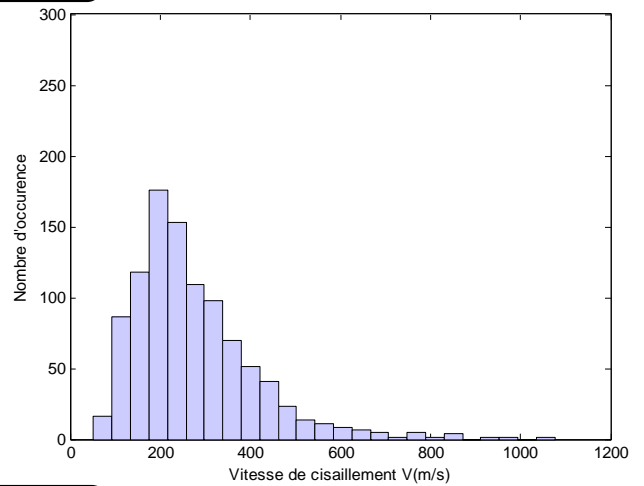
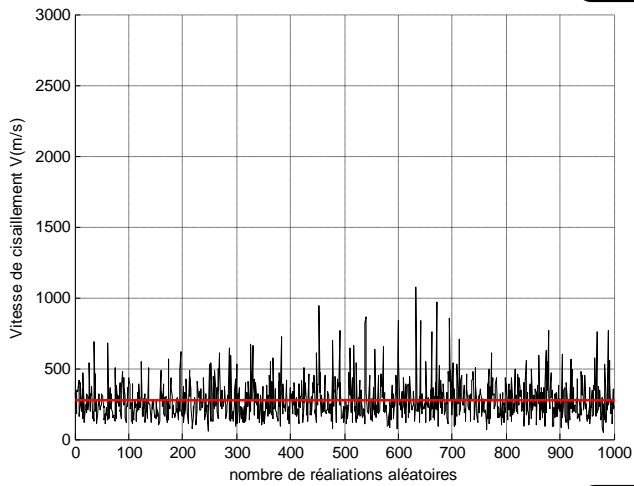
symbole	Géologie sous la terre	Vitesse moyen V_0 (m/s)
ap	Dépôts de plage et de dune	275
a3	Dépôts alluvial (sable)	240
a2	Dépôts alluvial (argile)	270
q	Dépôts alluvial ancien	300
qt	Terrasse marine	330
p2l et p2c	Grés calcaires et Couches hastienne	310

Il est montré dans les figures 3.1(a) à 3.6(a) les réalisations de la vitesse de cisaillement et les figures 3.1(b) à 3.6(b) les réalisations typiques des histogrammes du vitesse de cisaillement de géologie sous la terre pour différentes valeurs de CV_{V_s} .

$CV_{V_s} = 0.25$
 $V_0 = 275 \text{ m/s}$



$CV_{V_s} = 0.5$
 $V_0 = 275 \text{ m/s}$



$CV_{V_s} = 1$
 $V_0 = 275 \text{ m/s}$

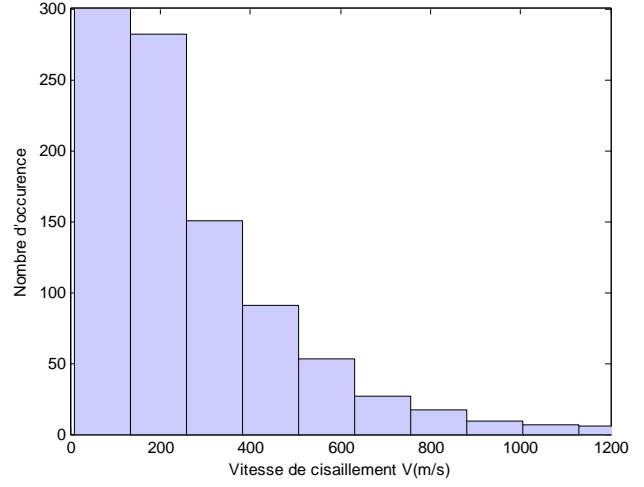
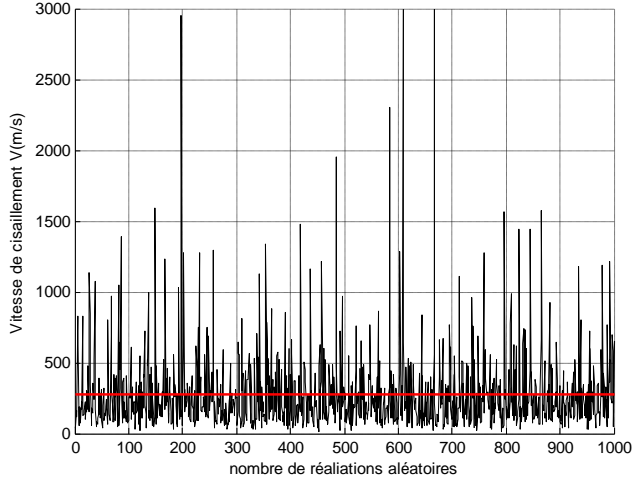
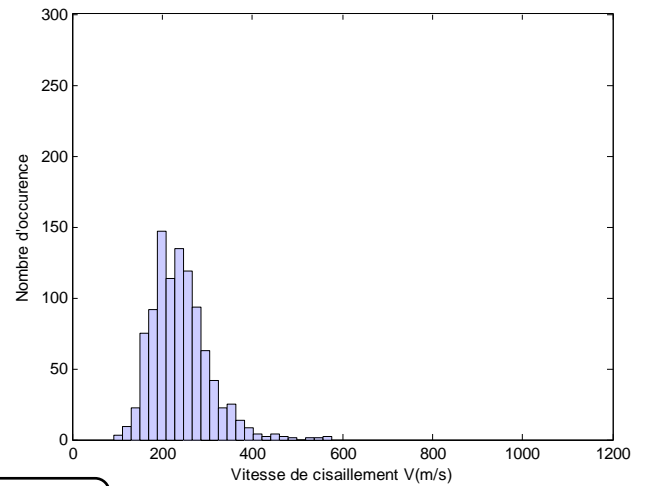
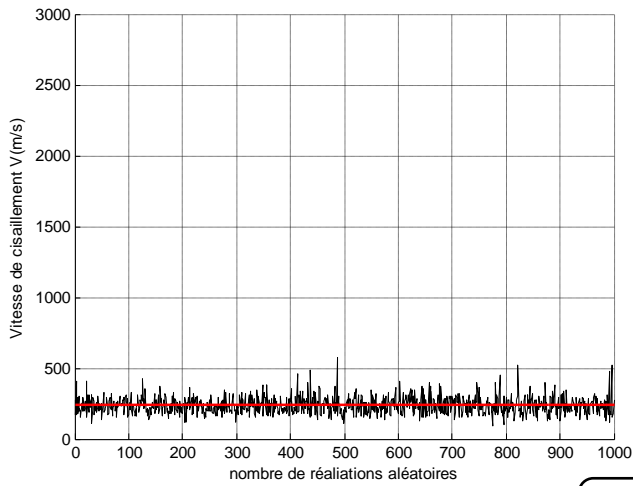


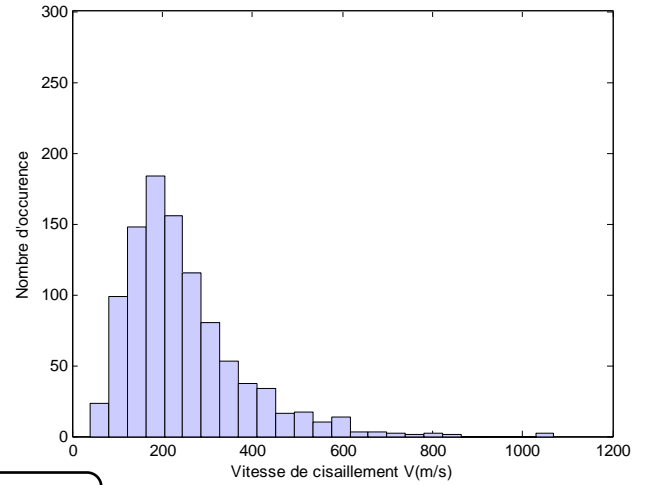
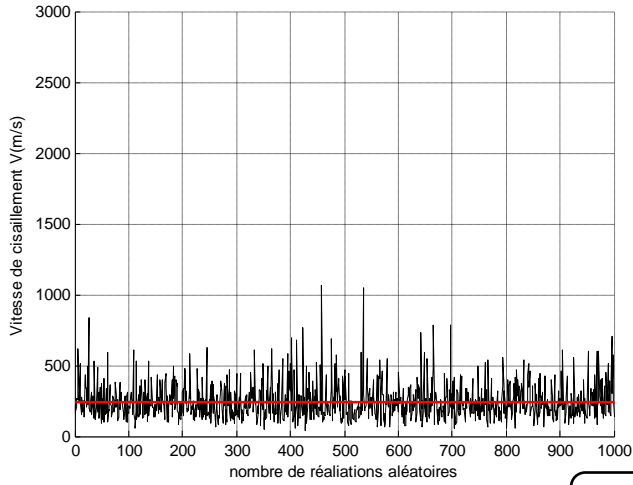
Figure 3.1(a) : Réalisations de la vitesse de cisaillement de dépôts de plage et de dune pour différentes valeurs de CV_{V_s}

Figure 3.1(b) : Réalisation typique des histogrammes de la vitesse de cisaillement de dépôts de plage et de dune

$CV_{V_s} = 0.25$
 $V_0 = 240 \text{ m/s}$



$CV_{V_s} = 0.5$
 $V_0 = 240 \text{ m/s}$



$CV_{V_s} = 1$
 $V_0 = 240 \text{ m/s}$

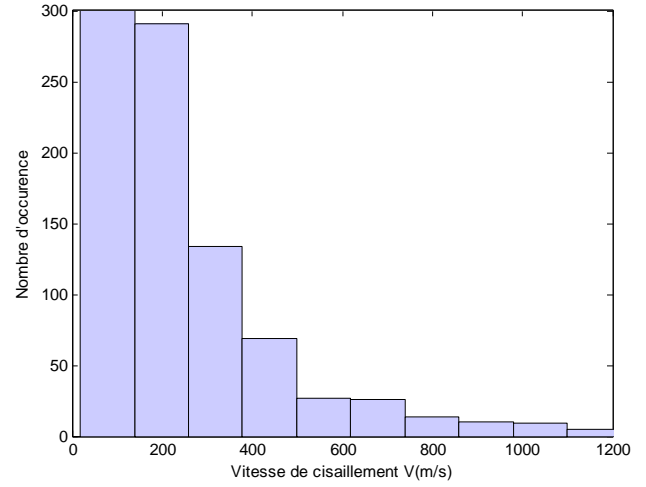
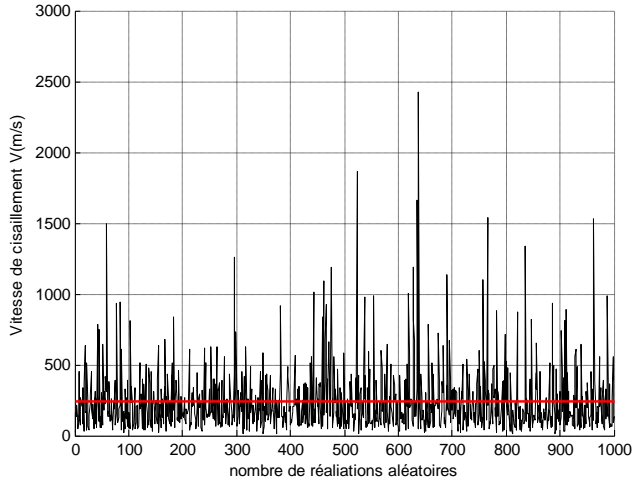
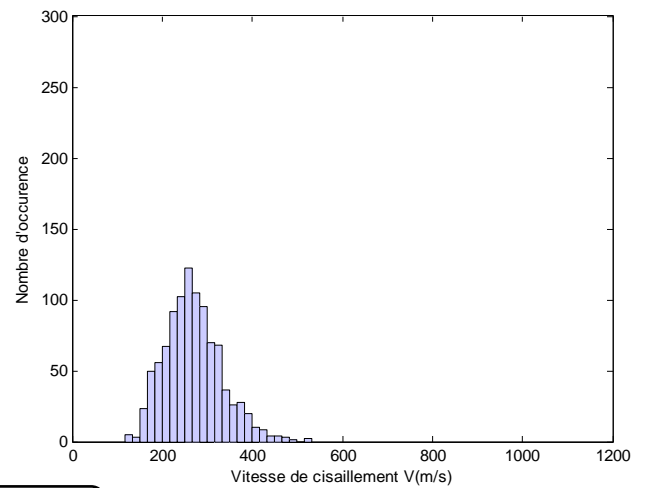
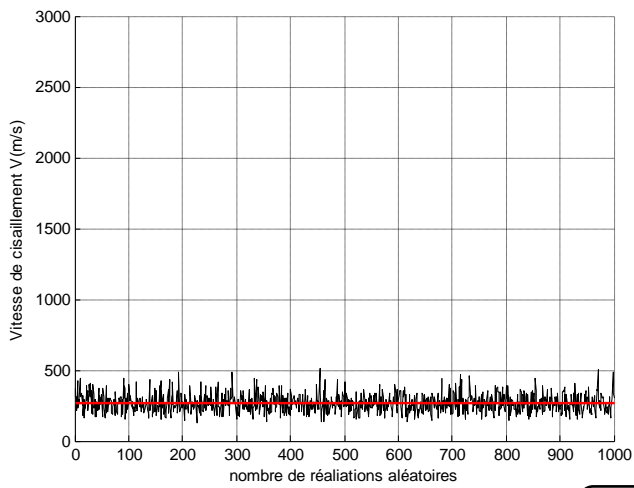


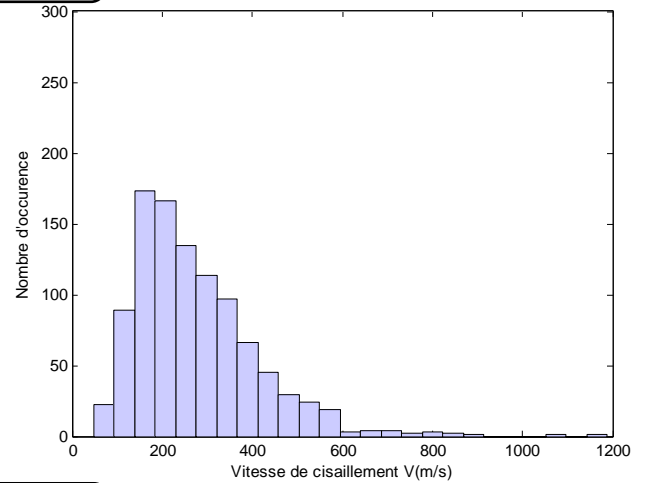
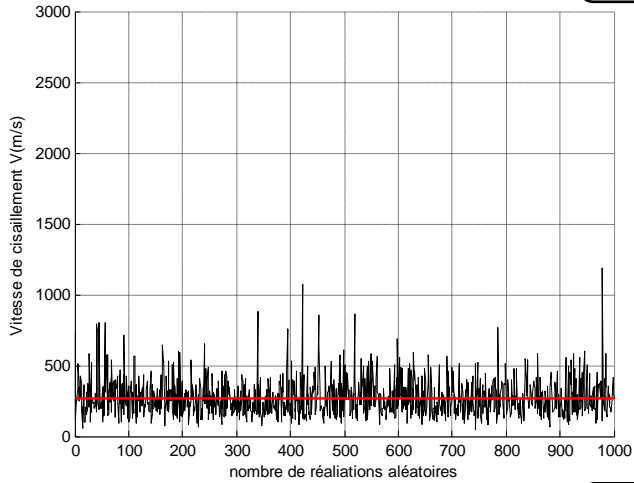
Figure 3.2(a) : Réalisations de la vitesse de cisaillement de dépôts alluvial (sable) pour différentes valeurs de CV_{V_s}

Figure 3.2(b) : Réalisation typique des histogrammes de la vitesse de cisaillement de dépôts alluvial (sable)

$CV_{V_s} = 0.25$
 $V_0 = 270 \text{ m/s}$



$CV_{V_s} = 0.5$
 $V_0 = 270 \text{ m/s}$



$CV_{V_s} = 1$
 $V_0 = 270 \text{ m/s}$

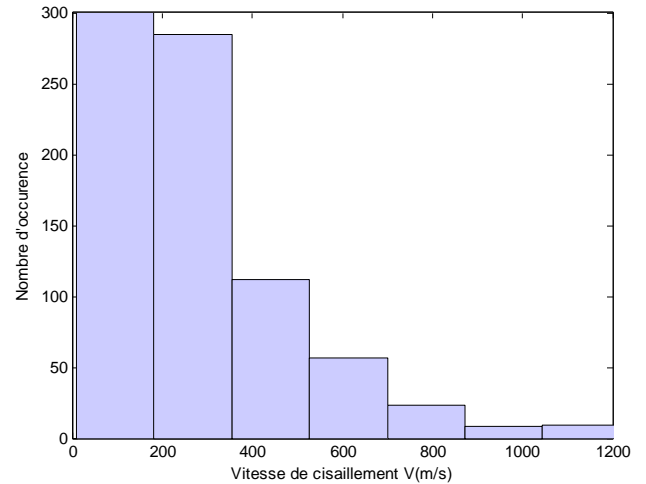
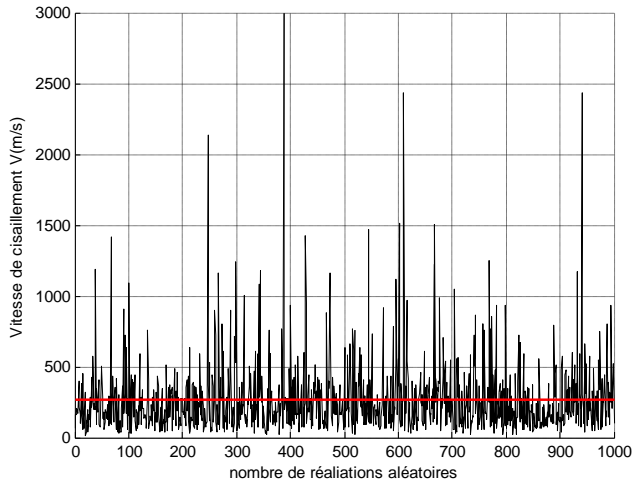
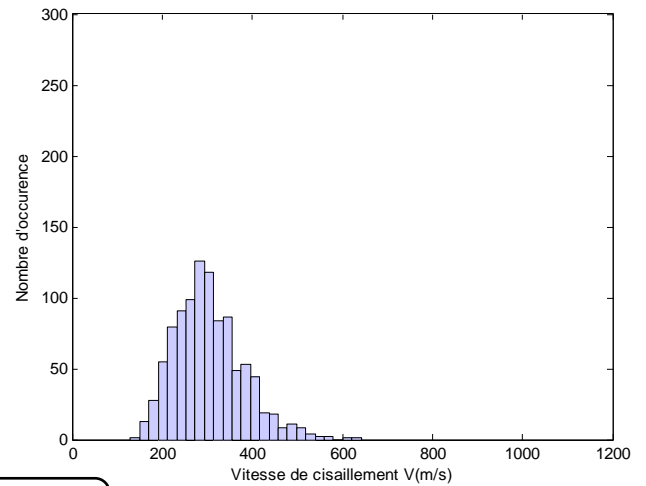
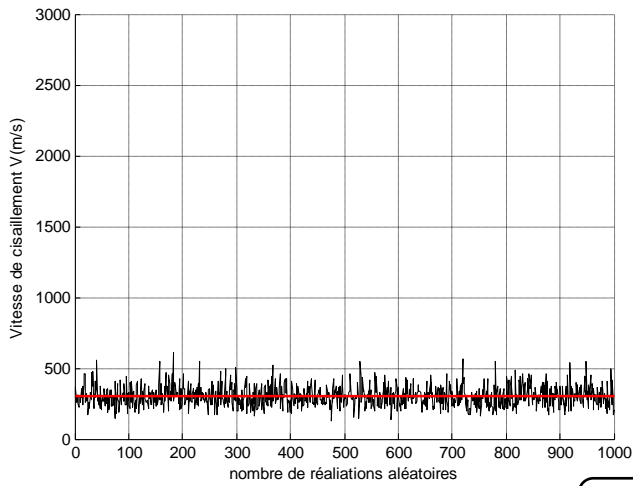


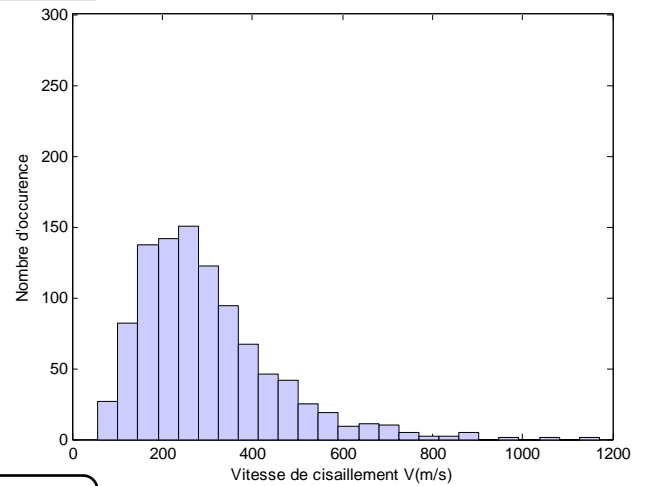
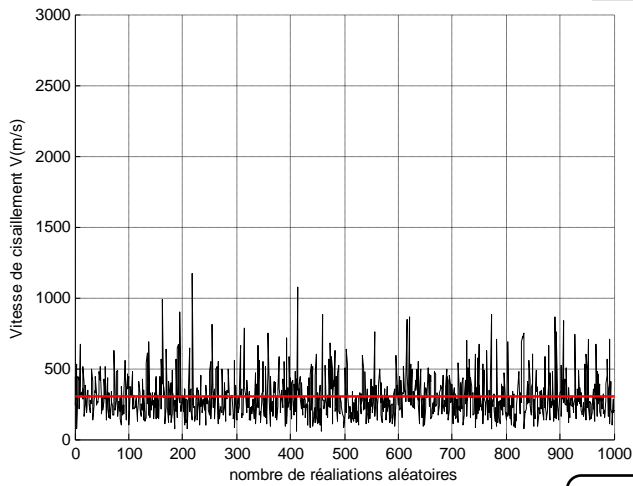
Figure 3.3(a) : Réalisations de la vitesse de cisaillement de dépôts alluvial (argile) pour différentes valeurs de CV_{V_s}

Figure 3.3(b) : Réalisation typique des histogrammes de la vitesse de cisaillement de dépôts alluvial (argile)

$CV_{V_s} = 0.25$
 $V_0 = 300 \text{ m/s}$



$CV_{V_s} = 0.5$
 $V_0 = 300 \text{ m/s}$



$CV_{V_s} = 1$
 $V_0 = 300 \text{ m/s}$

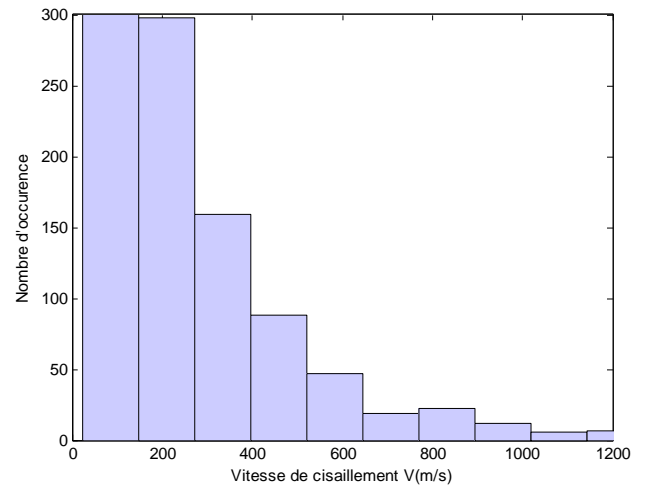
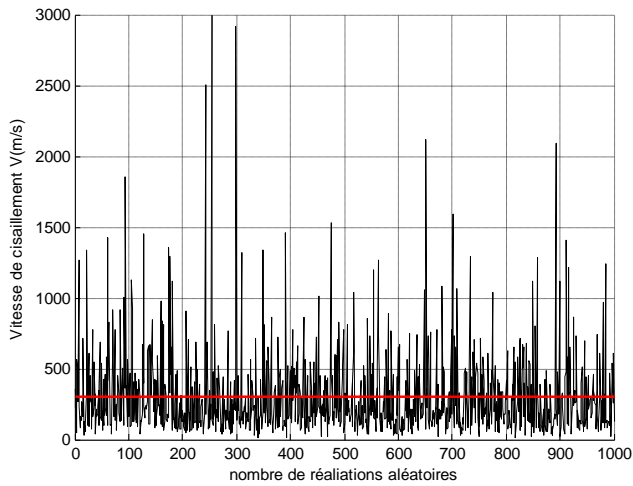
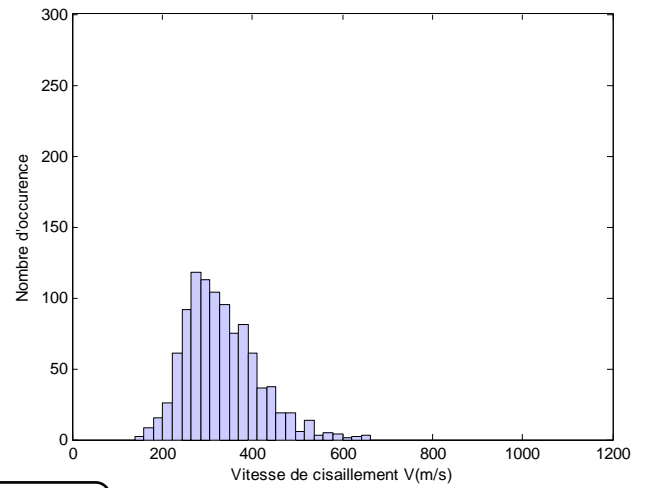
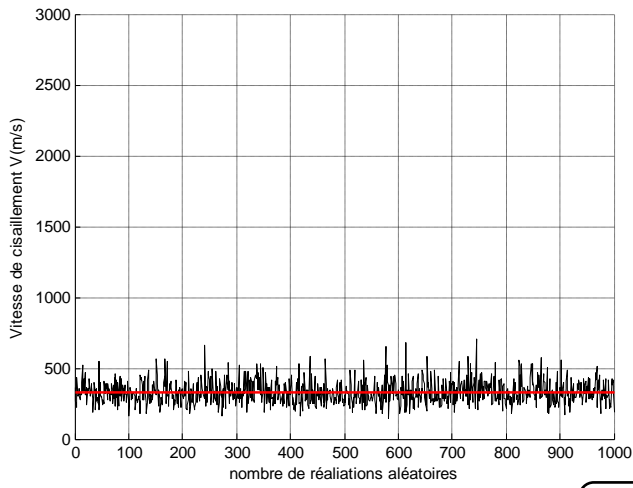


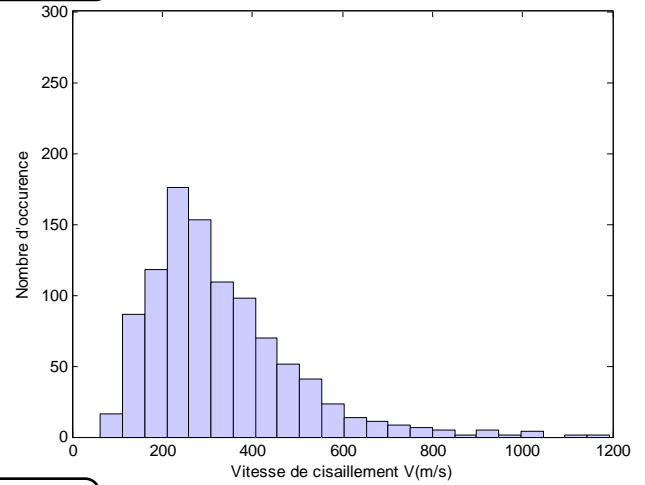
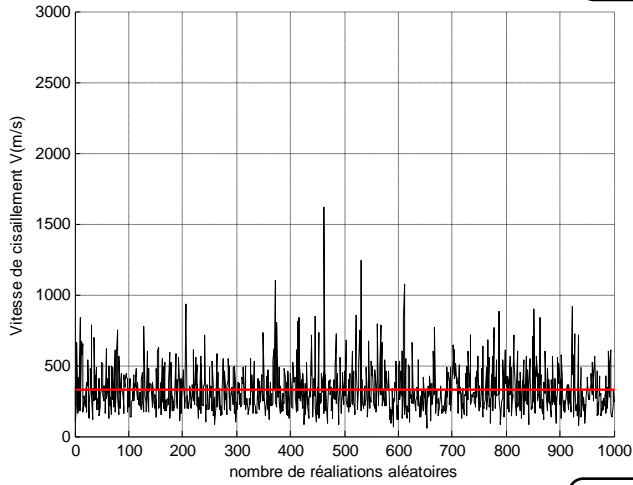
Figure 3.4(a) : Réalisations de la vitesse de cisaillement de dépôts alluvial ancien pour différentes valeurs de CV_{V_s}

Figure 3.4(b) : Réalisation typique des histogrammes de la vitesse de cisaillement de dépôts alluvial ancien

$CV_{V_S} = 0.25$
 $V_0 = 330 \text{ m/s}$



$CV_{V_S} = 0.5$
 $V_0 = 330 \text{ m/s}$



$CV_{V_S} = 1$
 $V_0 = 330 \text{ m/s}$

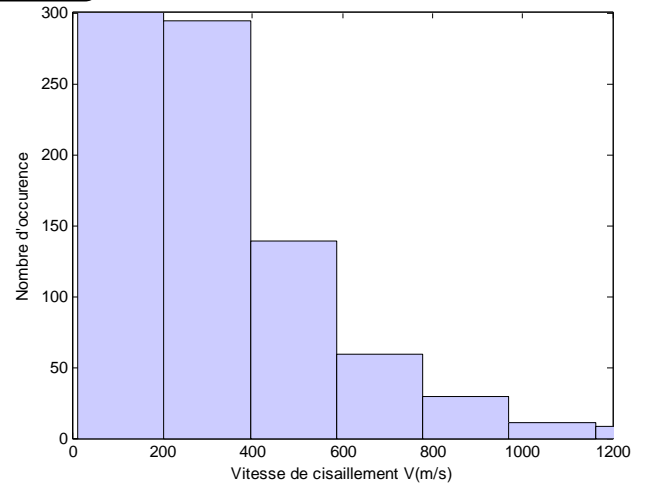
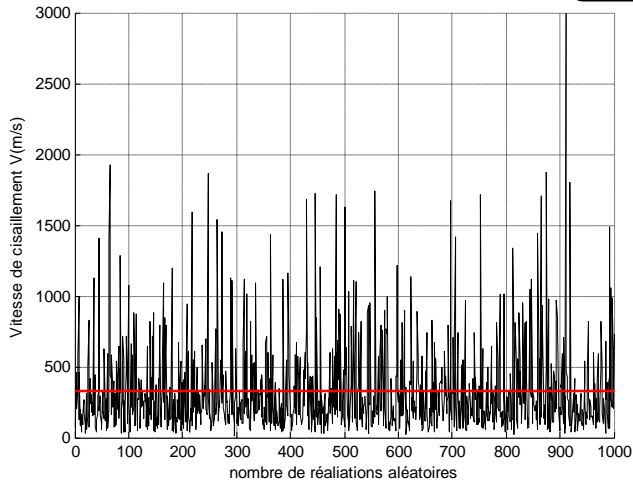
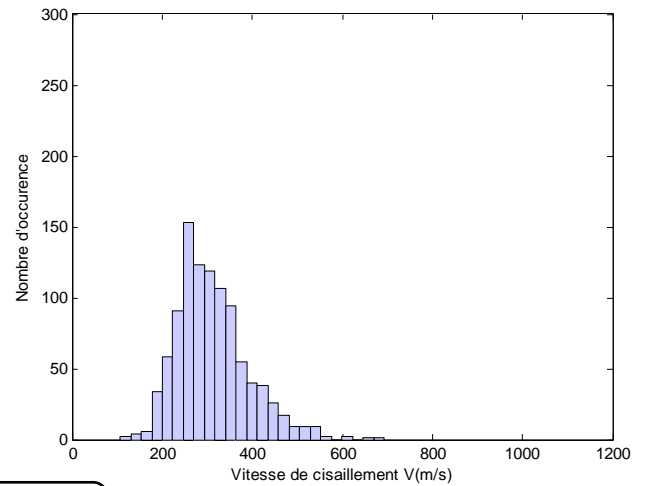
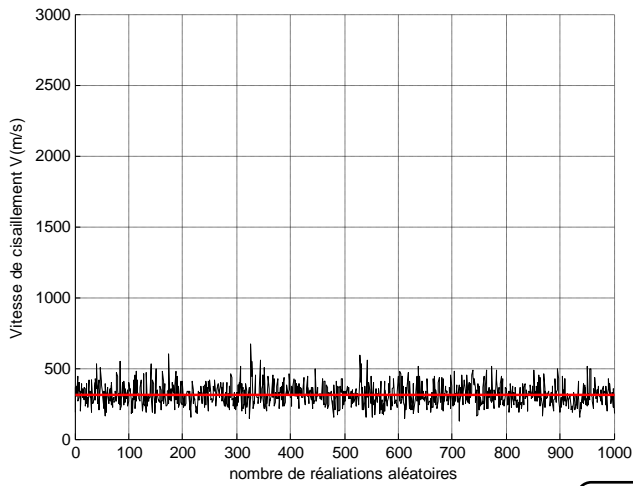


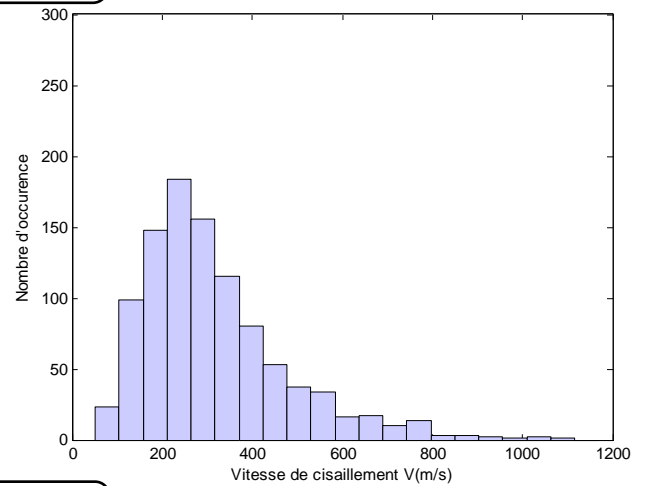
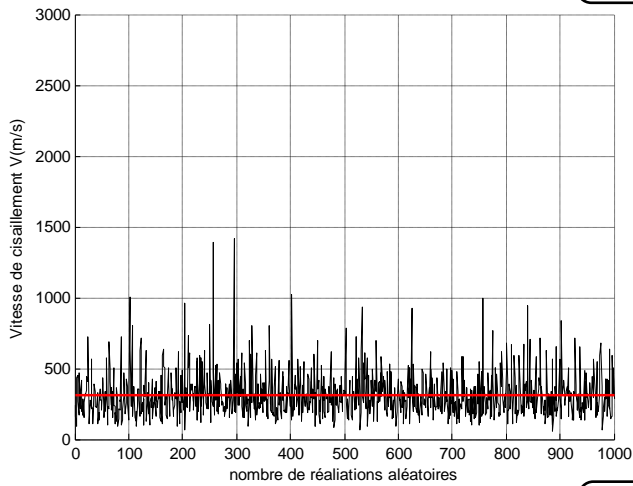
Figure 3.5(a) : Réalisations de la vitesse de cisaillement de terrasse marine pour différentes valeurs de CV_{V_S}

Figure 3.5(b) : Réalisation typique des histogrammes de la vitesse de cisaillement de terrasse marine

$CV_{V_s} = 0.25$
 $V_0 = 310 \text{ m/s}$



$CV_{V_s} = 0.5$
 $V_0 = 310 \text{ m/s}$



$CV_{V_s} = 1$
 $V_0 = 310 \text{ m/s}$

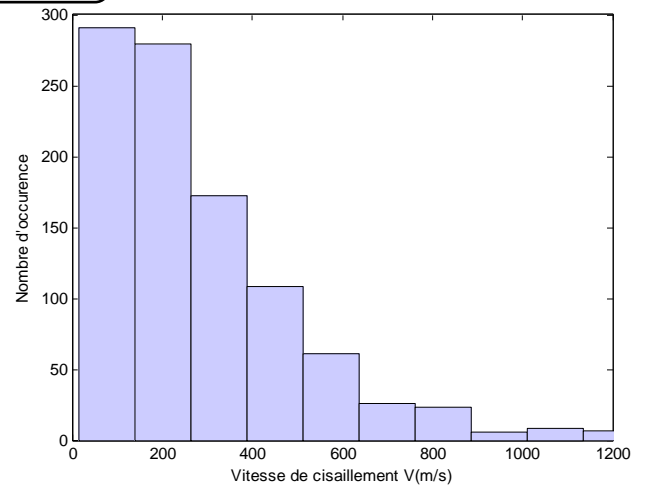
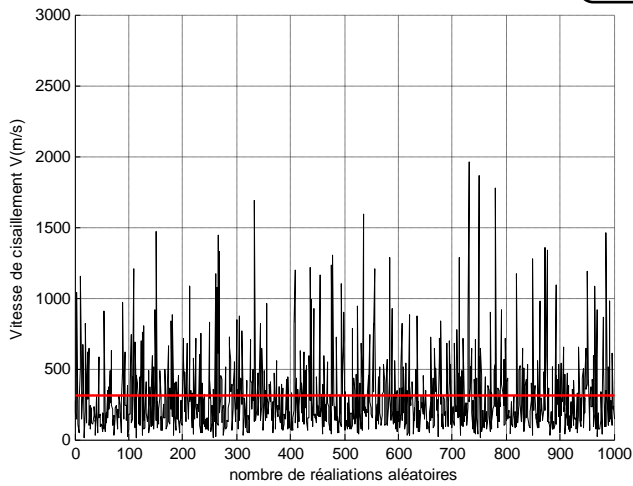


Figure 3.6(a) : Réalisations de la vitesse de cisaillement de grés calcaires et couches hastienne pour différentes valeurs de CV_{V_s}

Figure 3.6(b) : Réalisation typique des histogrammes de la vitesse de cisaillement de grés calcaires et couches hastienne

3.2.2 Variabilité des propriétés du sol bornées (paramètre de non homogénéité p)

Il est bien connu que le paramètre de non homogénéité p du sol pour les sites S2 et S3 de la ville d'Alger sont bornés dans la pratique (chapitre 2) entre deux valeurs extrêmes. Pour décrire et simuler les champs bornés de paramètre du sol.

La distribution de probabilité appropriée pour une variable aléatoire dont les valeurs sont bornées, est la distribution beta. Dans ce qui suit, la méthodologie est bien développée pour le paramètre de non homogénéité $p \in [p_{min} \ p_{max}]$.

Soit p un champ beta, l'équation exprimant la variabilité spatiale du paramètre de non homogénéité est donnée par (Fenton, 1990 ; Ang et Tang, 1975)

$$p = p_{min} + (p_{max} - p_{min}) V \quad (3.2)$$

$V \in [0 \ 1]$ C'est un variable aléatoire de la fonction de distribution cumulative beta en fonction des paramètres q et r .

La moyenne et la variance de la distribution beta son données par (Ang et Tang, 1975)

$$p_0 = p_{min} + \frac{q}{q+r} (p_{max} - p_{min}) \quad (3.3)$$

$$\sigma_p^2 = \frac{qr}{(q+r)^2(q+r+1)} (p_{max} - p_{min})^2$$

Ainsi, on peut dériver les expressions de q et r comme suit

$$q = \frac{(p_0 - p_{min})}{[(p_{max} - p_{min})\sigma_p^2]} [(p_0 - p_{min})(p_{max} - p_0) - \sigma_p^2] \quad q, r \text{ et } \sigma_p > 0 \quad (3.4)$$

$$r = \frac{(p_{max} - p_0)}{[(p_{max} - p_{min})\sigma_p^2]} [(p_0 - p_{min})(p_{max} - p_0) - \sigma_p^2]$$

q et r doivent être toujours positifs, ainsi il existe un écart type critique à ne pas dépasser qui est donné par (Nour et al. 2002)

$$\sigma_p < \sigma_{p,cr} = \sqrt{(p_0 - p_{min})(p_{max} - p_0)} \quad (3.5)$$

La stratégie de la simulation du le paramètre non homogénéité p consiste à calculer par le biais de l'équation (3.4), les paramètres q et r à partir des données du sol p_0, p_{min}, p_{max} et σ_p . Après la simulation du champ aléatoire V . La dernière étape consiste à calculer la variabilité du paramètre de non homogénéité p .

Où $CV_p = \sigma_p/p_0$ désigne le coefficient de variation.

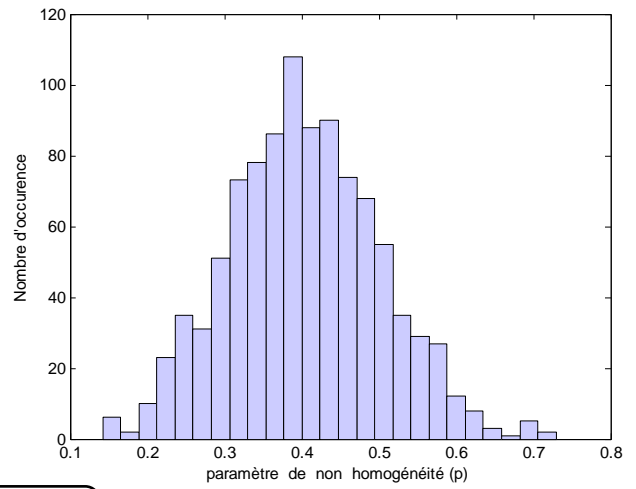
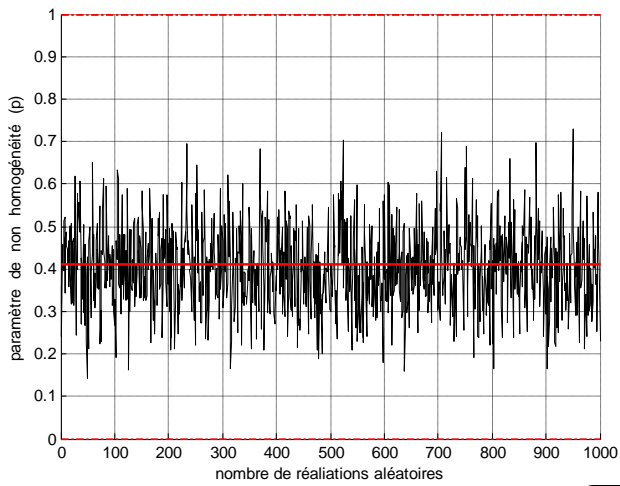
Il est montré dans les figures 3.7(a) à 3.12(a) les réalisations du paramètre p et les figures 3.7(b) à 3.12(b) les réalisations typiques des histogrammes du paramètre p des sites de la ville d'Alger (S2 et S3) pour différentes valeurs de CV_p .

On observe que les larges valeurs du coefficient de variation dans le cas de la distribution beta, produisent des distributions concentrées dans les extrémités de l'intervalle de variabilité.

Pour: $H = 20\text{ m}$

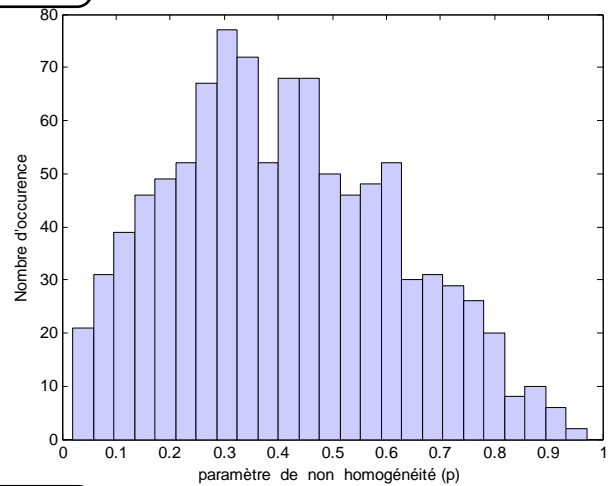
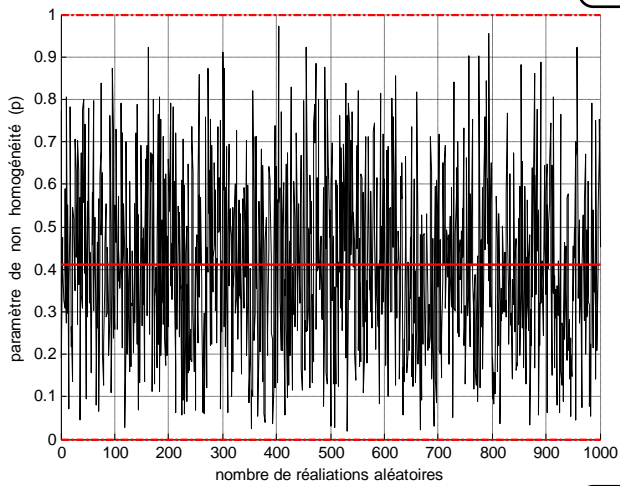
$$CV_p = 0.25$$

$$p_0 = 0.41$$



$$CV_p = 0.5$$

$$p_0 = 0.41$$



$$CV_p = 0.75$$

$$p_0 = 0.41$$

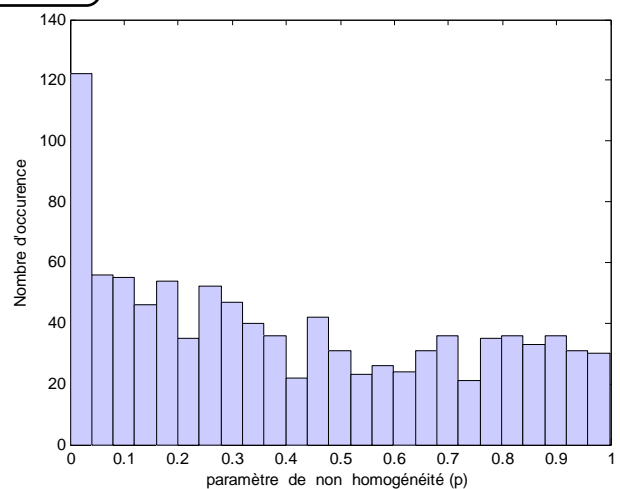
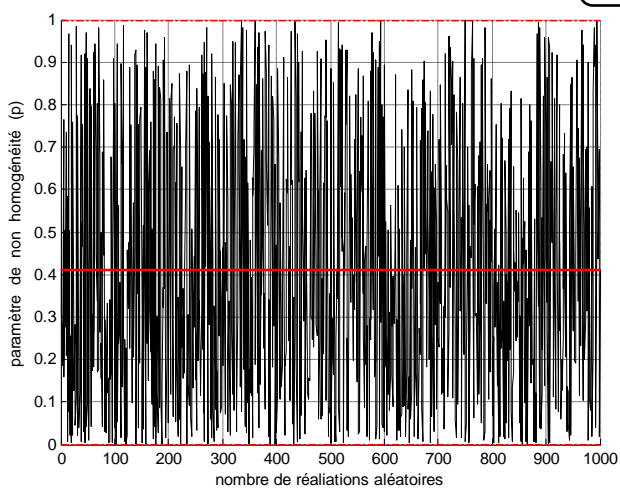
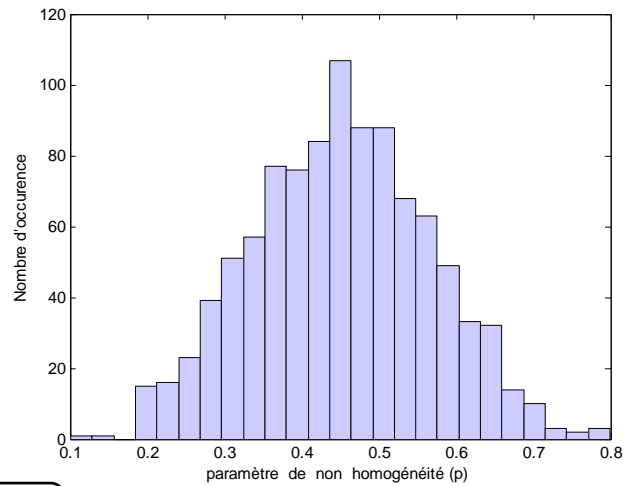
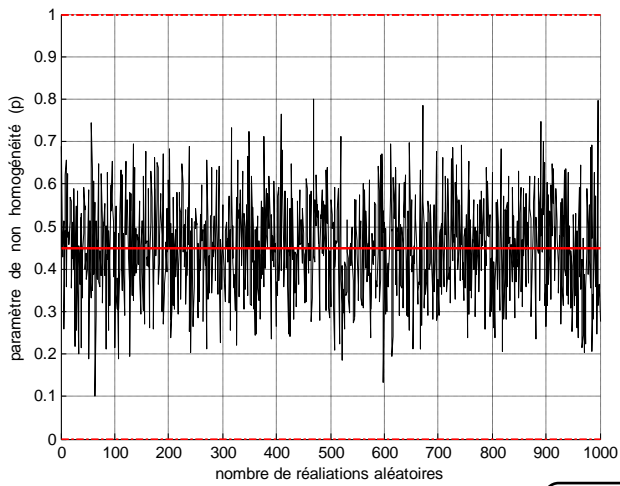


Figure 3.7(a) : Réalisations du paramètre p de site S2 ($p_0 = 0.41$; $p_{min} = 0$; $p_{max} = 1$) de 20 m

Figure 3.7(b) : Réalisation typique des histogrammes du paramètre p de site S2 de 20 m

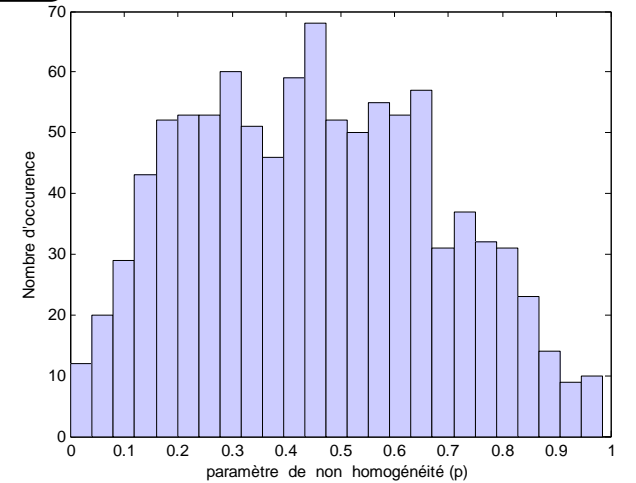
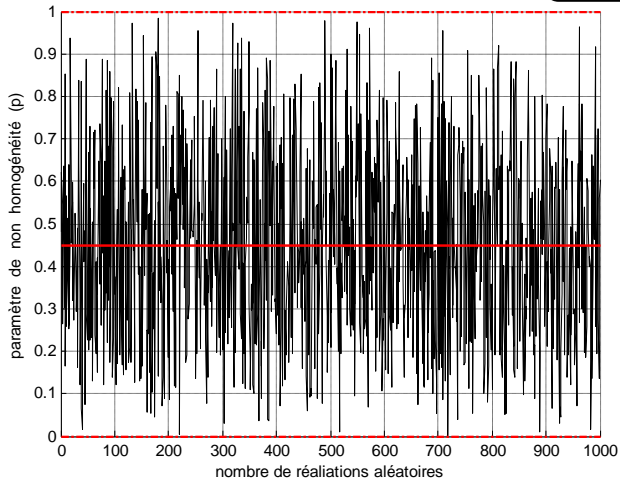
$$CV_p = 0.25$$

$$p_0 = 0.45$$



$$CV_p = 0.5$$

$$p_0 = 0.45$$



$$CV_p = 0.75$$

$$p_0 = 0.45$$

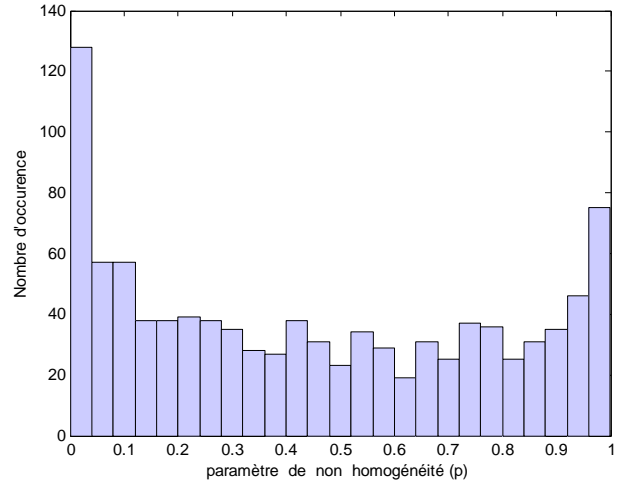
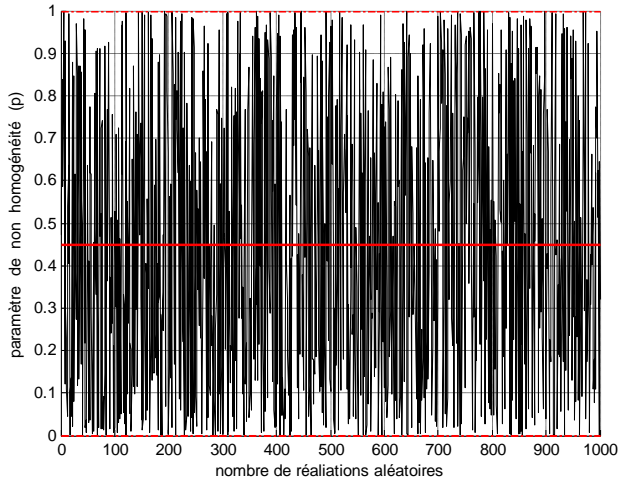


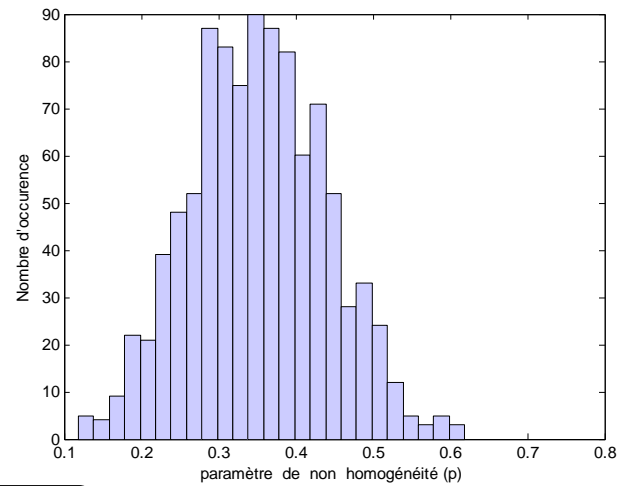
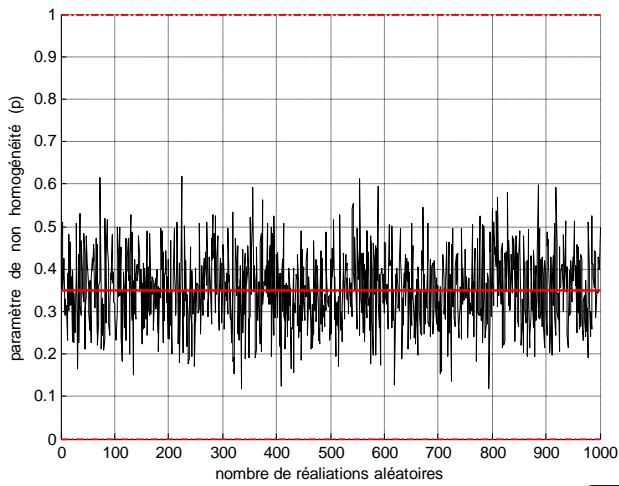
Figure 3.8(a) : Réalisations du paramètre p de site S3 ($p_0 = 0.45$; $p_{min} = 0$; $p_{max} = 1$) de 20 m

Figure 3.8(b) : Réalisation typique des histogrammes du paramètre p de site S3 de 20 m

Pour: $H = 30\text{ m}$

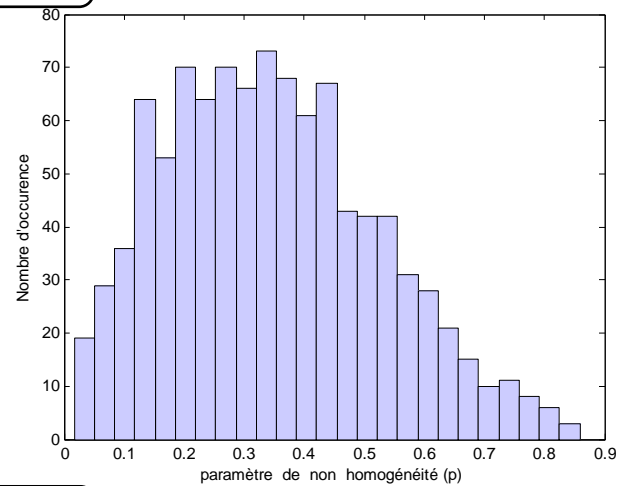
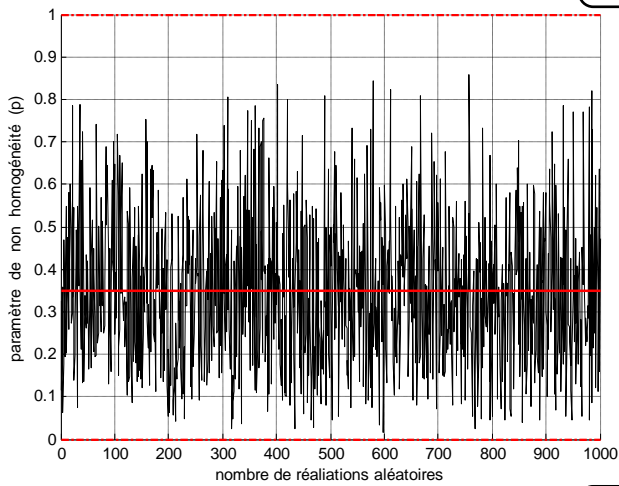
$$CV_p = 0.25$$

$$p_0 = 0.35$$



$$CV_p = 0.5$$

$$p_0 = 0.35$$



$$CV_p = 0.75$$

$$p_0 = 0.35$$

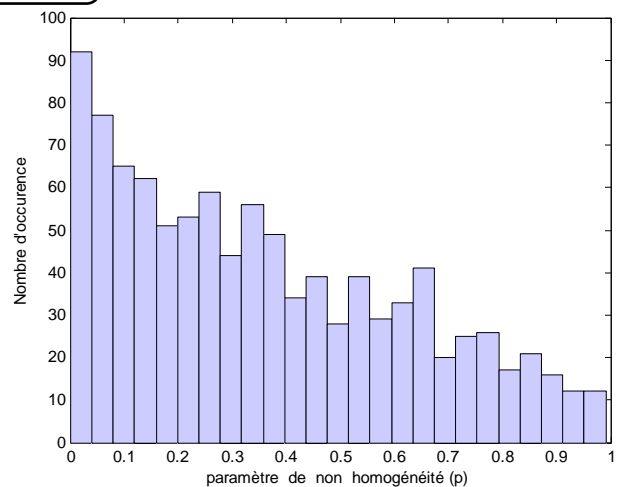
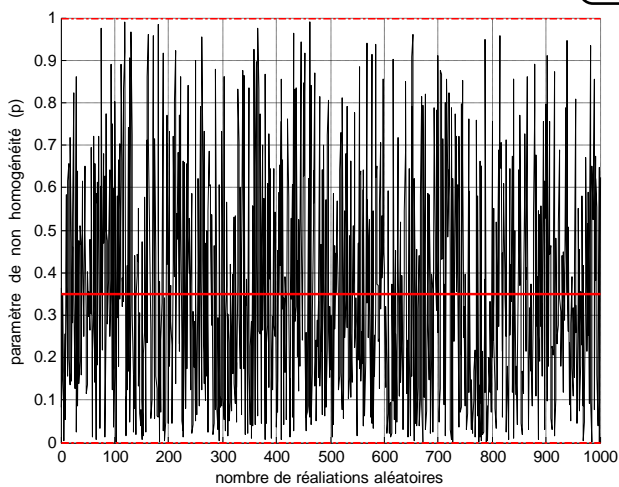
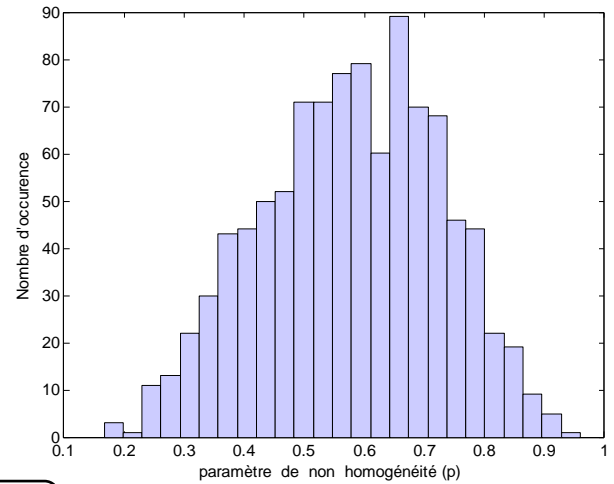
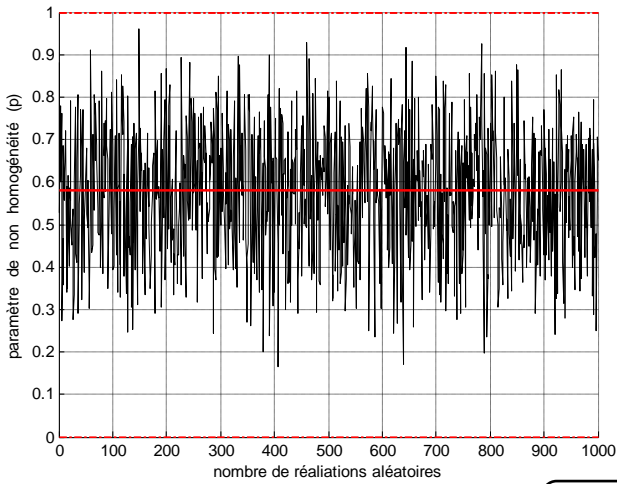


Figure 3.9(a) : Réalisations du paramètre p de site $S2$ ($p_0 = 0.35$; $p_{min} = 0$; $p_{max} = 1$) de 30 m

Figure 3.9(b) : Réalisation typique des histogrammes du paramètre p de site $S2$ de 30 m

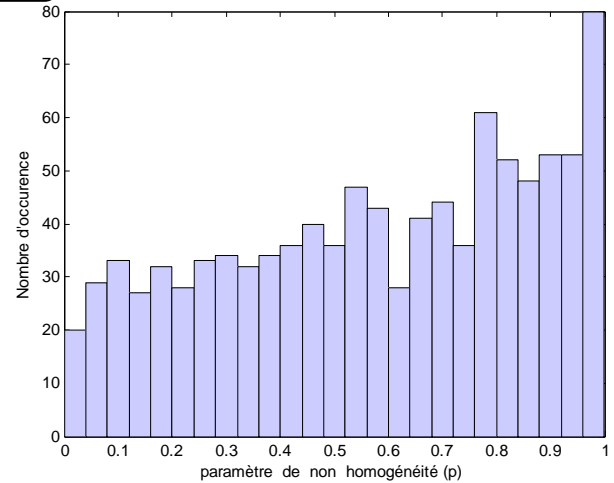
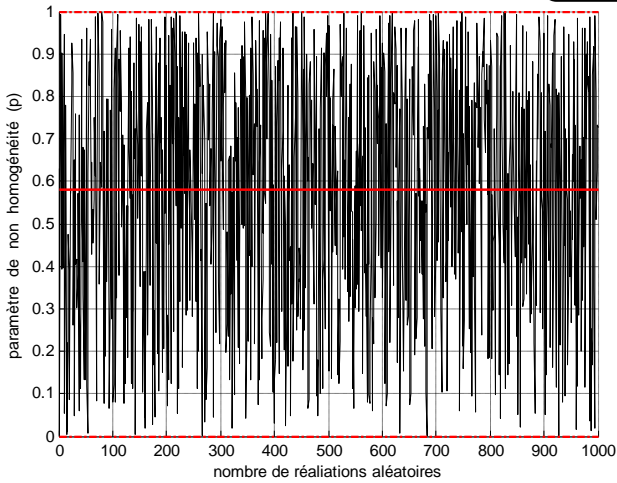
$$CV_p = 0.25$$

$$p_0 = 0.58$$



$$CV_p = 0.5$$

$$p_0 = 0.58$$



$$CV_p = 0.75$$

$$p_0 = 0.58$$

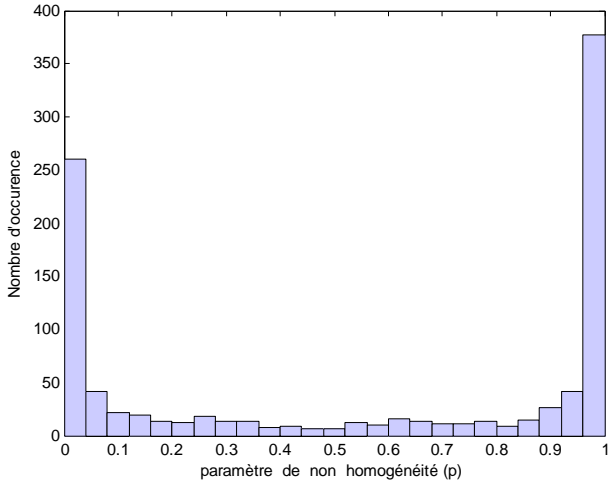
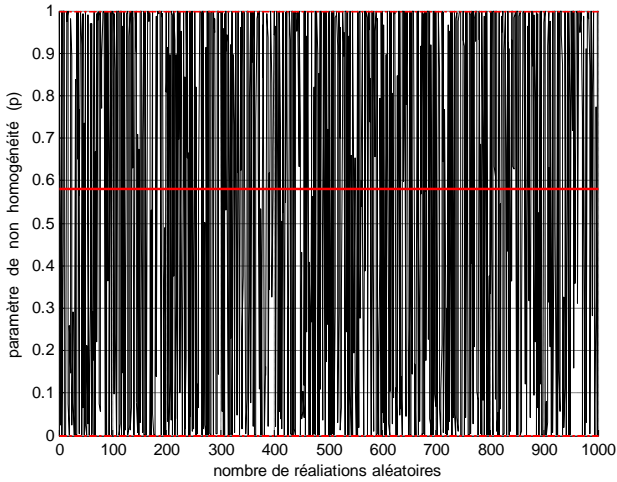


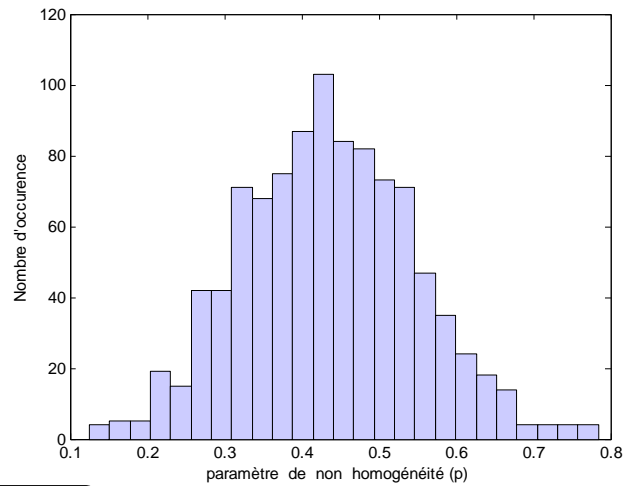
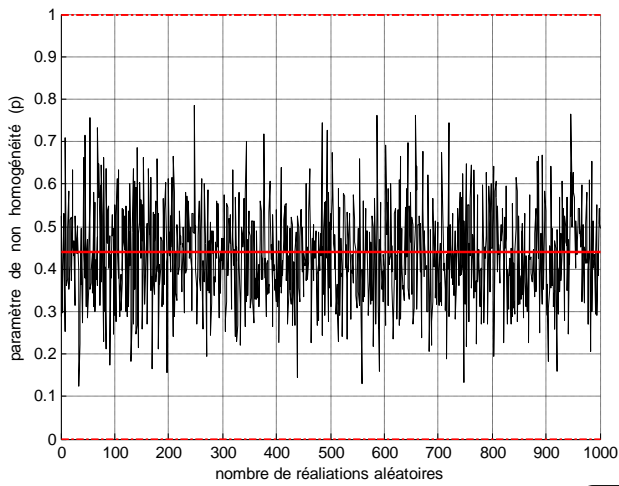
Figure 3.10(a) : Réalisations du paramètre p de site $S3$ ($p_0 = 0.58$; $p_{min} = 0$; $p_{max} = 1$) de 30 m

Figure 3.10(b) : Réalisation typique des histogrammes du paramètre p de site $S3$ de 30 m

Pour : profil réel

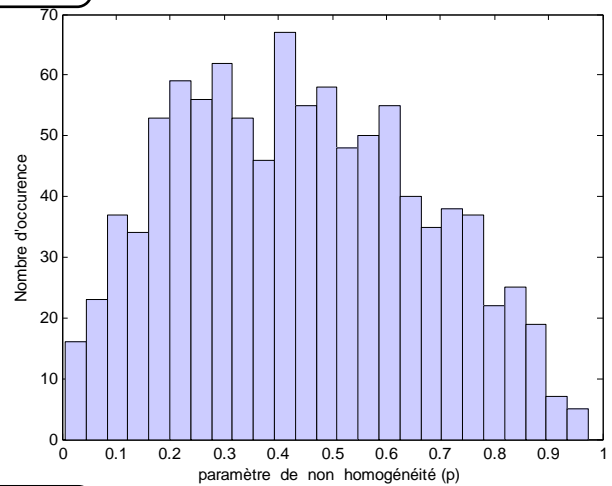
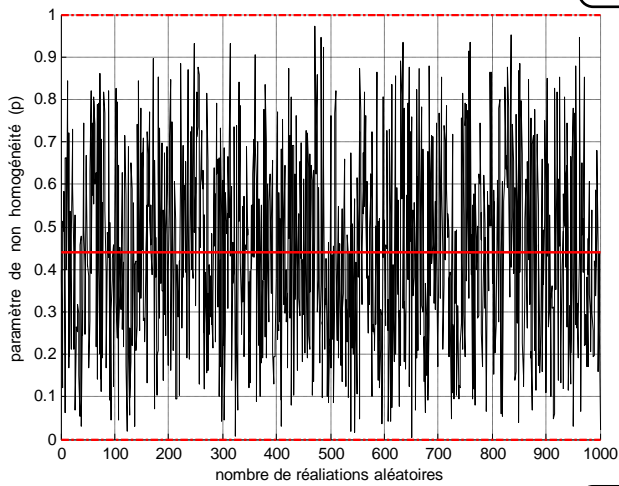
$$CV_p = 0.25$$

$$p_0 = 0.44$$



$$CV_p = 0.5$$

$$p_0 = 0.44$$



$$CV_p = 0.75$$

$$p_0 = 0.44$$

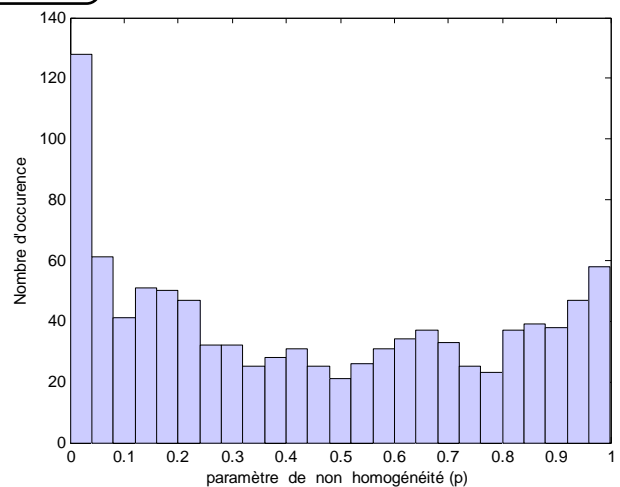
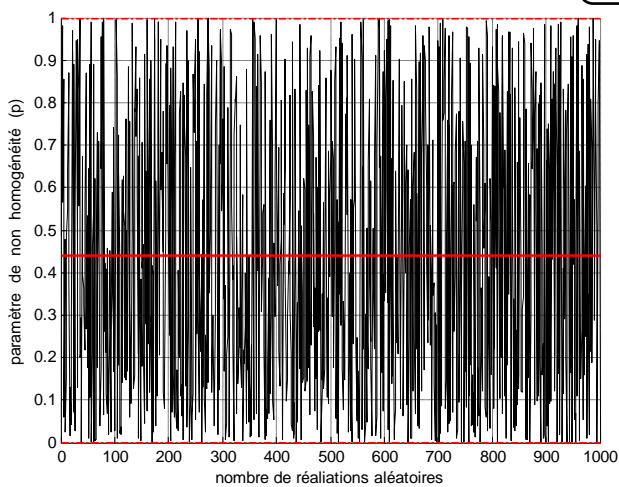
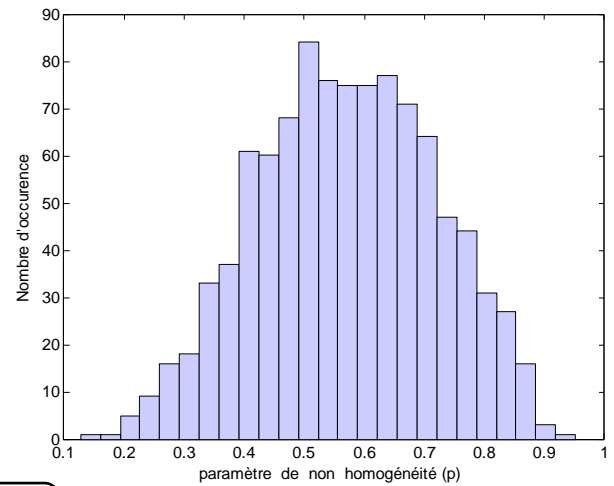
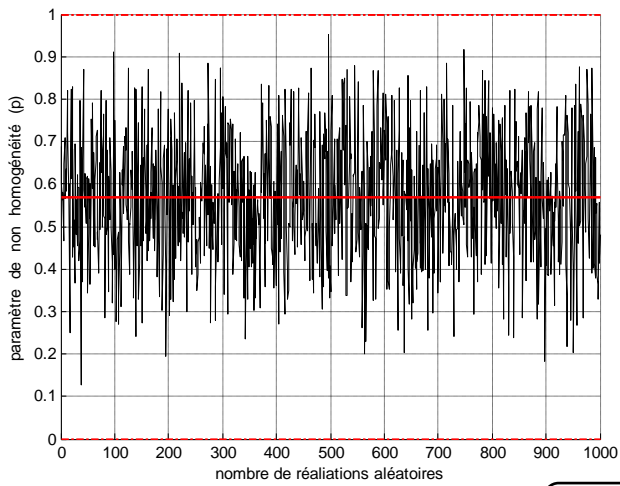


Figure 3.11(a) : Réalisations du paramètre p de site S2 ($p_0 = 0.44$; $p_{min} = 0$; $p_{max} = 1$) de profil réelle

Figure 3.11(b) : Réalisation typique des histogrammes du paramètre p de site S2 de profil réelle

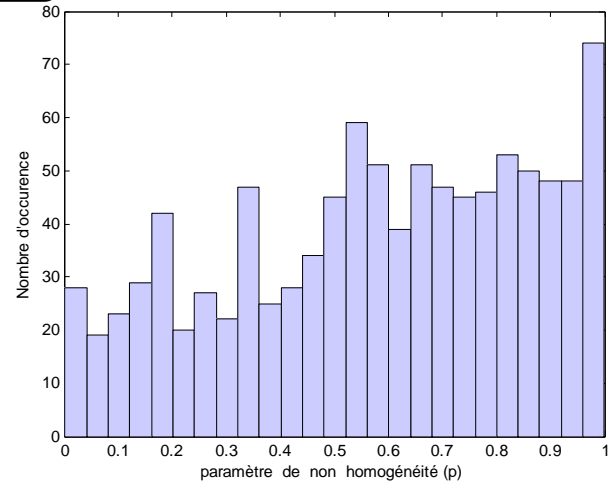
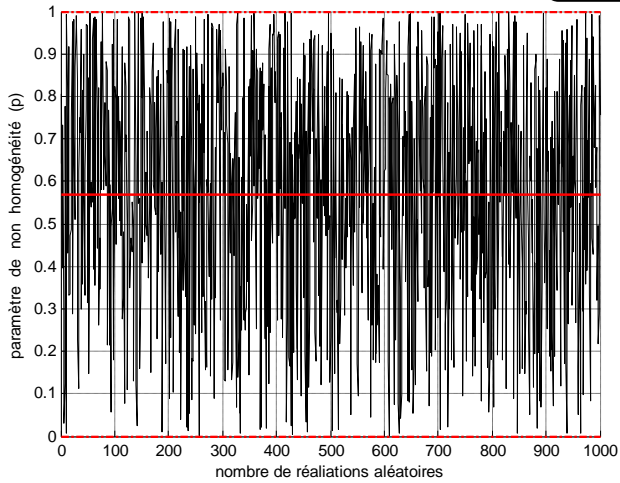
$$CV_p = 0.25$$

$$p_0 = 0.57$$



$$CV_p = 0.5$$

$$p_0 = 0.57$$



$$CV_p = 0.75$$

$$p_0 = 0.57$$

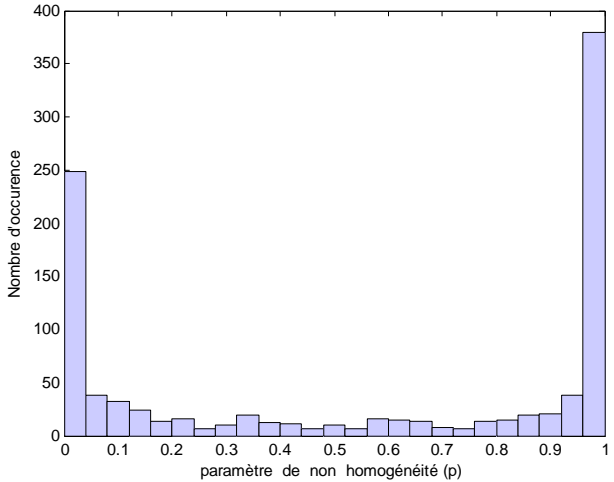
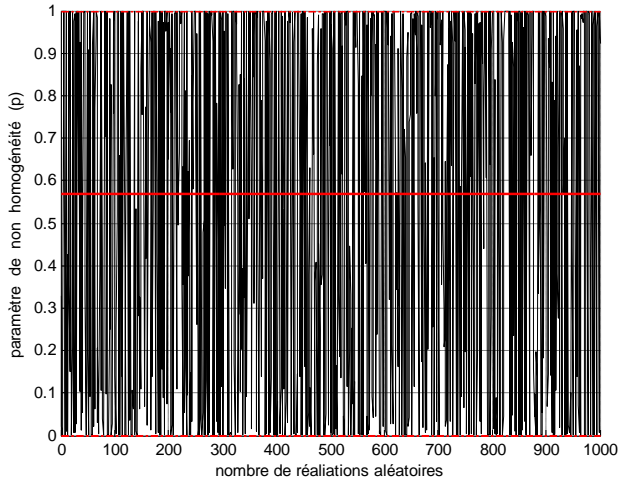


Figure 3.12(a) : Réalisations du paramètre p de site S3 ($p_0 = 0.57$; $p_{min} = 0$; $p_{max} = 1$) de profil réelle

Figure 3.12(b) : Réalisation typique des histogrammes du paramètre p de site S3 de profil réelle

3.3 Analyse probabiliste des fonctions de densités spectrales de puissance de la ville d'Alger

3.3.1 Modélisation de la fonction de densités spectrales de puissance (DSP)

La modélisation de la fonction de densité spectrale telle que définie est difficile; il est très commode en pratique de simplifier le problème. En supposant le champ d'observation proche de la source et les ondes se propageant verticalement, l'expression du DSP se réduit à:

$$S(\omega) = S_0(\omega) |H_i(\omega)|^2 \quad (3.6)$$

$S_0(\omega)$ est la densité spectrale du signal sismique à la base.

$H_i(\omega)$ est la fonction de transfert des couches géologiques locales du site.

Plusieurs formes de la DSP ont été proposées (Kanai 1957, Tajimi 1960, Barstein 1960, Iyengar, Harichandran 1986, Loh 85,1988). Ces formes proposées sont similaires à celle de Kanai et Tajimi (Kanai 1957, Tajimi 1960) qui est une forme paramétrique, appelée spectre de Kanai-Tajimi (K-T). La signification physique du spectre de K-T est basée sur le passage d'un processus (bruit) blanc à travers un filtre de sol linéaire caractérisé par une fréquence ω_g et un coefficient d'amortissement ξ_g . Le résultat est sous la forme :

$$S_{KT}(\omega) = S_0 \frac{1 + 4\xi_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2\right]^2 + 4\xi_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2} \quad (3.7)$$

Ou S_0 est l'amplitude du spectre de l'excitation au rocher considérée comme bruit blanc (constante). Cependant, ce spectre conduit à des variances stationnaires infinies de la vitesse et du déplacement due à la singularité existante au voisinage de $\omega_g = 0$.

L'objectif recherché est de montrer comment utiliser la fonction d'amplification pour estimer les paramètres des filtres de Kanai-Tajimi représentant les fonctions de densité spectrale de puissance des sites S2 et S3 de la ville d'Alger. Ces paramètres dépendent des

caractéristiques physiques et géométriques du profil de sol et peuvent être estimés par des approximations analytiques données par (Hadid et Afra 2000) :

$$\begin{cases} \xi_g = \frac{1}{2\sqrt{S_{\max}^2 - 1.15}} \\ \omega_g = \frac{2\xi_g}{\left[(1+8\xi_g^2)^{1/2} - 1\right]^{1/2}} \omega_{\max} \end{cases} \quad (3.8)$$

Où :

$$\begin{cases} \omega_{\max} = \left(-0.3725p + \frac{\pi}{2}\right) \frac{V_0}{H} \\ S_{\max} = \frac{1}{\Gamma\left(\frac{1}{2-p}\right)} \frac{\left(\frac{1}{2-p} \tilde{\omega}_{\max}\right)^{\nu}}{\left|J_{\nu}\left(\frac{2}{2-p} \tilde{\omega}_{\max}\right) + iq J_{\nu+1}\left(\frac{2}{2-p} \tilde{\omega}_{\max}\right)\right|} \\ \tilde{\omega}_{\max} = \omega_{\max} \frac{H}{V_0} \end{cases} \quad (3.9)$$

S_{\max} est la valeur maximale de l'amplification de la fonction d'amplification de la couche de sol non homogène à la fréquence fondamentale ω_{\max} . Il est à noter que ω_{\max} est dérivée en utilisant une approximation polynomiale, pour un facteur de non homogénéité p variant entre 0 et 1, et les quantités ξ_g et ω_g représentent l'amortissement et la fréquence angulaire du modèle de sol à injecter dans le filtre de Kanai-Tajimi de l'équation 3.7.

La figure 3.13 montre la variation du taux d'amortissement du sol du modèle de Kanai Tajimi en fonction du paramètre de non homogénéité p et du rapport d'impédance q . Cet amortissement est affecté significativement par la variation du paramètre du rapport d'impédance q et du paramètre de non homogénéité du sol p . Ce qui démontre que ce facteur ne peut être pris en considération sans considérations physiques telles que le type du sol et le mécanisme de dissipation de l'énergie qui est complètement contrôlé par le rapport d'impédance

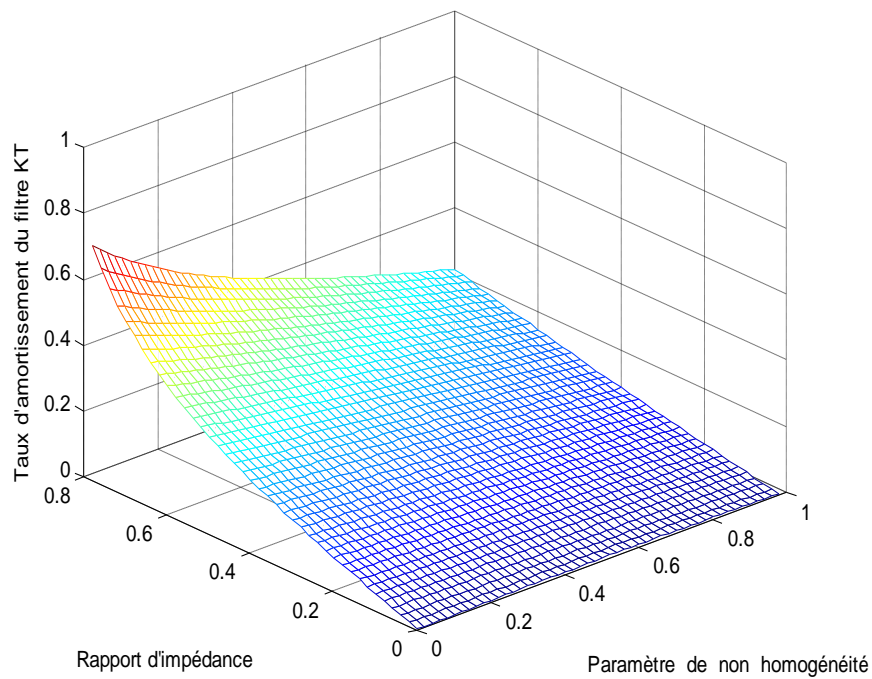


Figure 3.13 : Variation de l'amortissement du sol du modèle de Kanai Tajimi en fonction du rapport d'impédance et du paramètre de non homogénéité du sol

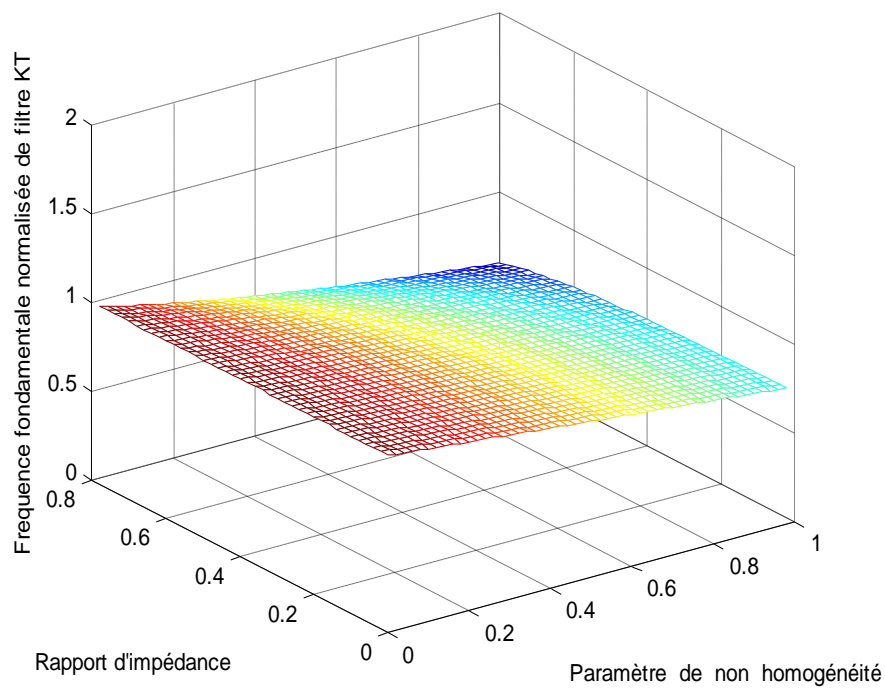


Figure 3.14 : Variation de la fréquence fondamentale du sol normalisée du modèle de Kanai Tajimi en fonction du rapport d'impédance et du paramètre de non homogénéité du sol

La figure 3.14 montre la variation de la fréquence du sol du filtre de Kanai-Tajimi, normalisée par rapport à la fréquence fondamentale de la colonne de sol homogène ($p = 0$), en fonction du paramètre de non homogénéité p et du rapport d'impédance q . Il est clair que la fréquence du sol du filtre de Kanai-Tajimi n'est pas aussi sensible que l'amortissement au contraste d'impédance (Hadid et Afra 2000) surtout pour les sols fermes, $p < 0.30$ et $q > 0.75$.

3.3.2 Variabilité des fonctions de densités spectrales de puissance en fonction de p

Cette partie a pour objectif d'analyser la variabilité des fonctions de densités spectrales de puissance des sites, S2 et S3, des profils de sol non homogène de la ville d'Alger reposant sur un substratum rocheux. La variabilité des paramètres de non homogénéité du sol p variable des sites S2 et S3.

Les données de tableau suivant sont utilisées pour modélisé DSP de site S2 et S3 :

Tableau 3.2 : Caractéristiques de profil de sol de chaque site pour différentes modules

Caractéristiques de profil de sol	H= 20 m		H= 30 m		Profile réelle	
	S2	S3	S2	S3	S2	S3
P_0	0.41	0.45	0.35	0.58	0.44	0.57
P_{\min}	0	0	0	0	0	0
P_{\max}	1	1	1	1	1	1
$\beta(\%)$	5	5	5	5	5	5
$\rho_s(t/m^3)$	1.88	1.96	1.88	1.96	1.88	1.96
$\rho_r(t/m^3)$	2.04	2.15	2.04	2.15	2.04	2.15
$V_0(m/s)$	540	290	540	320	535	320
$V_r(m/s)$	710	450	656	554	720	500
q	0.7	0.59	0.76	0.52	0.68	0.58

Où :

p_0 la valeur moyenne du paramètre de non homogénéité de sol.

p_{\min} et p_{\max} les valeurs extrêmes des paramètres de non homogénéité de sol.

β la valeur du coefficient d'amortissement de sol.

V_0 et ρ_s la vitesse des ondes de cisaillement et la densité du sol respectivement.

V_r et ρ_r la vitesse des ondes de cisaillement et la densité du substratum.

$q = \frac{\rho_s V_0}{\rho_r V_r}$ est le rapport d'impédance.

En pratique, la connaissance de la variabilité de paramètre de non homogénéité p de sol pour les sites S2, S3 de la ville d'Alger est très délicate, car la détermination in-situ très coûteuse, pratiquement il n'y a aucune information disponible dans la littérature sur cette paramètre, c.-à-d., CV_p (Nour et al. 2003).

On considère une variation de $CV_p = 0; 0.25 ; 0.5 ; 0.75$.

➤ **Influence de la variabilité du paramètre de non homogénéité p sur la DSP pour S2 et S3 de la ville d'Alger pour différentes modules des profondeurs**

Les figures 3.15 à 3.20 présente les statistiques de la fonction de DSP en fonction de la variabilité du paramètre de non homogénéité p de site S2 et S3 pour différentes modules, $H=20, 30 m$ et la *profile réelle* respectivement. D'après les courbes tracées, on observe que l'augmentation de CV_p provoque un effet de filtrage qui fait glisser la fréquence fondamentale du système vers les basses fréquences, et provoque l'atténuation des fréquences élevées. Par ailleurs, on observe que l'augmentation de CV_p induit aussi une augmentation de l'amplification (amplitude de la fonction de DSP).

L'amplitude de la fonction DSP augmente généralement au niveau de toutes les fréquences lorsque le paramètre d'inhomogénéité ' p ' augmente et plus particulièrement au niveau des fréquences de résonance.

En d'autres termes, l'amplification est plus importante pour les sols meubles (S3) que pour les sols fermes (S2). De plus, lorsque le degré d'inhomogénéité devient important, l'amplitude du mode fondamental devient plus importante, lorsque le rapport d'admittance 'q' est important ($q > 0.5$). La flexibilité du substratum rocheux définie par le paramètre adimensionnel 'q' n'affecte que l'amplitude de la fonction DSP. La dissipation radiative augmente avec l'augmentation du paramètre 'q'

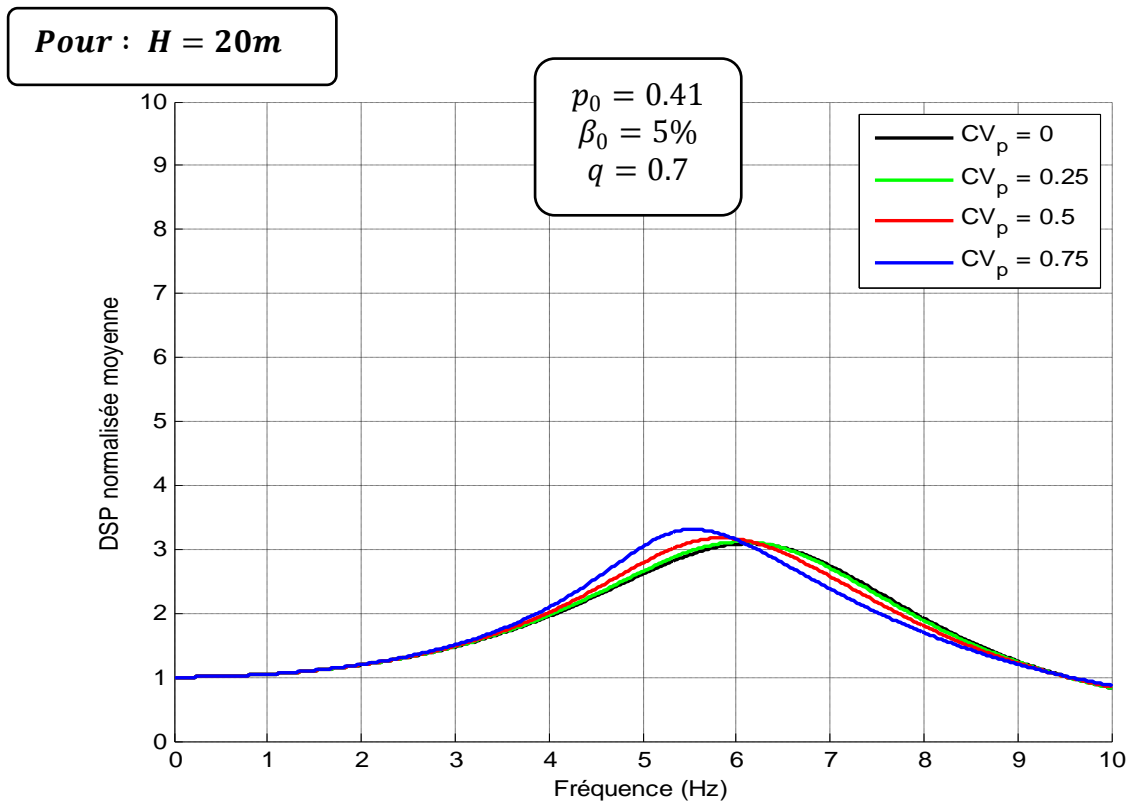


Figure 3.15: la DSP en fonction de la variabilité du paramètre de non homogénéité p pour différentes valeurs de CV_p de site S2 (sol ferme)

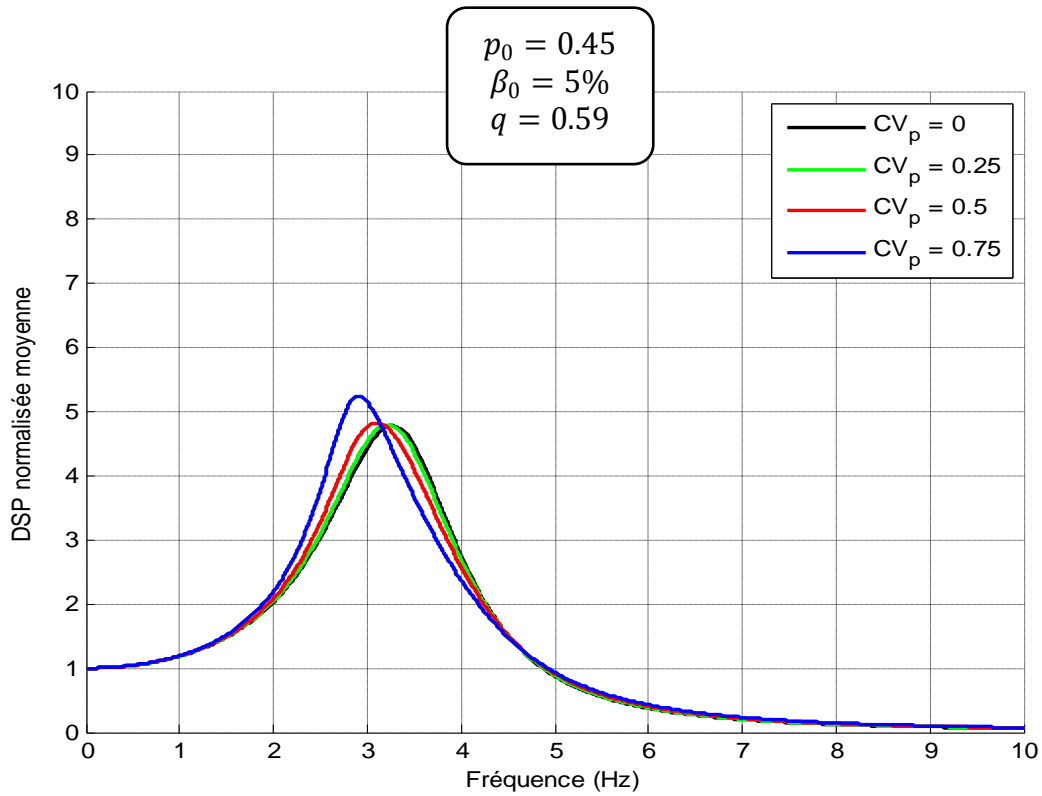


Figure 3.16: la DSP en fonction de la variabilité du paramètre de non homogénéité p pour différentes valeurs de CV_p de site S3 (sol meuble)

Pour : $H = 30m$

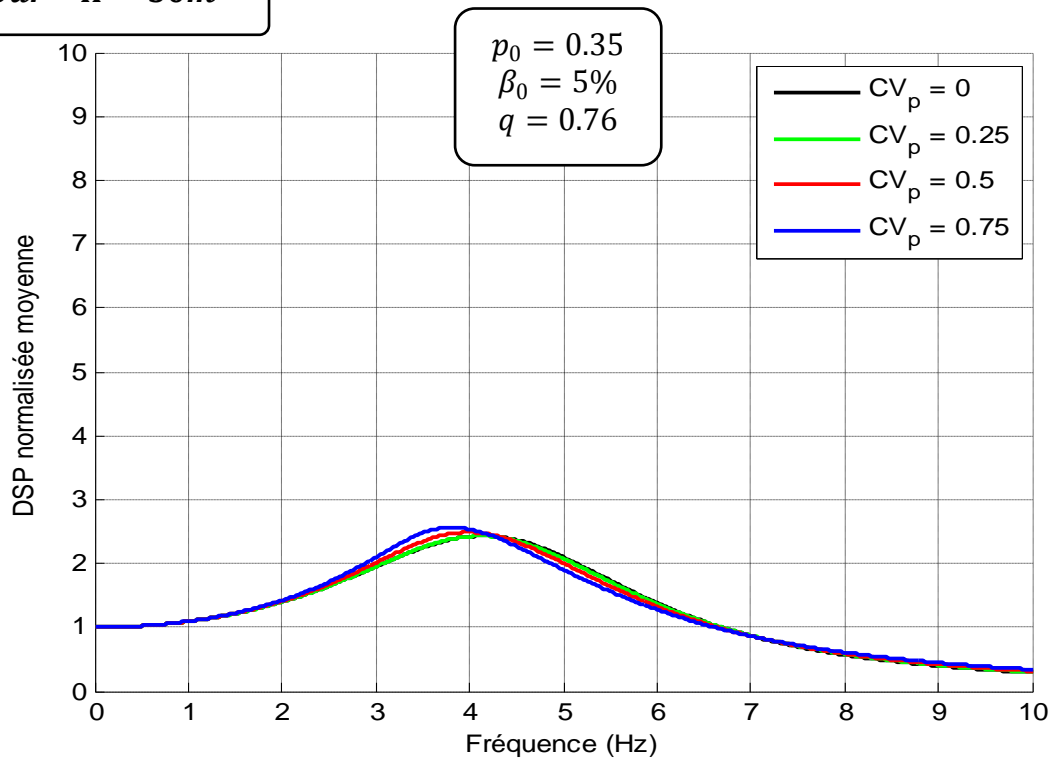


Figure 3.17: la DSP en fonction de la variabilité du paramètre de non homogénéité p pour différentes valeurs de CV_p de site S2 (sol ferme)

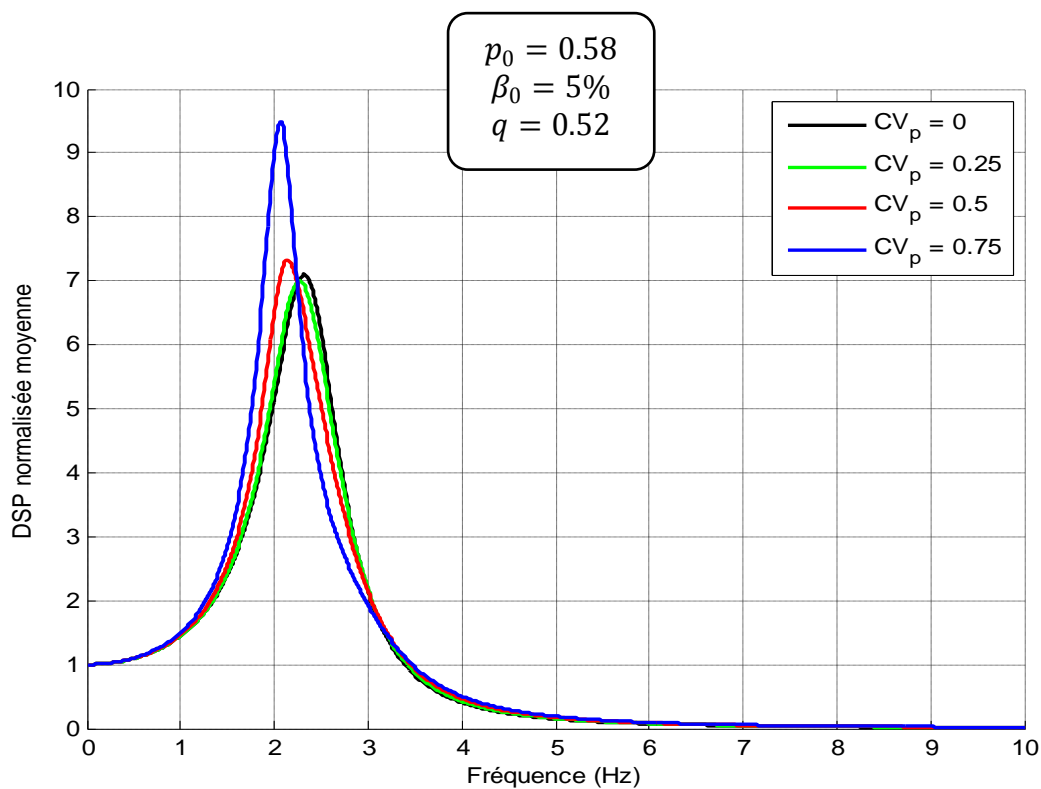


Figure 3.18: la DSP en fonction de la variabilité du paramètre de non homogénéité p pour différentes valeurs de CV_p de site S3 (sol meuble)

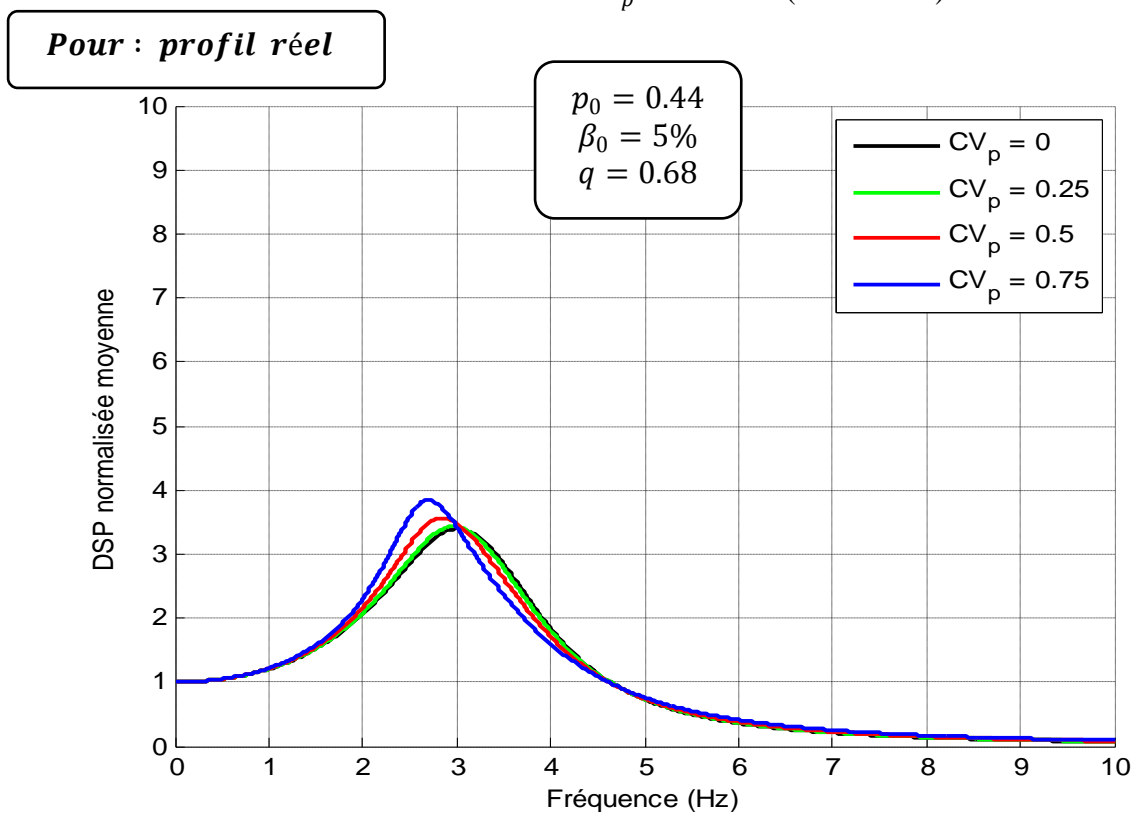


Figure 3.19: la DSP en fonction de la variabilité du paramètre de non homogénéité p pour différentes valeurs de CV_p de site S2 (sol ferme)

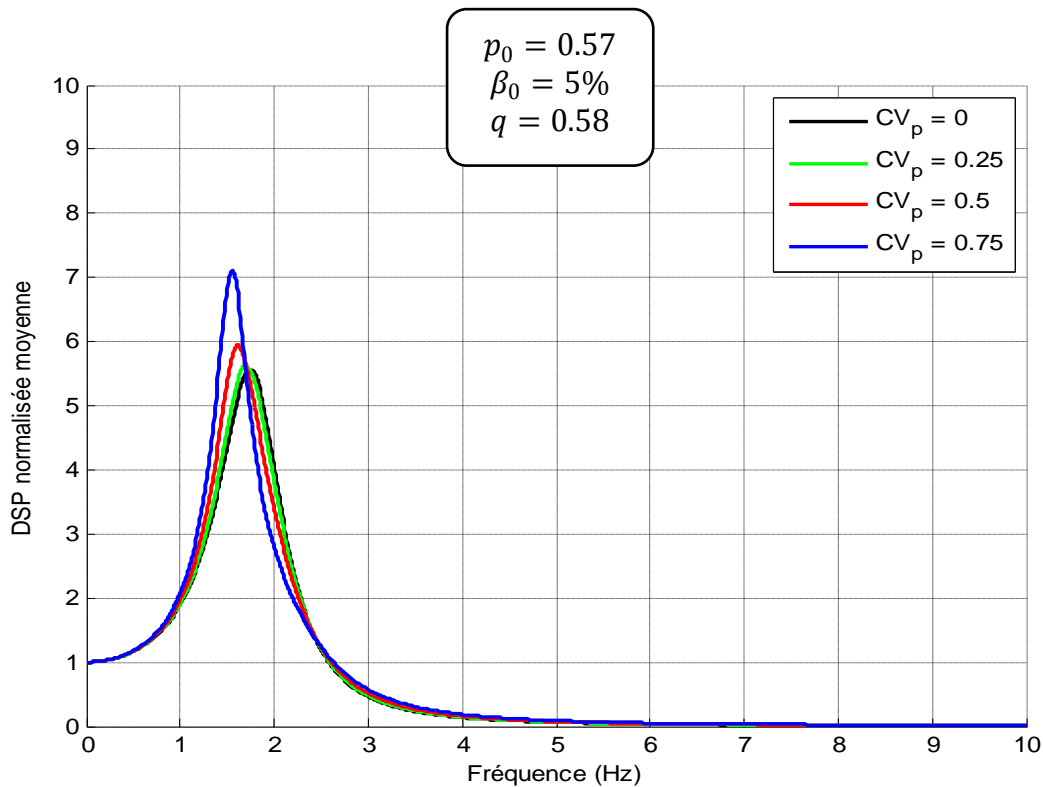


Figure 3.20: la DSP en fonction de la variabilité du paramètre de non homogénéité p pour différentes valeurs de CV_p de site S3 (sol meuble)

3.3.3 Variabilité des fonctions de densités spectrales de puissance en fonction de V_s

Cette partie a pour objectif d'analyser la variabilité des fonctions de densités spectrales de puissance des Géologie sous la terre, ap, a3, a2, q, qt, p2l et p2c, des profils de sol homogène ($p=0$) de la ville d'Alger reposant sur un substratum rocheux. La variabilité spatiale des propriétés du sol (vitesse de cisaillement) est considérée uniquement suivant la direction z . Suivant le plan (x,y) , il est supposé que les propriétés du sol sont invariables, c.-à-d. représentées par leurs moyennes.

Les valeurs moyennes de la vitesse de cisaillement V_s et la masse volumique ρ_0 des Géologie sous la terre sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 3.3 : Les valeurs moyennes de la vitesse de cisaillement V_s et la masse volumique ρ_0

symbole	Géologie sous la terre	ρ_0 (g/cm ³)	V_0 (m/s)
ap	Dépôts de plage et de dune	1.8	275
a3	Dépôts alluvial (sable)	1.8	240
a2	Dépôts alluvial (argile)	1.74	270
q	Dépôts alluvial ancien	1.81	300
qt	Terrasse marine	1.9	330
p2l et p2c	Grés calcaires et Couches hastienne	1.92	310

- Valeur du coefficient d'amortissement $\beta_0 = 5\%$.
- Paramètre de non homogénéité ($p=0$), cas de sol homogène.
- La profondeur de chaque profile de sol de géologie sous la terre égale à 30m.

En pratique, la connaissance de la variabilité de V_s pour les sols est très délicate, car la détermination in-situ et en laboratoire de son coefficient de variation CV_{V_s} est une tâche très ennuyeuse, dans la mesure où le nombre suffisant d'échantillons nécessaires pour un traitement statistique fiable est rare. (Nour et al. 2003).

On considère une variation de $CV_{V_s} = 0.0 ; 0.25 ; 0.5 ; 1.0$.

➤ **Influence de la variabilité de la vitesse de cisaillement sur la DSP des Géologie sous la terre**

Les figures 3.21 à 3.26 présente les statistiques de la fonction de DSP en fonction de la variabilité de la vitesse de cisaillement des géologies sous la terre. D'après les courbes tracées, on observe que l'augmentation de CV_{V_s} provoque un effet de filtrage qui fait glisser la fréquence fondamentale du système vers les basses fréquences, et provoque

l'atténuation des fréquences élevées. Par ailleurs, on observe que l'augmentation de CV_{V_s} induit aussi une diminution de l'amplification (amplitude de la fonction de DSP).

L'amplitude de la fonction DSP diminue généralement au niveau de toutes les fréquences lorsque la vitesse de cisaillement V_s augmente et plus particulièrement au niveau des fréquences de résonance.

En d'autres termes, l'amplification est plus importante pour les sols lâches (Dépôts alluvial (sable) par exemple) que pour les sols cohérents et rigides (Terrasse marine par exemple).

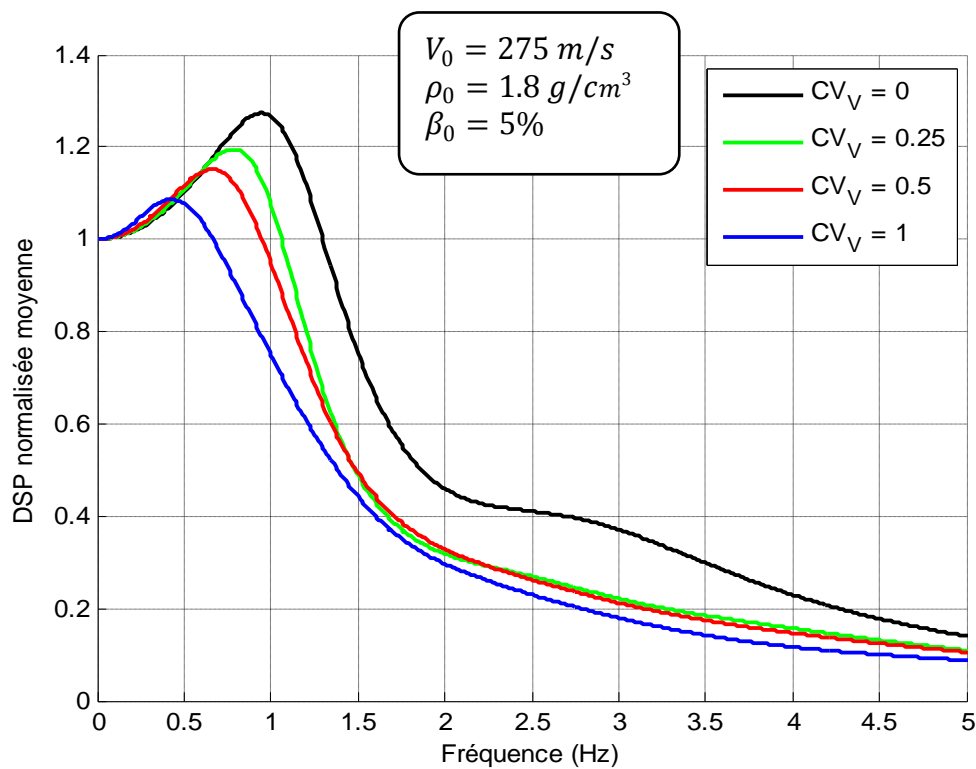


Figure 3.21: la DSP en fonction de la variabilité de la vitesse de cisaillement pour différentes valeurs de CV_V de dépôts de plage et de dune.

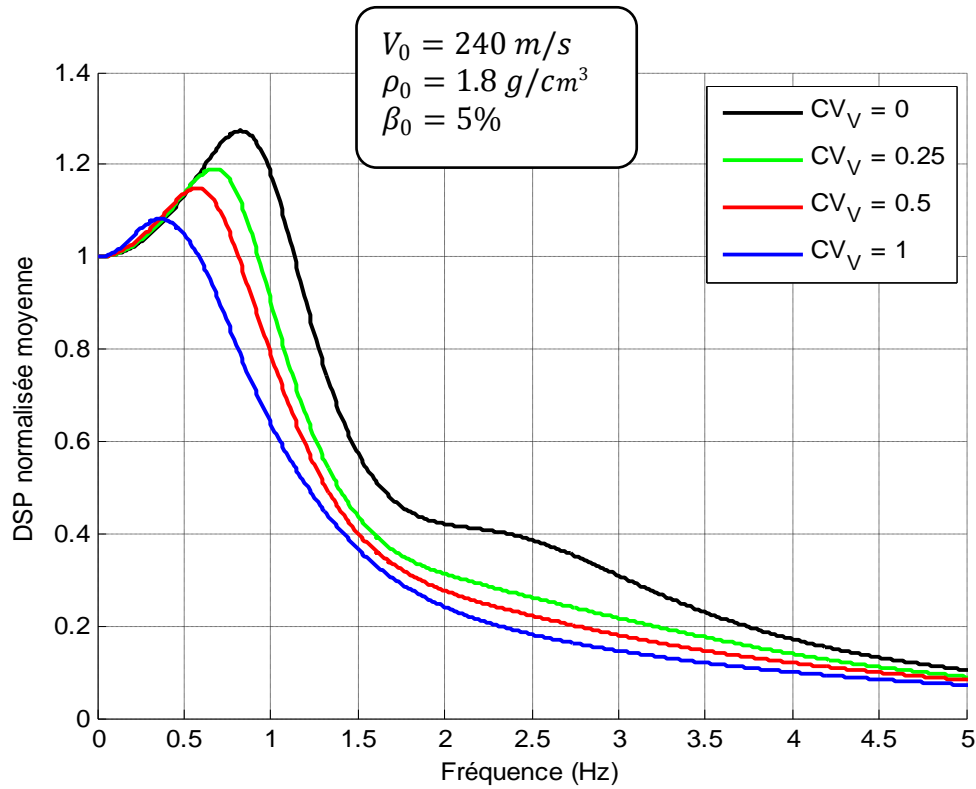


Figure 3.22: la DSP en fonction de la variabilité de la vitesse de cisaillement pour différentes valeurs de CV_{V_s} de dépôts alluvial (sable).

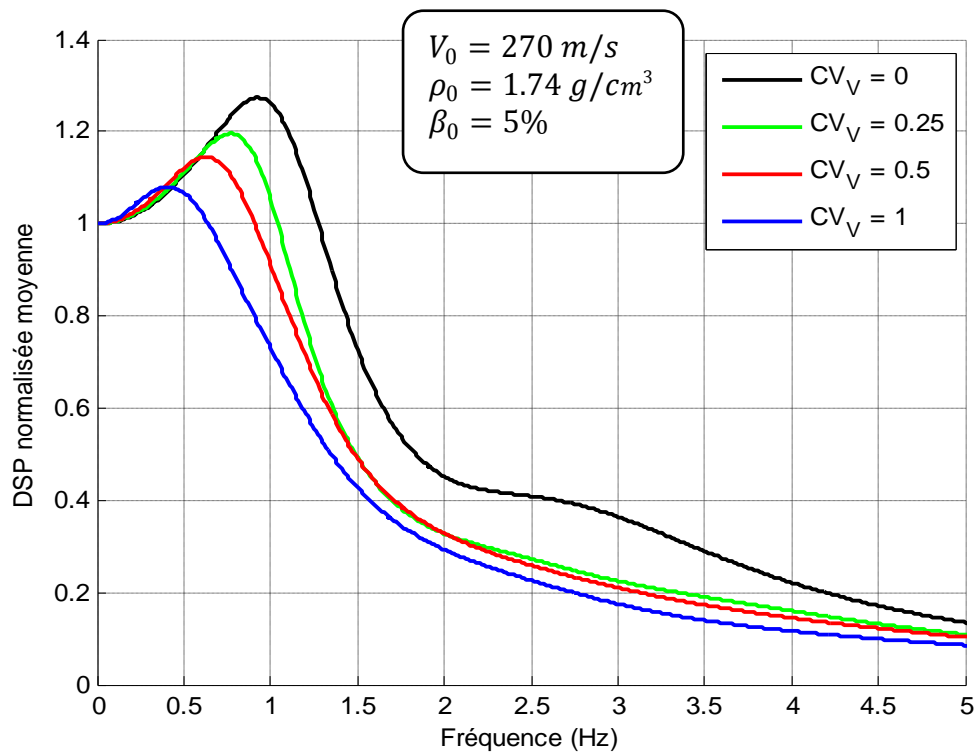


Figure 3.23: la DSP en fonction de la variabilité de la vitesse de cisaillement pour différentes valeurs de CV_{V_s} de dépôts alluvial (argile).

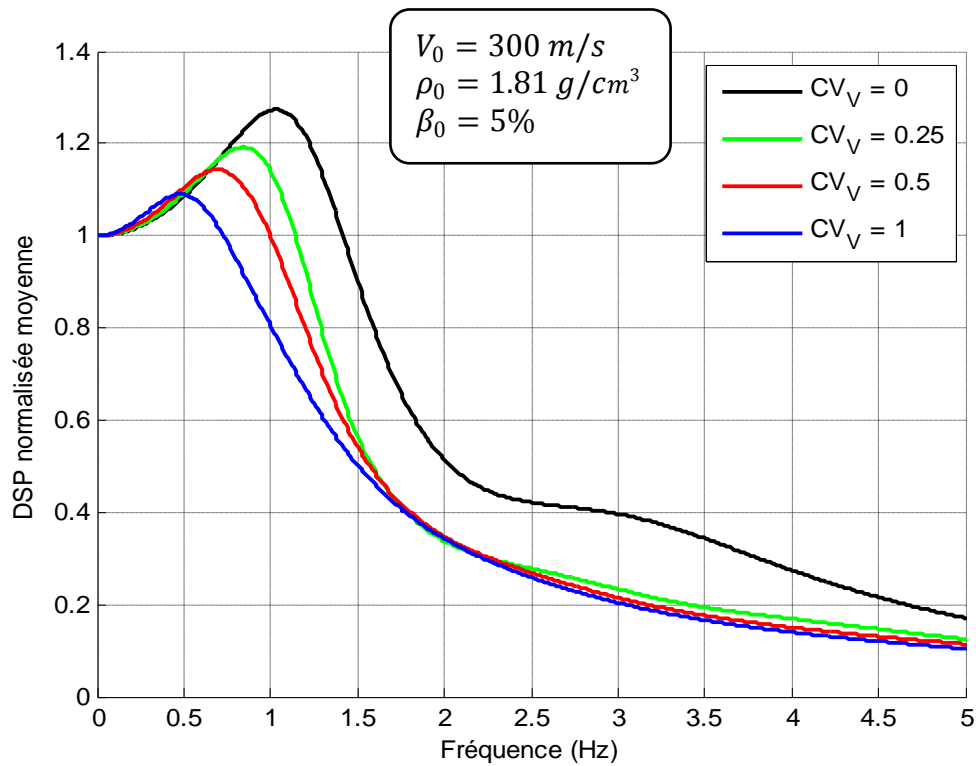


Figure 3.24: la DSP en fonction de la variabilité de la vitesse de cisaillement pour différentes valeurs de CV_{V_s} de dépôts alluvial ancien.

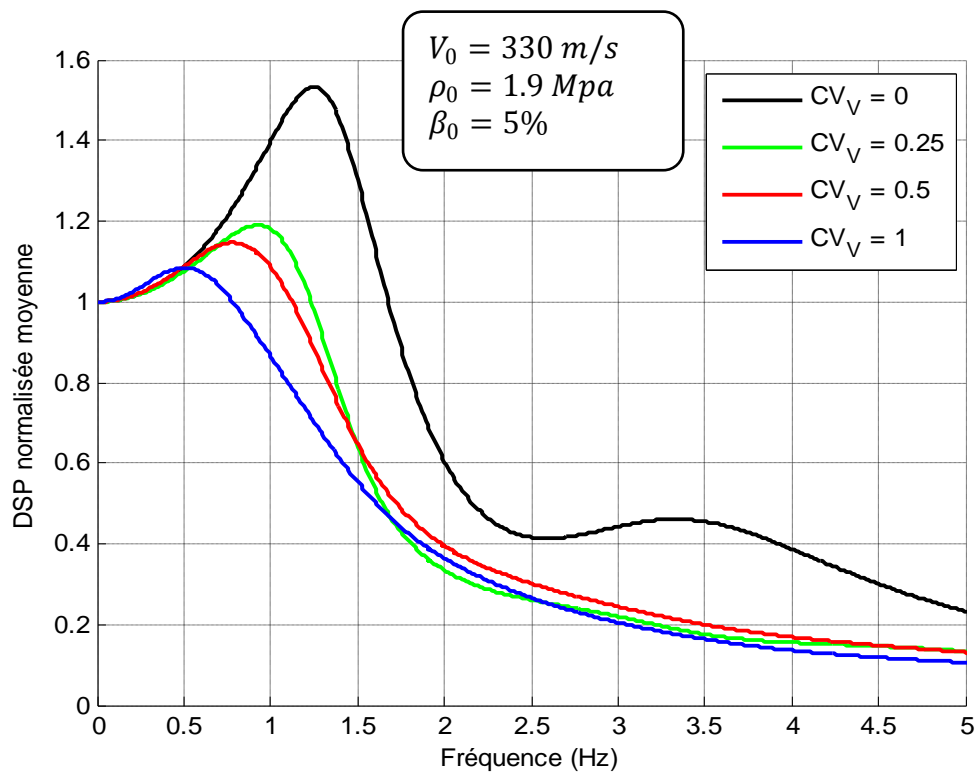


Figure 3.25: la DSP en fonction de la variabilité de la vitesse de cisaillement pour différentes valeurs de CV_{V_s} de terrasse marine.

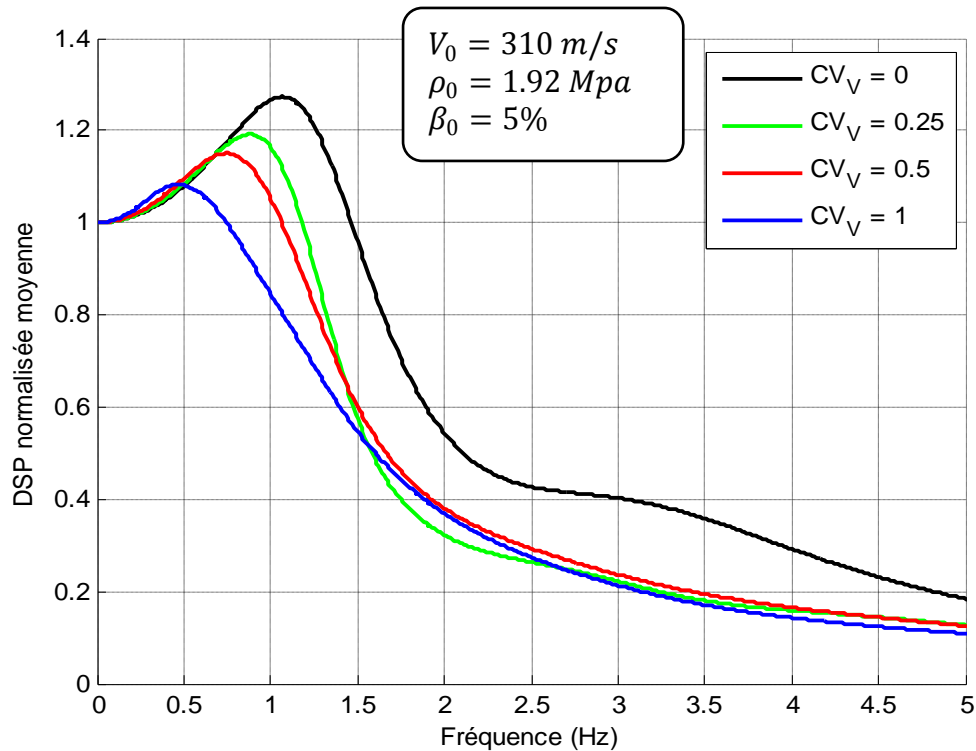


Figure 3.26: la DSP en fonction de la variabilité de la vitesse de cisaillement pour différentes valeurs de CV_{V_s} de Grés calcaires et Couches hastienne.

3.4 Conclusions

Dans ce chapitre, on a présenté une formulation stochastique pour la simulation des propriétés du sol non bornées et bornées, ainsi, on associe à la variable aléatoire non bornée la loi de distribution lognormale, et à la variable aléatoire bornée la loi de distribution beta. Cette technique permet de calculer analytiquement les paramètres de la distribution beta connaissant les données statistiques à savoir, la moyenne, l'écart type et les valeurs extrêmes, et ensuite sa variabilité par le processus d'itérations via la technique proposée.

La technique de simulation utilisée pour modéliser la DSP pour différentes valeurs de CV_p et CV_{V_s} . La variabilité de la fonction de densité spectrale de puissance (DSP) est analysée. Les propriétés aléatoires du sol considérées sont la vitesse de cisaillement et le paramètre de non homogénéité p , modélisées par des champs aléatoires, en considérant la corrélation Gaussienne. Le champ aléatoire pour la vitesse de cisaillement est obtenu en adoptant la distribution lognormale, qui permet d'analyser sa grande variabilité. Pour le

paramètre de non homogénéité p , qui est des paramètres bornés dans la pratique entre deux valeurs extrêmes, leurs champs aléatoires sont obtenus en utilisant la distribution beta.

Il ressort des résultats obtenus que l'augmentation des coefficients de variation du paramètre de non homogénéité et de la vitesse de cisaillement provoque un effet de filtrage qui fait glisser la fréquence fondamentale du système vers les basses fréquences, et provoque l'atténuation des fréquences élevées. Par ailleurs, on observe que l'augmentation de CV_p induit une augmentation de l'amplification ce qui représente en soi un facteur favorable, par contre que l'augmentation de CV_{V_s} induit une diminution de l'amplification.

Comme synthèse, on peut dire, que les paramètres qui ont une influence prépondérante sur la DSP d'un profil de sol, sont la vitesse de cisaillement et le paramètre de non homogénéité p .

Chapitre 4

**Effets de la variabilité spatiale due
aux effets de site sur les structures
modélisées en poutres continues**

4.1 Introduction

Le phénomène d'amplification du mouvement sismique en présence de dépôts de sol meubles est connu. Les amplitudes du mouvement sismique augmentent significativement en surface libre d'un site, plusieurs chercheurs ont analysé ce phénomène et ont développé un certain nombre de modèles analytiques de la fonction d'amplification de site. La composante de la fonction de cohérence concernant l'effet de site requiert la caractérisation des profils de sol sous chaque appui en termes de fonction d'amplification pour son introduction. Les modèles de fonction d'amplification proposés dépendent de plusieurs facteurs complexes : le champ d'onde incident qui peut être proche, contenant les ondes de volume ou de surface, la modélisation du site en 1D, 2D ou 3D et le comportement mécanique des différentes couches de sol qui constituent le site (viscoélastiques, non linéaire, bi-phasique,...). En général, les modèles analytiques basés sur la linéarité et une modélisation 1D de la structure du site traduisent assez fidèlement la physique du phénomène (effets de contraste d'impédance entre les couches de sol, superficielles et le substratum rocheux et la variation des caractéristiques mécaniques des couches en profondeur) et conduisent par conséquent à des conclusions représentatives.

4.2 Description les effets de site

Les effets de site sont des phénomènes vibratoires spécifiques qui se développent en présence de formations géologiques de caractéristiques mécaniques différentes ou de perturbation géométriques de la surface libre. De manière systématique les dégâts sur les bâtiments et structures implantés sur le rocher sont moindres que pour ceux fondés en terrains sédimentaires. (Figure 4.1)

D'un point de vue du chercheur, ce phénomène est très important car il concerne les nombreuses villes ou sites industriels qui se sont développés sur les dépôts sédimentaires récents pour profiter de la proximité de cours d'eau ou de la mer.

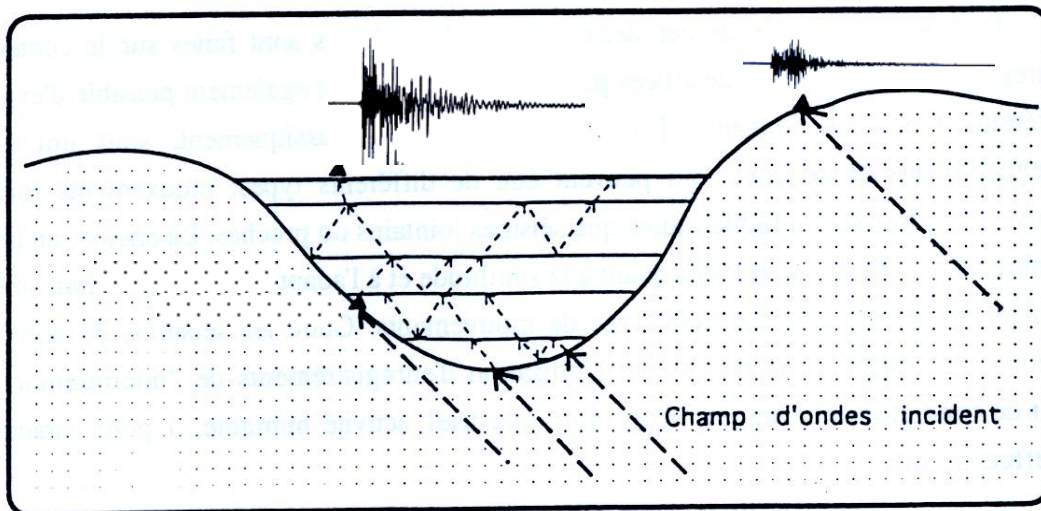


Figure 4.1 : Effets de site dus au piégeage des ondes sismique dans les couches de dépôts (meubles)

L'amplification résulte du 'piégeage' des ondes sismiques qui se produit dans certaines configuration stratigraphiques ou topographiques (bassin sédimentaires, reliefs accusés, ...). Leur calcul est théoriquement possible si l'on dispose de données précises sur la géométrie des couches de terrain, leurs caractéristiques géotechniques, et sur le champ d'ondes incident. En pratique, ces données sont rarement disponibles et le seul cas pour lequel ce calcul est couramment pratiqué est celui de la stratigraphie horizontale avec un champ d'ondes incident à propagation verticale, qui correspond à une situation fréquemment rencontrée et ne nécessite qu'un volume de données assez faible (essentiellement le profil d'évolution des modules de cisaillement, ou de la vitesse des ondes S, en fonction de la profondeur).

Il existe différentes méthodes pour estimer les effets de site :

- Les techniques expérimentales empiriques qui utilisent les enregistrements du mouvement sismique ou bien les bruits de fond pour estimer les fonctions de transfert.
- Les méthodes empiriques basées sur la classification des sites, la moyenne des vitesses d'ondes de cisaillement, des relations d'amplifications,...
- Les méthodes théoriques, basées sur la propagation des ondes sismiques à travers un modèle unidimensionnel, 2D ou bien 3D, l'avantage de ces méthodes est que différents types d'ondes avec différents angles d'incidence peuvent être utilisées.
- Et les méthodes hybrides.

Quand la structure géologique du site ainsi que les données géotechniques des différentes couches de sol constituant le site sont disponibles, les méthodes analytiques sont les plus utilisées. L'une des plus utilisée est la propagation verticale des ondes sismiques planes S dans un milieu stratifié. Les paramètres requis pour cette analyse sont les densités, les épaisseurs, l'amortissement matériel et les modules de cisaillement de chaque couche. La détermination des différents modules de cisaillement est relativement coûteuse et onéreuse, des chercheurs ont proposé des variations de module de cisaillement d'un profil de sol qui augmentent avec la profondeur en puissance M . (Idriss and Seed 1968 ; Afra and Pecker 2002 ; Hadid and Afra 2000). Pour ces modèles, il suffit d'avoir le module de cisaillement maximal. Le modèle proposé par ces auteurs est utilisé dans la présente étude afin de déterminer les fonctions de transfert des colonnes de sol sous chaque appui qui serviront à la détermination de la composante « effet de site » de la fonction de cohérence.

4.3 Fonction de cohérence due aux effets de site

En tenant en compte seulement de l'effet de site, l'expression analytique de l'intensité spectrale de puissance entre deux stations données k et l est définie comme suit (A.Der Kiureghian, 1996 ; M. Hadid and H. Afra 2000)

$$S_{kl}(\omega, d_{kl}) = \gamma_{kl}(\omega, d_{kl})^{\text{Effet de site}} \sqrt{S_{kk}(\omega)S_{ll}(\omega)}$$

avec $\gamma_{kl}(\omega, d_{kl})^{\text{Effet de site}}$ est la fonction de cohérence qui tient compte uniquement des effets de site, elle peut s'écrire aussi sous la forme :

$$\gamma_{kl}(\omega, d_{kl})^{\text{Effet de site}} = \exp(i\theta_{kl}(\omega)) \quad (4.2)$$

Où $i = \sqrt{-1}$ et $\theta_{kl}(\omega)$ est la phase spectrale définie complètement en terme des deux fonctions de transfert $\Lambda_k(\omega)$ et $\Lambda_l(\omega)$. Ces fonctions dépendent de la fréquence d'excitation et des caractéristiques géométriques et mécaniques du sol sous chaque appui k et l respectivement. La phase due à l'effet de site s'écrit alors :

$$\theta_{kl}(\omega) = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(H_k(\omega)H_l(-\omega))}{\text{Re}(H_k(\omega)H_l(-\omega))} \right] \quad (4.3)$$

d_{kl} est la distance entre les appuis k et l ; $S_{kk}(\omega)$ et $S_{ll}(\omega)$ sont les fonctions de densité spectrale de puissance de l'accélération à la surface libre de chaque station k et l , respectivement. La densité spectrale de puissance au substratum rocheux est supposée constante et égale à S_0 (bruit blanc). On note aussi que les expressions mathématiques *exp*, *tan*, *Im* et *Re* désignent les fonctions : exponentielle, tangente, partie imaginaire et partie réelle, respectivement.

4.4 Evaluation des réponses stochastiques des structures soumises à des excitations sismiques variables

La théorie des vibrations aléatoires a été utilisée pour l'examen des effets de la variabilité spatiale sur les structures importantes et étendues, pour la première fois, au début des années 70 par (Sandi), (Hindy et Novak) ont présenté la première analyse stochastique de systèmes de pipelines soumis aux mouvements sismiques incohérents. (Abdel-Ghaffar et Rubin 1982.1983) ont évalué la réponse stochastique vibratoire de ponts suspendus soumis aux mouvements sismiques enregistrés à différentes stations.

Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux réponses de structures multi supportées via le concept de vibrations aléatoires stationnaires, linéaire. Pour un système soumis à des excitations sismiques à moyennes nulles (accélérations par exemple), représentées par leurs densités spectrales de puissance (DSP), sa réponse sera à moyenne nulle et décrite par sa DSP. Cette DSP pourra être utilisée pour évaluer la racine carrée de la moyenne carrée (RMS) de la réponse (qui nous renseigne sur la réponse maximale). Le passage de la spécification des excitations aux appuis par des DSP au spectre de réponse (le plus utilisé) constitue une approche très attractive en engineering.

Dans la présente thèse, nous avons détaillé et utilisé la méthode présentée par (Der Kiureghian et Neuenhofer 1992) , appelée MSRS (Multiple Support Response Spectra), pour l'évaluation des réponses qui sont données en terme de la moyenne des maxima (pics).

Pour se faire, nous allons décrire l'approche de vibrations aléatoires pour l'évaluation des réponses de systèmes discrets, multi-appuis et à plusieurs degrés de liberté, dans une première partie. Une partie de notre application concerne les systèmes de poutres continues, nous nous intéresserons à l'évaluation des réponses de système de poutres continues multi-appuis.

4.5 Equation du mouvement des systèmes multi appuis

4.5.1 Système continu

En premier lieu, il est important d'exposer la formulation des réponses maximales des structures soumises à un mouvement sismique uniforme.

➤ Mouvement sismique uniforme

Une formulation de la réponse dynamique maximale des structures soumises à un mouvement sismique uniforme a été développée par (Der Kiureghian 1980), en utilisant la théorie des vibrations aléatoires. Cette formulation tient compte des inter-corrélations entre les modes. Or, la réponse pseudo-statique n'a pas été prise en considération. Alors, il est nécessaire d'exposer une formulation générale de la réponse totale des ponts soumis à des excitations parfaitement corrélées.

La réponse générale le long de la poutre, $Z(t, x)$ (déplacement, moment, effort tranchant, etc...), peut être exprimée de la manière suivante

$$Z(t, x) = Z_s(t, x) + Z_d(t, x) = a(x) u_g(t) + \sum_{k=1}^N b_k(x) s_k(t) \quad (4.4)$$

avec

$$s_k(t) = \frac{y_k(t)}{\gamma_k}$$

$Z_s(t, x)$ et $Z_d(t, x)$ sont, respectivement, les réponses pseudo-statique et dynamique.

$s_k(t)$ représente le déplacement dynamique d'un oscillateur simple de masse unitaire ayant une fréquence ω_k et un taux d'amortissement β_k et est appelé coordonnée modale.

$u_g(t)$ est le déplacement du sol.

N est le nombre de modes totale pris en considération.

$a(x)$ et $b_k(x)$ sont des coefficients dépendant des propriétés structurales (fonctions de forme statique et dynamique, les propriétés de rigidité de la structure, les facteurs de participation modale).

Le développement de l'expression de la réponse maximale est élaborée en utilisant la théorie des temps stochastique. La fonction de densité spectrale de puissance (DSP) de la réponse totale à pour expression suivant :

$$S_{ZZ}(\omega) = S_{Z_s Z_s}(\omega) + 2\text{Re}(S_{Z_s Z_d}(\omega)) + S_{Z_d Z_d}(\omega) = a^2(x)S_{u_g}(\omega) + 2a \sum_{k=1}^N b_k(\omega) \text{Re}(S_{u_g s_k}(\omega)) + \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N b_k(x)b_m(x)S_{s_k s_m}(\omega) \quad (4.5)$$

Où $S_{Z_s Z_s}(\omega)$ et $S_{Z_d Z_d}(\omega)$ sont, respectivement, les densités spectrales des réponses pseudo-statique et dynamique.

$S_{Z_s Z_d}(\omega)$ est la fonction d'inter-densité spectrale entre la réponse pseudo-statique et la dynamique.

$S_{u_g}(\omega)$ est la densité spectrale du déplacement du sol.

$S_{u_g u_k}(\omega)$ et $S_{s_k s_m}(\omega)$ sont, respectivement, la fonction d'inter-densité spectrale entre le déplacement du sol et le déplacement d'un oscillateur de fréquence ω_k et de taux d'amortissement β_k , et la fonction d'inter-densité spectrale entre les déplacement de deux oscillateurs de paramètres (ω_k, β_k) et (ω_m, β_m) .

En intégrant l'expression (4.5) sur le domaine des fréquences $(-\infty < \omega < +\infty)$, la variance de la réponse totale s'obtient (la moyenne carrée).

$$\sigma_Z^2 = \sigma_{Z_s}^2 + 2\text{cov}(Z_s, Z_d) + \sigma_{Z_d}^2 = a^2(x)\sigma_{u_g}^2 + 2a(x) \sum b_k(x) \rho_{u_g s_k} \sigma_{u_g} \sigma_{s_k} + \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N b_k(x)b_m(x) \rho_{s_k s_m} \sigma_{s_k} \sigma_{s_m} \quad (4.6)$$

Où $\sigma_{Z_s}^2$ et $\sigma_{Z_d}^2$ sont, respectivement, les variances des réponses pseudo-statique et dynamique.

$\text{cov}(Z_s, Z_d)$ est la variance entre la réponse pseudo-statique et la réponse dynamique.

σ_{u_g} et σ_{s_k} sont les écarts types du déplacement du sol et du déplacement de l'oscillateur (ω_k, β_k) .

$\rho_{u_g s_k}$ est le coefficient d'inter-corrélation entre le déplacement du sol et le déplacement de l'oscillateur (ω_k, β_k) .

En générale, la valeur moyenne du pic d'un processus stochastique peut être liée à la racine de la moyenne carrée du processus à travers un facteur de pic. Alors, en considérant que les

facteurs de pic sont approximativement égaux, la valeur moyenne de la réponse maximale prend l'expression suivante.

$$E[\max(Z(t, x))] = \left[E^2[\max(Z_s(t, x))] + C(Z_s, Z_d) + E^2[\max(Z_d(t, x))] \right]^{1/2} \quad (4.7)$$

La valeur moyenne de la réponse totale maximale est composée des parties pseudo-statique, et dynamique ainsi que la composante tenant compte de l'inter-covariance entre les réponses pseudo-statique et dynamique appelée composante dynamo-statique.

avec

$$\left\{ \begin{array}{l} E^2[\max(Z_s(t, x))] = a^2(x) E^2[\max(u_g(t))] \\ C(Z_s, Z_d) = 2E[\max(Z_s(t, x))] \sum_{k=1}^N \rho_{u_g s_k} E[\max(Z_{d,k}(t, x))] \\ E^2[\max(Z_d(t, x))] = \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N \rho_{s_k s_m} E[\max(Z_{d,k}(t, x))] E[\max(Z_{d,m}(t, x))] \end{array} \right. \quad (4.8)$$

$E[\max(Z_s(t, x))]$ et $E[\max(Z_d(t, x))]$ sont, respectivement, les réponses maximales moyennes des composantes pseudo-statique et dynamique.

$C(Z_s, Z_d)$ est la composantes dynamo-statique de la réponse totale maximale.

$E[\max(u_g(t))]$ est le déplacement maximale moyen du sol.

$E[\max(Z_{d,k}(t, x))]$ est la valeur moyenne de la réponse dynamique maximale du mode k. elle est donnée par

$$E[\max(Z_{d,k}(t, x))] = b_k(x) R(\omega_k, \beta_k) \quad (4.9)$$

où $R(\omega_k, \beta_k)$ est la spectre de réponse classique au niveau d'un site donné.

L'expression (4.9) est une règle de combinaison modale généralisée qui tient compte des inter-corrélations entre les modes. Elle est appelée la C.Q.C (complete quadratique combination) (Der Kiureghian 1991) et est adaptée au calcul dynamique de structures dont les modes sont partiellement corrélés.

Il est intéressant d'établir quelques facilement le calcul des réponses maximales des structures :

Lorsque les réponses pseudo-statique et dynamique sont parfaitement corrélées, la valeur moyenne de la réponse totale maximale devient

$$E[\max(Z(t, x))] = [E[\max(Z_s(t, x))] + E[\max(Z_d(t, x))]] \quad (4.10)$$

Lorsque les réponses pseudo-statique et dynamique sont non corrélées, la valeur moyenne de la réponse totale maximale prend la forme suivante

$$E[\max(Z(t, x))] = [E^2[\max(Z_s(t, x))] + E^2[\max(Z_d(t, x))]]^{1/2} \quad (4.11)$$

Lorsque les fréquences modales sont légèrement séparées, les réponses modales sont considérées parfaitement corrélées et la valeur moyenne de la réponse dynamique maximale devient égale à la somme des valeurs moyennes des réponses modales maximales.

$$E[\max(Z_d(t, x))] = \left| \sum_{k=1}^N E[\max(Z_{d,k}(t, x))] \right| \quad (4.12)$$

Lorsque les fréquences modales sont éloignées les unes par rapport aux autres, les réponses modales deviennent non corrélées et par conséquent, les coefficients d'inter-corrélation modale, $\rho_{s_k s_m}$ s'annulent pour $k \neq m$. La valeur moyenne de la réponse dynamique maximale est égale à la racine carrée de la somme des carrées des valeurs moyennes des réponses modales maximales (SRSS).

$$E[\max(Z_d(t, x))] = \left[\sum_{k=1}^N E[\max(Z_{d,k}(t, x))] \right]^{1/2} \quad (4.13)$$

➤ **Mouvement sismique non uniforme avec des conditions locales du site identiques**

Examinons maintenant le cas de structures sollicitées par des excitations multiples partiellement corrélées et pour lesquelles les conditions géologiques locales sont identiques au niveau de tous les appuis ($S_{\ddot{u}_i}(\omega) = S_{\ddot{u}_g}, i = 1, \dots, n$) la réponse totale le long de la poutre $Z(t, x)$, peut être exprimée par une combinaison linéaire des déplacements des appuis (composante pseudo-statique) et des coordonnés modales (composante dynamique).

$$Z(t, x) = \sum_{i=1}^n a_i(x)u_i(t) + \sum_{k=1}^N b_k(x)s_k(t) \quad (4.14)$$

où $a_i(x)$ est un facteur d'influence pseudo-statique dû à un déplacement unitaire du support i .
la fonction de densité spectrale de puissance de la réponse totale est égale

$$S_{ZZ}^P(\omega) = S_{Z_s Z_s}^P(\omega) + 2 \operatorname{Re}[S_{Z_s Z_d}^P(\omega)] + S_{Z_d Z_d}^P(\omega) \quad (4.15)$$

Où $S_{Z_s Z_s}^P(\omega)$ et $S_{Z_d Z_d}^P(\omega)$ sont, respectivement, les densités spectrales des composantes pseudo-statique et dynamique, $S_{Z_s Z_d}^P(\omega)$ est la fonction d'inter-densité spectrale entre les composantes pseudo-statique et dynamique. P indique la corrélation partielle entre les excitations. Elles ont les expressions suivantes :

$$\begin{cases} S_{Z_s Z_s}^P(\omega) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i(x)a_j(x)S_{u_i u_j}(\omega) \\ S_{Z_s Z_d}^P(\omega) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^N a_i(x)b_k(x)S_{u_i s_k}^P(\omega) \\ S_{Z_d Z_d}^P(\omega) = \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N b_k(x)b_m(x)S_{s_k s_m}^P(\omega) \end{cases} \quad (4.16)$$

Où $S_{u_i u_j}(\omega)$ est la fonction d'inter-densité spectrale entre les déplacements des appuis i et j .
 $S_{u_i s_k}^P(\omega)$ est la fonction d'inter-densité spectrale entre spectrale entre les déplacements du support i et le déplacement modal, s_k .

$S_{s_k s_m}^P(\omega)$ est la fonction d'inter-densité spectrale entre les coordonnées modales, s_k et s_m .
En intégrant la fonction de densité spectrale de la réponse totale sur le domaine des fréquences, on obtient l'expression de sa variance

$$(\sigma_Z^P)^2 = (\sigma_{Z_s}^P)^2 + 2 \operatorname{cov}^P(Z_s, Z_d) + (\sigma_{Z_d}^P)^2 \quad (4.17)$$

$\sigma_{Z_s}^P$ et $\sigma_{Z_d}^P$ sont, respectivement, les écarts types des composantes pseudo-statique et dynamique pour le cas d'excitations partiellement corrélées.

$\operatorname{cov}^P(Z_s, Z_d)$ est la fonction d'inter-covariance entre les composantes pseudo-statique et dynamique. Ces trois termes sont définis par

$$\left\{ \begin{array}{l} (\sigma_{Z_s}^P)^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i(x) a_j(x) \rho_{u_i, u_j} \sigma_{u_g}^2 \\ \text{cov}^P(Z_s, Z_d) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^N a_i(x) b_k(x) \rho_{u_i, s_k}^P \sigma_{u_g} \sigma_{s_k}^P \\ (\sigma_{Z_d}^P)^2 = \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N b_k(x) b_m(x) \rho_{s_k, s_m}^P \sigma_{s_k}^P \sigma_{s_m}^P \end{array} \right. \quad (4.18)$$

σ_{u_i} est l'écart type du déplacement du support i et $\sigma_{s_k}^P$ est l'écart type de la coordonnée modale s_k , correspondant au mouvement sismique non uniforme.

ρ_{u_i, u_j} est le coefficient d'inter-corrélation entre les déplacements des supports i et j .

En multipliant la variance de la réponse totale par son facteur de pic et en considérant que le rapport des facteurs de pic est approximativement égal à l'unité, on obtient l'expression de la valeur moyenne de la réponse totale maximale

$$E^P[\max(Z(t, x))] = \left[\left(E^P[\max(Z_s(t, x))] \right)^2 + C^P(Z_s, Z_d) + \left(E^P[\max(Z_d(t, x))] \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.19)$$

$E^P[\max(Z_s(t, x))]$ et $E^P[\max(Z_d(t, x))]$ sont, respectivement, les valeurs moyennes des réponses pseudo-statique et dynamique maximales pour le cas d'un input sismique non uniforme.

$C^P(Z_s, Z_d)$ est la composante dynamo-statique de la réponse totale maximale pour le cas d'excitations partiellement corrélées.

Pour le cas d'excitation sismiques partiellement corrélées, ces composantes ont les expressions suivantes

- La composante pseudo-statique

$$\left(E^P[\max(Z_s(t, x))] \right)^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{u_i, u_j} E^P[\max(Z_{s,i}(t, x))] E^P[\max(Z_{s,j}(t, x))] \quad (4.20)$$

avec
$$E^P[\max(Z_{s,i}(t, x))] = a_i(x) E[\max(u_g(t))] \quad (4.21)$$

$E^P[\max(Z_{s,i}(t,x))]$ est la valeur moyenne de la réponse pseudo-statique maximale le long de la poutre due au déplacement du support i .

- La composante dynamique

$$(E^P[\max(Z_d(t,x))])^2 = \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N \rho_{s_k s_m}^P E^P[\max(Z_{d,k}(t,x))] E^P[\max(Z_{d,m}(t,x))] \quad (4.22)$$

$$E^P[\max(Z_{d,k}(t,x))] = b_k(x) R^P(\omega_k, \beta_k)$$

$E^P[\max(Z_{d,k}(t,x))]$ est la valeur moyenne de la réponse dynamique maximale du mode k .

$R^P(\omega_k, \beta_k)$ est le spectre de réponse modifié.

- La composante dynamo-statique

$$C^P(Z_s, Z_d) = 2 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^N \rho_{u_i s_k} E^P[\max(Z_{s,i}(t,x))] E^P[\max(Z_{s,k}(t,x))] \quad (4.23)$$

4.5.2 Systèmes discrets

➤ Structures soumises à des composantes sismiques multi-directionnelles

Soit d'un séisme structure est soumise, en réalité, à un champ d'excitations à la base. Ce champ peut être modélisé par un vecteur d'excitations, U , dont chaque composante représente un degré de liberté du support. Soit une structure à N degrés de liberté, à n supports dont chacun présente 6 degrés de liberté, 3 composantes translationnelles et 3 composantes rotationnelles dans le cas d'un mouvement sismique non uniforme, $u = [u_i]^T, i=1, \dots, 6$, classiquement amortie, et soumise à des excitations parfaitement ou partiellement corrélées avec des conditions géologiques locales variables ou invariables.

Les composantes pseudo-statiques et dynamiques du vecteur des réponses totales de la structure.

$$\begin{cases} Z_s(t) = -\psi K_s^{-1} K_{sb} U_b(t) = a U_b(t) \\ Z_d(t) = \psi \phi Y(t) = b S(t) \end{cases} \quad (4.24)$$

avec $U_b(t)$ est le vecteur déplacement à 6n composantes et K_{sb} est la matrice de rigidité ($N \times 6n$).

$Y(t)$ est le vecteur des coordonnées modales. Il est défini par

$$\begin{cases} Y = [y_k] \\ y_k = \sum_{p=1}^6 \gamma_{kp} S_{kp} \end{cases} \quad (4.25)$$

et $S = [s_{kp}]^T$, $p = 1, \dots, 6$; $k = 1, \dots, N$

γ_{kp} est le facteur de participation du mode k dû à la composante p . Il a pour expression (4.26)

$$\gamma_{kp} = \frac{\phi_k^T M_s T_{sp}}{\phi_k^T M_s \phi_k} \quad (4.26)$$

T_{sp} est le vecteur d'influence de la réponse d'un corps rigide due à la composante sismique p . La $l^{\text{ème}}$ composante du vecteur des réponses totales, $Z(t)$, peut être définie par l'expression suivante

$$\begin{aligned} z_l(t) &= a_l U_b(t) + b_l S(t) = \sum_{p=1}^6 \sum_{i=1}^n a_{lip} u_{ip}(t) + \sum_{p=1}^6 \sum_{k=1}^N b_{lkp} S_{kp}(t) \\ &= z_s^l(t) + z_d^l(t) \end{aligned} \quad (4.27)$$

En suivant la procédure du développement de la valeur moyenne de la réponse maximale, faite pour les systèmes continus, on obtient l'expression de la valeur moyenne des réponses maximales, $z_l(t)$, pour les systèmes discrets soumis à des excitations multi-directionnelles partiellement ou parfaitement corrélées.

➤ **Mouvement sismique uniforme**

- La composante pseudo-statique

$$\left(E[\max(Z_s^l(t))] \right)^2 = \sum_{p=1}^3 \sum_{q=1}^3 \rho_{u_{gp} u_{gq}} E[\max(Z_{s,p}^l(t))] E[\max(Z_{s,q}^l(t))] \quad (4.28)$$

avec $E[\max(Z_{s,p}^l(t))] = a_{lp} E[\max(u_{gp}(t))]$

où $a_{lp} = \sum_{i=1}^n a_{lip}$

- La composante dynamique

$$\left(E\left[\max\left(Z_d^l(t)\right)\right]\right)^2 = \sum_{p=1}^3 \sum_{q=1}^3 \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N \rho_{u_{ip}u_{mq}} E\left[\max\left(Z_{d,kp}^l(t)\right)\right] E\left[\max\left(Z_{d,mq}^l(t)\right)\right] \quad (4.29)$$

avec
$$E\left[\max\left(Z_{d,kp}^l(t)\right)\right] = b_{lkp} R_p(\omega_k, \beta_k)$$

- La composante dynamo-statique

$$C(Z_s^l, Z_d^l) = 2 \sum_{p=1}^3 \sum_{q=1}^3 \sum_{k=1}^N \rho_{u_{sp}u_{kq}} E\left[\max\left(Z_{s,p}^l(t)\right)\right] E\left[\max\left(Z_{d,kq}^l(t)\right)\right] \quad (4.30)$$

➤ **Mouvement sismique non uniforme**

- La composante pseudo-statique

$$\left(E^P\left[\max\left(Z_s^l(t)\right)\right]\right)^2 = \sum_{p=1}^3 \sum_{q=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{u_{ip}u_{jq}} E^P\left[\max\left(Z_{s,ip}^l(t)\right)\right] E^P\left[\max\left(Z_{s,jq}^l(t)\right)\right] \quad (4.31)$$

avec
$$E^P\left[\max\left(Z_{s,ip}^l(t)\right)\right] = a_{lip} E\left[\max\left(u_{ip}(t)\right)\right]$$

- La composante dynamique

$$\left(E^P\left[\max\left(Z_d^l(t)\right)\right]\right)^2 = \sum_{p=1}^6 \sum_{q=1}^6 \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N \rho_{s_{kp}s_{mq}}^P E^P\left[\max\left(Z_{d,kp}^l(t)\right)\right] E^P\left[\max\left(Z_{d,mq}^l(t)\right)\right] \quad (4.32)$$

avec
$$E^P\left[\max\left(Z_{d,kp}^l(t)\right)\right] = b_{lkp} R_p^P(\omega_k, \beta_k)$$

- La composante dynamo-statique

$$C(Z_s^l, Z_d^l) = 2 \sum_{p=1}^6 \sum_{q=1}^6 \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \rho_{u_{ip}u_{kq}}^P E^P\left[\max\left(Z_{s,ip}^l(t)\right)\right] E^P\left[\max\left(Z_{d,kq}^l(t)\right)\right] \quad (4.33)$$

Il est important de signaler que les composantes sismiques rotationnelles ont des effets négligeables sur les réponses des structures comparés à ceux dus aux composantes translationnelles. Lorsque les directions principales des composantes sismiques translationnelles ne sont pas suivant celles de la structure, les composantes sismiques, sollicitant la structure, sont considérées partiellement. De plus cette faible corrélation disparaît si les composantes horizontales ont des intensités approximativement similaires. En d'autres termes ces composantes sismiques sont considérées, généralement, non corrélées ou indépendantes. En conséquence, la valeur moyenne de la réponse maximale $z_l(t)$, est égale à la racine carrée de la somme des carrés des valeurs moyennes des réponses maximales dues aux composantes sismiques (règle SRSS).

$$E^P[\max(z_l(t))] = \left(\sum_{p=1}^3 (E^P[\max(z_{lp}(t))]^2) \right)^{1/2} \quad (4.34)$$

avec $E^P[\max(z_{lp}(t))]$ est la valeur moyenne de la $l^{\text{ème}}$ réponse maximale due à la composante sismique p .

4.6 Application

4.6.1 Description de l'application

Une étude paramétrique des effets de site dus aux conditions de sol différentes sous chaque appui d'une structure de poutre continue à deux travées (figure 4.2) est faite en analysant les réponses stochastiques maximales sous excitations multiples.

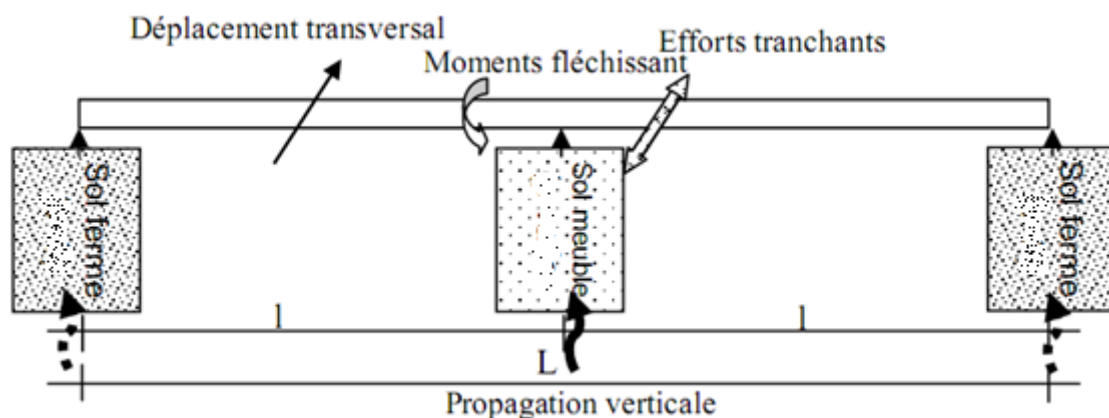


Figure 4.2 : Modèle de structure pris dans l'application

La méthode de spectre de réponse pour l'analyse des structures soumises à des excitations multiples, proposée par (Der Kiureghian et Neuenhofer 1992) est utilisée, La moyenne des réponses maximales est donnée par l'expression (4.34).

Les effets d'incohérence et de passage d'onde ne sont pas considérés dans cette application.

Les réponses sous excitation incohérentes (effet de site) sont comparées à celles obtenues dans le cas d'excitation uniforme. Cette dernière obtenue en supposant que le sol sous les trois appuis ferme et ayant les caractéristiques du tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Caractéristiques des colonnes de sol

$V_0(m/s)$	$\rho_s(t/m^3)$	p	q
540	1.88	0.35	0.76
320	1.96	0.58	0.52
200	1.98	0.8	0.22

La vitesse des ondes de cisaillement du substratum est de $800 m/s$, sa masse volumique est $2.2 t/m^3$

La vibration de la structure due aux excitations aux supports transversales est analysée. Les réponses le long de la poutre considérées dans l'analyse sont : les déplacements transversaux, les moments fléchissant (autour de l'axe vertical) et les efforts tranchants.

Les appuis de la structure sont fondés sur des sols ayant des conditions différentes. L'appui intermédiaire est fondé dans un sol non homogène avec le paramètre p qui varie de 0.35 pour un sol ferme (profil de $H=30m$) à 0.8 pour un sol très meuble. Les appuis extrêmes sont fondés sur un sol homogène ferme ($p=0.35$). Dans le cas où tous les paramètres aux trois supports sont identiques et caractérisent un sol ferme, la structure vibre sous excitation uniforme, sinon l'excitation est variable et la corrélation entre excitations décroît graduellement avec l'augmentation de p . Il est à noter que le changement du paramètre de non homogénéité induit un changement dans le rapport d'impédance et le taux d'amortissement du sol, plus p augmente plus l'amortissement et l'impédance diminuent et le sol devient plus meuble. Les caractéristiques de chaque colonne de sol (figure 4.2), d'épaisseur de 30 m, sont listées dans le tableau 4.1.

La fonction de densité spectrale de puissance des accélérations aux supports est celle du filtre de *Kanai-Tajimi* avec les paramètres estimés à partir des équations (1.11), en utilisant les fonctions d'amplification des profils de sol sous chaque appui. est l'amplitude du spectre de l'excitation au substratum rocheux, ce dernier est considéré comme bruit blanc (constante) $S_0 = 1$.

Le mouvement à chaque appui est dû à une propagation verticale. Les spectres moyens sont définis de telle sorte qu'ils soient compatibles avec les DSP des accélérations en surface représentées par les filtres de *Kanai-Tajimi* avec des paramètres déduits à partir des fonctions d'amplification des colonnes de sol sous les appuis. Le déplacement maximal de l'appui extrémité (sol ferme) est égal à 0.10 m. Ce déplacement varie à l'appui intermédiaire en fonction de la nature du sol sous cet appui.

4.6.2 Les effets sur la moyenne des maxima des déplacements

Les composantes dynamiques des déplacements sont maximales à mi-travées (les parties flexibles) quelque soit le degré d'inhomogénéité du sol à l'appui intermédiaire, en d'autres termes, quelque soit le cas d'excitation. L'effet de site n'affecte pas les composantes dynamiques autour des appuis, ailleurs, une légère différence est à noter tel que montré sur la figure 4.3. En analysant de près cette différence, nous notons que les déplacements dynamiques induits par l'excitation uniforme sont supérieurs à ceux induits par les excitations variables dues aux conditions de sol différentes quand la fréquence du sol est plus grande que celle la fréquence fondamentale de la structure.

Les composantes pseudo-statiques sont montrées sur la figures 4.4, elles sont constantes le long de la poutre dans le cas de conditions de sol identiques avec $p=0.35$ (mouvement de corps rigide) et égal à la valeur moyenne du déplacement maximum du sol ferme (10 cm).

Pour différents paramètres d'inhomogénéité, un déplacement différentiel apparait, variant entre la valeur moyenne maximale du déplacement du sol aux appuis extrêmes qui correspond à $p=0.35$ et celle de l'appui intermédiaire qui correspond à différentes valeurs de p . Plus p augmente, plus la contribution de la composante pseudo-statique augmente.

La covariance entre les composantes dynamique et pseudo-statique (dynamo-statique) est faiblement corrélée et peut être négligée (figure 4.5). En conséquence, le déplacement maximum total (figure 4.6) est contrôlé par la contribution des composantes pseudo-statiques. Il augmente avec l'augmentation du degré d'inhomogénéité et la réduction du rapport d'impédance. Les valeurs extrêmes du déplacement total se produisent aux mi-travées dans le cas d'excitation uniforme, elles se décalent vers l'appui intermédiaire avec l'augmentation de p (perte de corrélation).

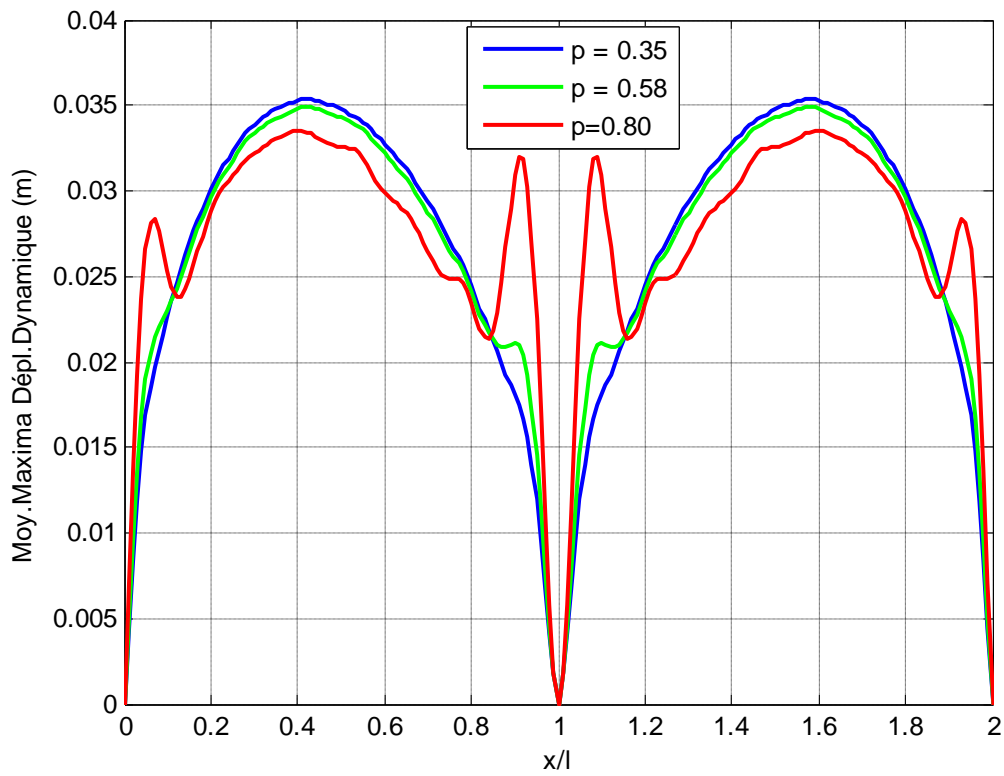


Figure 4.3 Moyenne des maxima des composantes dynamiques des déplacements

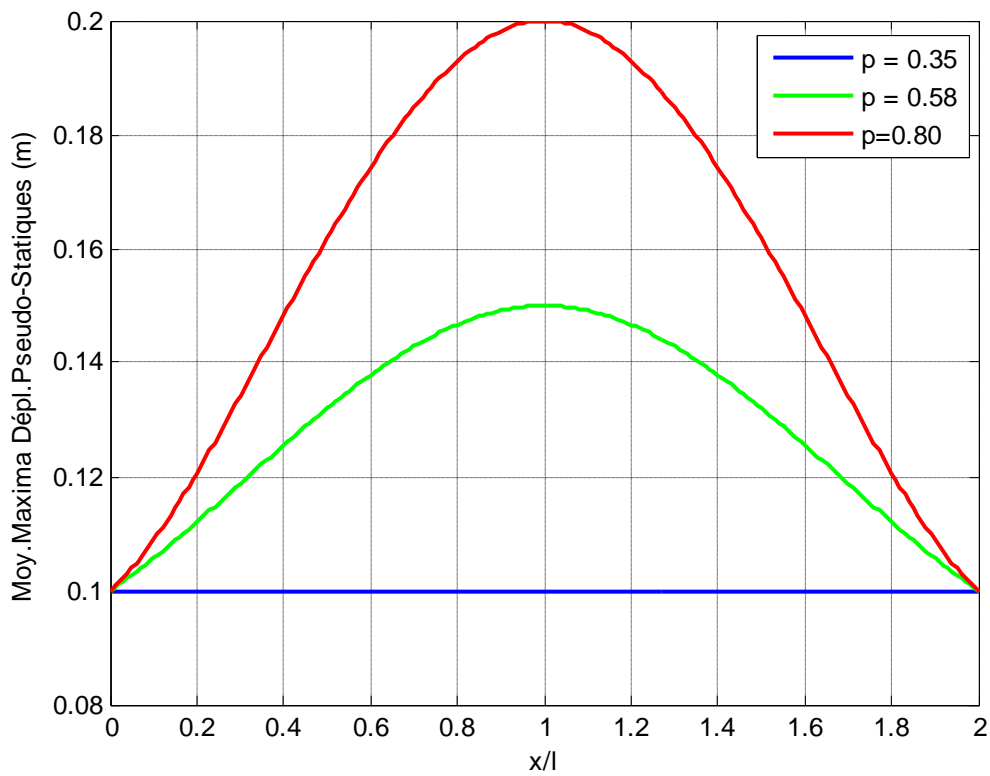


Figure 4.4 Moyenne des maxima des composantes pseudo-statiques des déplacements

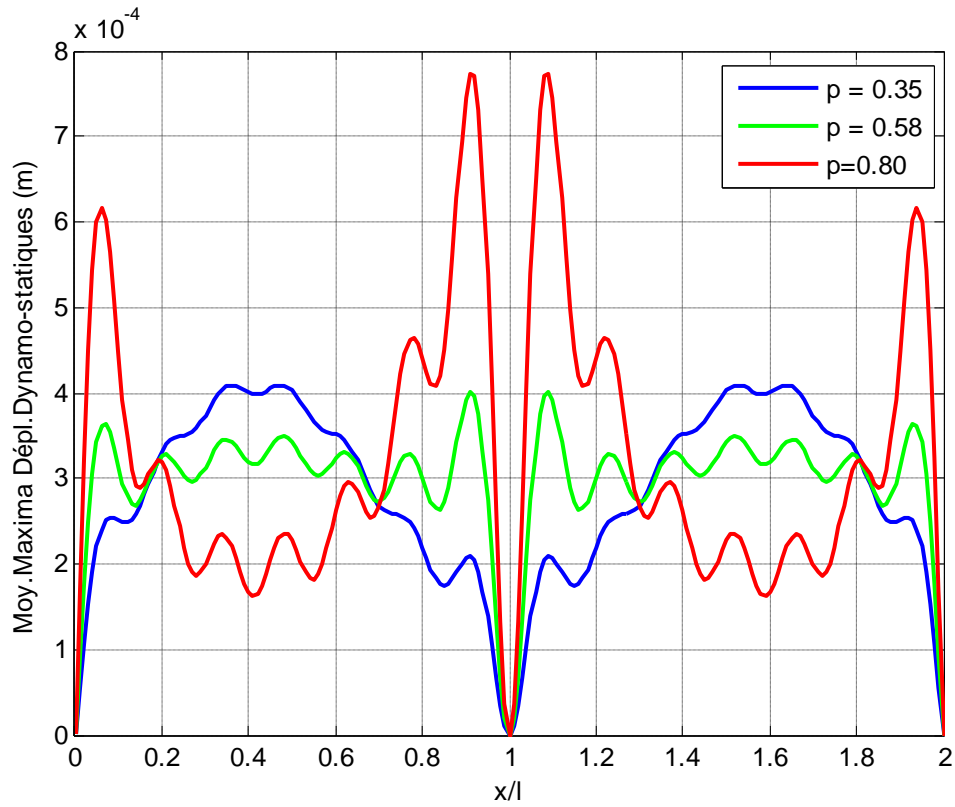


Figure 4.5 Moyenne des maxima des composantes dynamo-statiques des déplacements

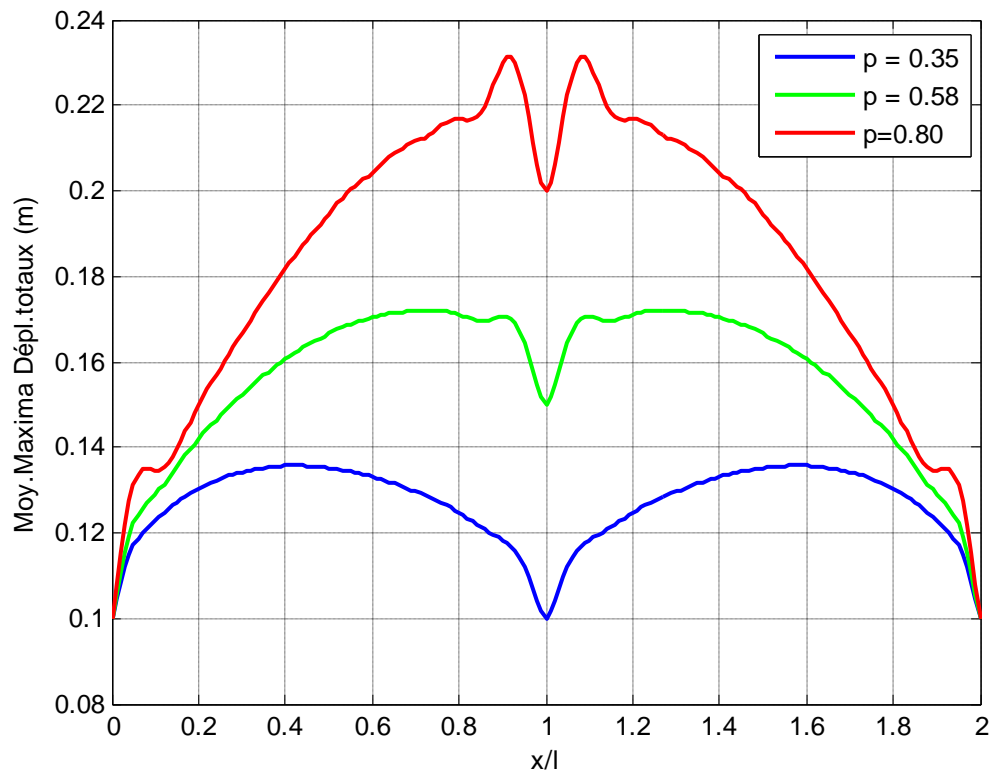


Figure 4.6 Moyenne des maxima des déplacements totaux

4.6.3 Les effets sur la moyenne des maxima des moments fléchissant

La composante dynamique du moment fléchissant est relativement pas sensible à l'effet de site (figure 4.7), elle est maximale autour de l'appui intermédiaire. La composante pseudo-statique qui ne contribue pas dans le cas d'excitation uniforme (figure 4.8) augmente avec l'augmentation du paramètre p . Elle varie linéairement de zéro aux appuis extrêmes à la valeur maximale, à l'appui intermédiaire. La covariance entre ces deux composantes montrée sur la figure 4.9, est maximale à l'appui intermédiaire où les deux composantes pseudo-statique et dynamique contribuent avec leurs valeurs maximales. Les sols ayant des valeurs faibles du paramètre p désignent des sols relativement fermes à fréquences dominantes plus importante que celle de la structure. Plus p augmente, le sol devient de plus en plus meuble et sa fréquence

Les moments fléchissants totaux sont donnés pour différentes valeurs de p sur la figure 4.10. Le long des quarts de travées, gauche et droite, le moment est essentiellement le même, l'influence des effets de site est importante ailleurs. Le moment fléchissant obtenu sous excitation uniforme est le plus faible, il augmente avec l'augmentation de p .

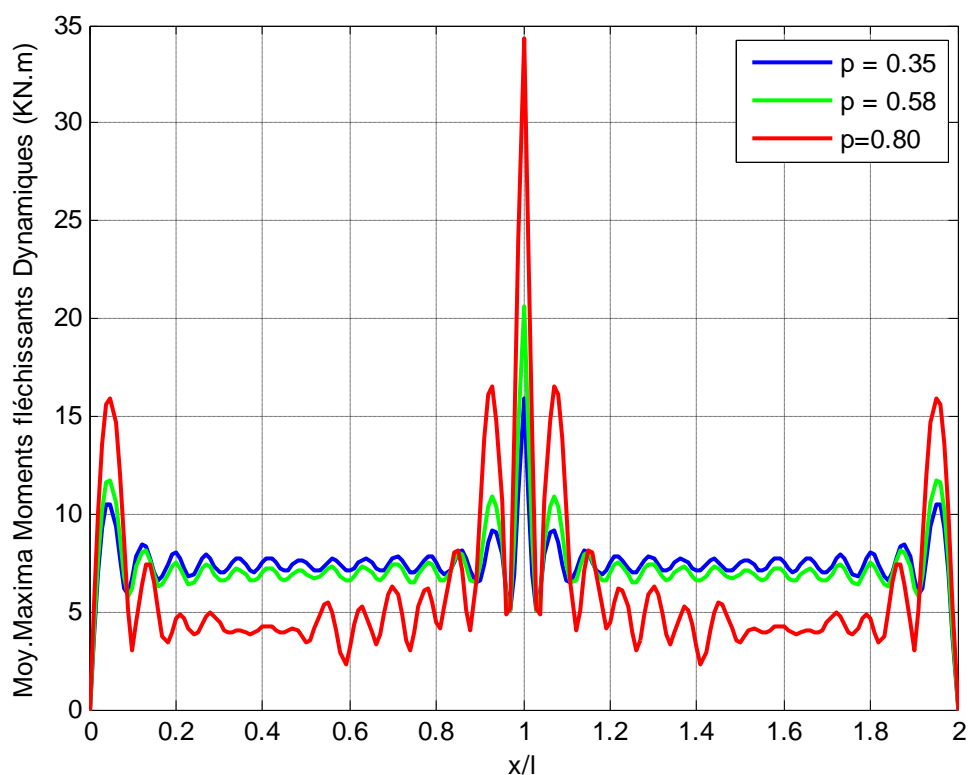


Figure 4.7 Moyenne des maxima des composantes dynamiques des moments fléchissants

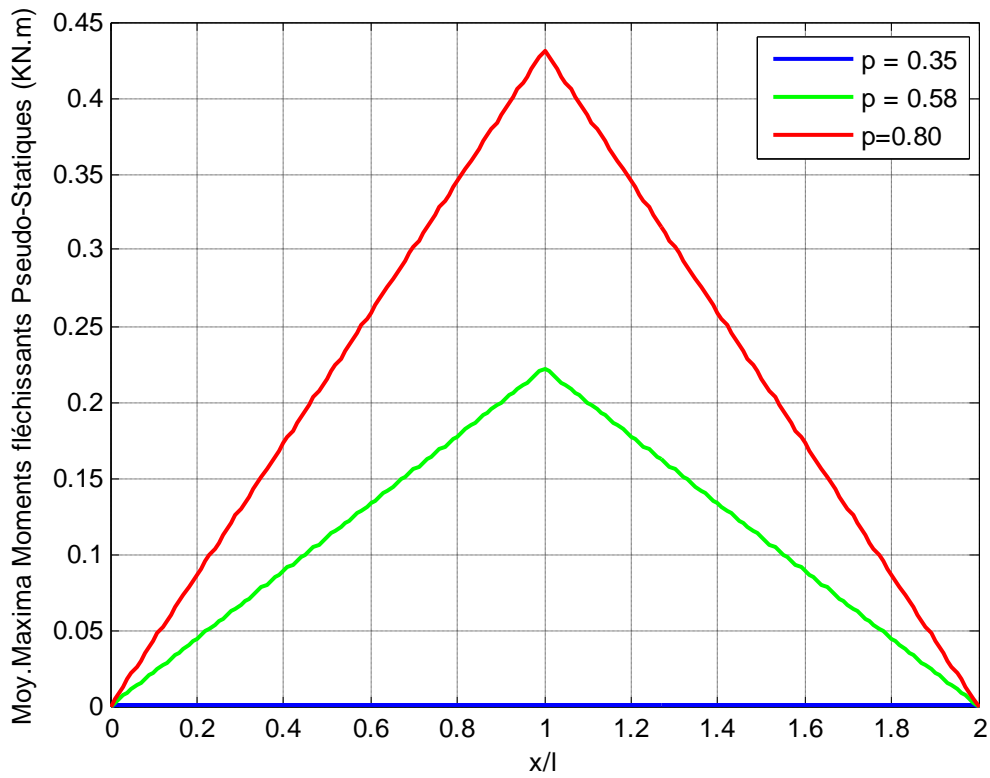


Figure 4.8 Moyenne des maxima des composantes pseudo-statiques des moments fléchissant

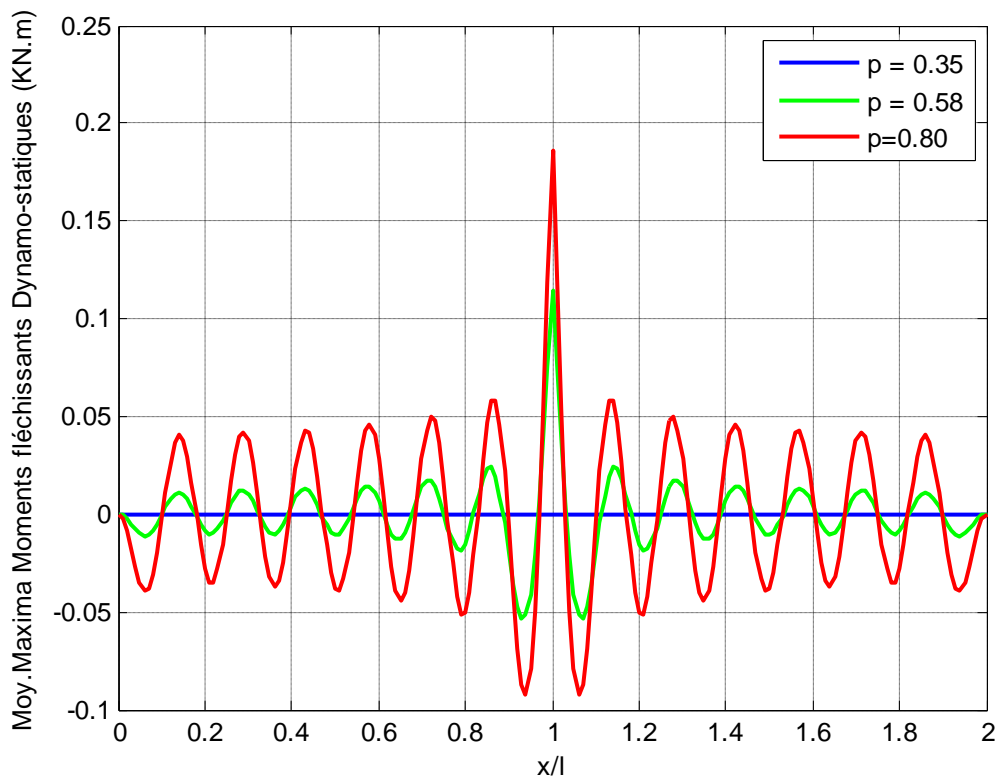


Figure 4.9 Moyenne des maxima des composantes dynamo-statiques des moments fléchissant

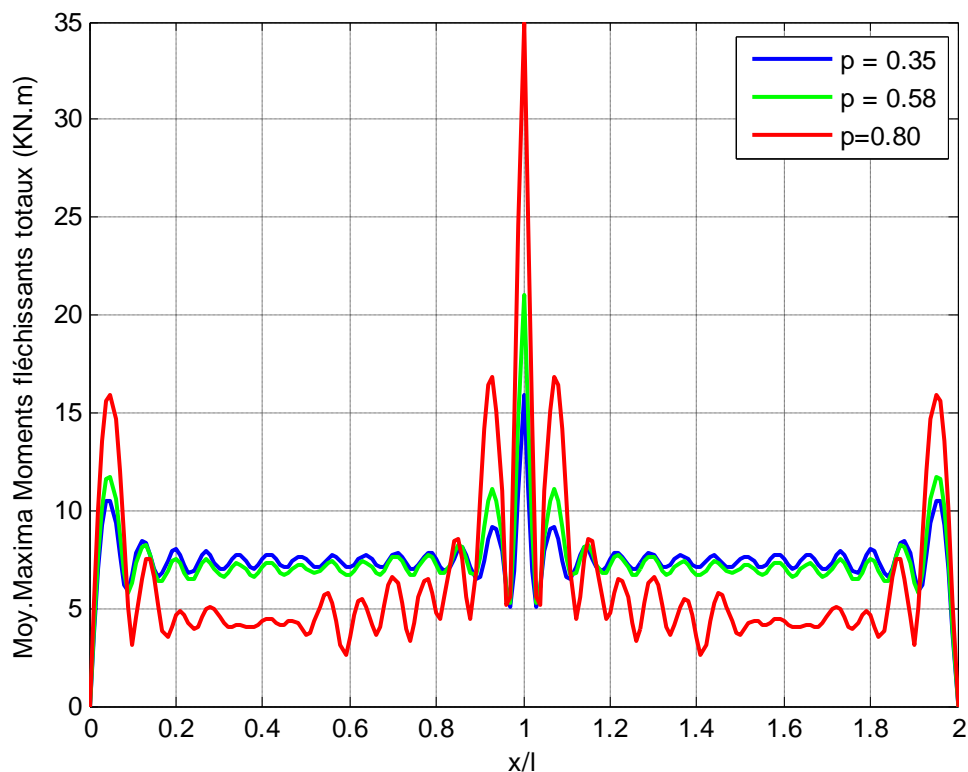


Figure 4.10 Moyenne des maxima des moments fléchissant totaux

4.6.4 Les effets sur la moyenne des maxima des efforts tranchants

Comme toutes les composantes dynamiques des moments fléchissants, les efforts tranchants dynamiques sont légèrement influencés par les effets de site autour des appuis ($p=0.35$ et $p=0.58$) (figure 4.11). Les valeurs extrêmes sont atteintes pour un profil de sol ayant un $p=0.8$, ce profil possède une fréquence très proche de celle de la structure. Les composantes pseudo-statiques apparaissent le long de la poutre, seulement en cas de présence d'effet de site, avec des valeurs constantes (figure 4.12). Les composantes dynamiques et pseudo-statiques sont négativement corrélées, autour de l'appui intermédiaire, pour les faibles valeurs du paramètre p et positivement pour les valeurs élevées. Cette situation est inversée autour des appuis extrêmes (figure 4.13). Cette composante est nulle aux sections de la poutre où les composantes dynamiques sont minimales.

Les efforts tranchants totaux sont montrés sur les courbes de la figure 4.14, ces figures indiquent que l'influence des effets de site augmente avec l'augmentation de l'inhomogénéité du sol. Les moyennes des maxima augmentent graduellement avec l'augmentation de p , de la valeur $p=0.35$, correspondant au cas uniforme, jusqu'à la valeur de $p=0.8$, correspondant d'effet de site important.

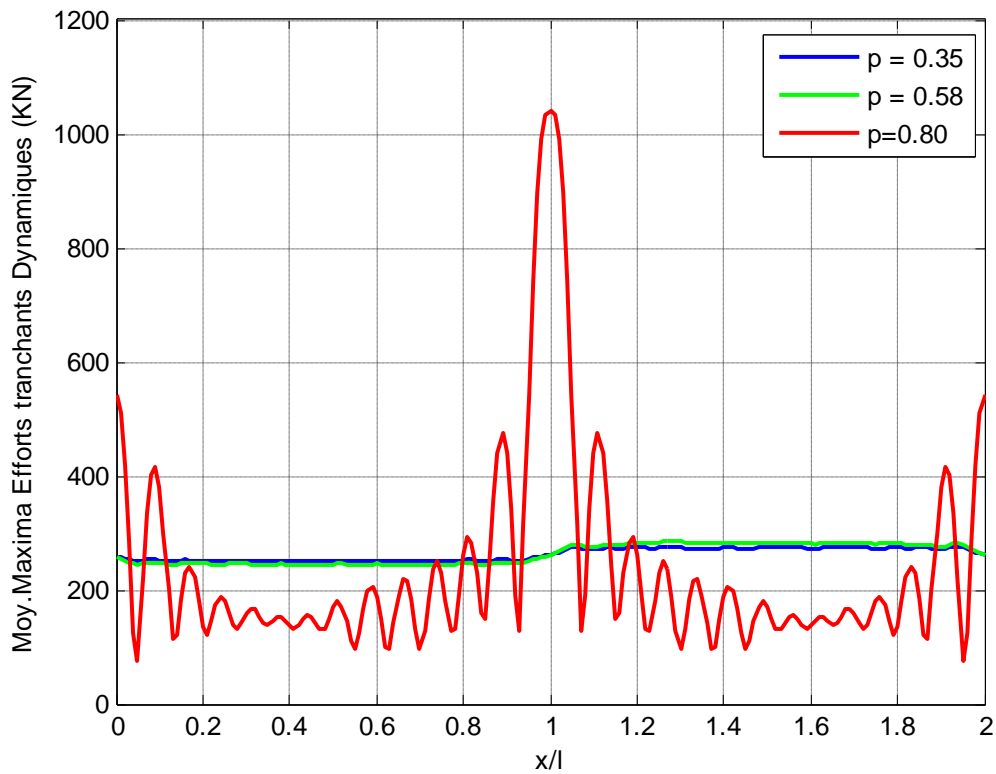


Figure 4.11 Moyenne des maxima des composantes dynamiques des efforts tranchants

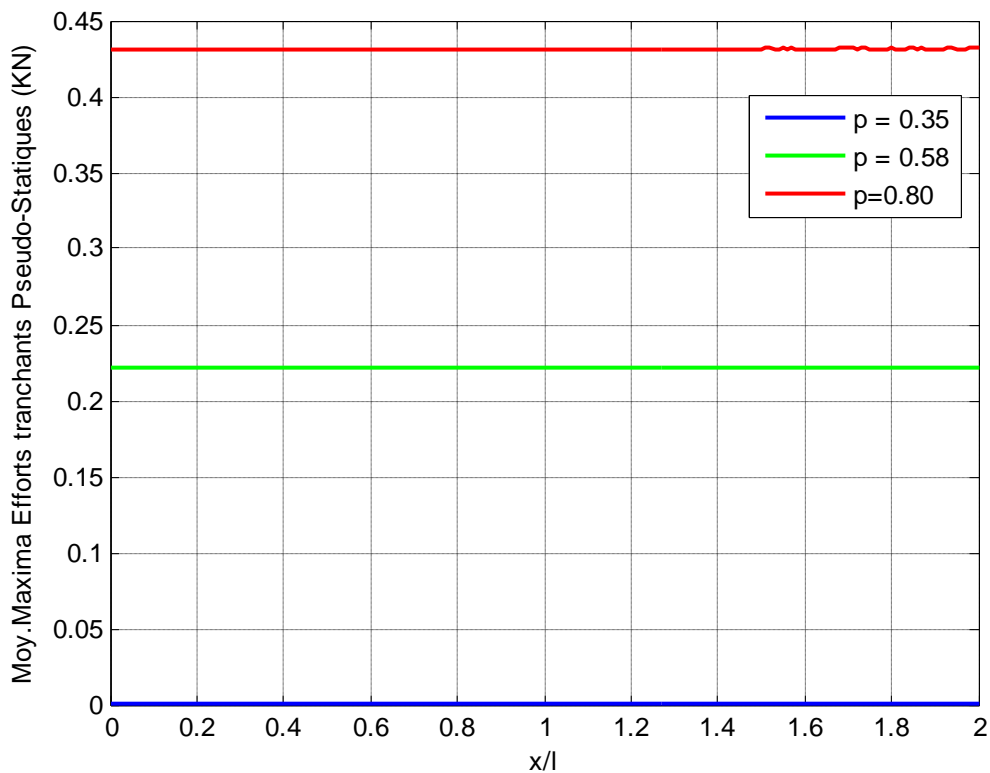


Figure 4.12 Moyenne des maxima des composantes pseudo-statiques des efforts tranchants

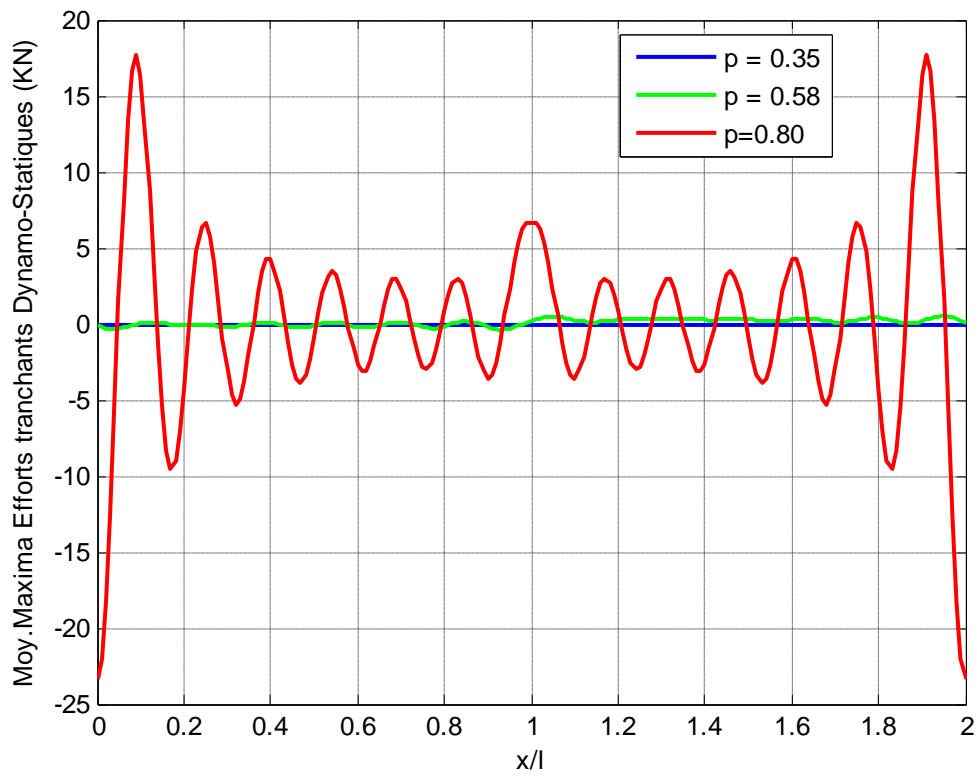


Figure 4.13 Moyenne des maxima des composantes dynamo-statiques des efforts tranchants

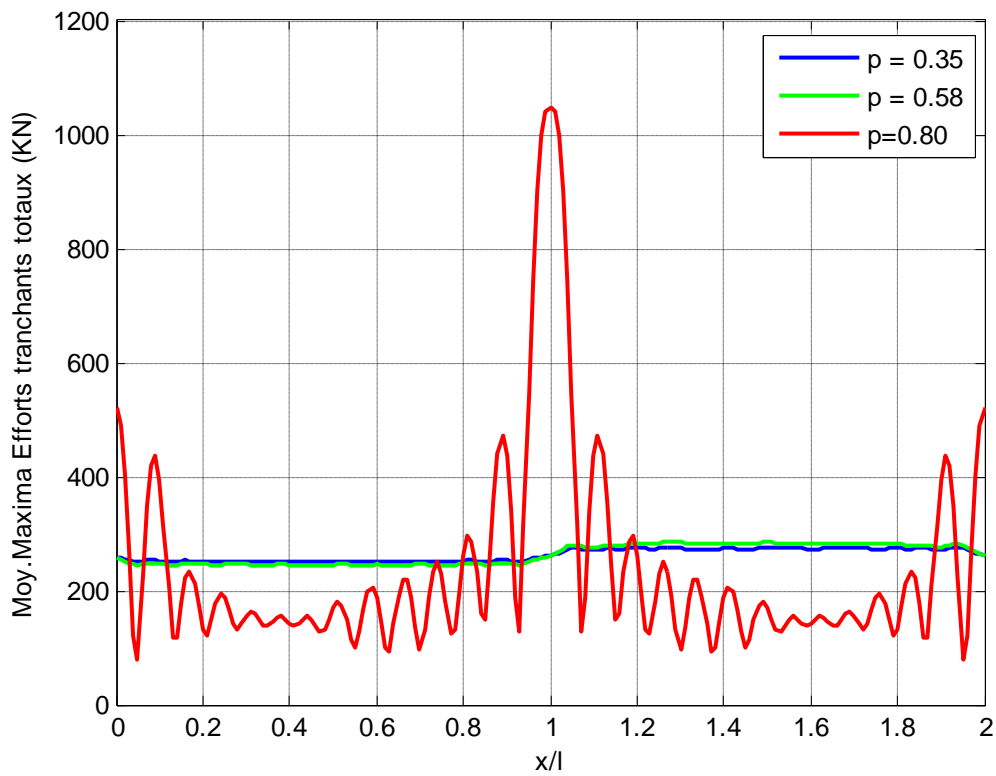


Figure 4.14 Moyenne des maxima des efforts tranchants totaux

4.7 Conclusion

Dans cette partie, une poutre à deux travées ancrée sur des colonnes de sol ayant des conditions géotechniques différentes est étudiée. Le modèle de Kanai-Tajimi modifié, décrivant les densités spectrales de puissance d'accélération aux appuis, a été utilisé. Les paramètres des filtres ont été déterminés à partir des fonctions d'amplification des colonnes de sol sous appuis. Ces fonctions ont exprimées analytiquement, elles captent l'essentiel des effets amplificateurs de colonne de sol inhomogène (épaisseur, module de cisaillement et sa variation en profondeur, masse volumique, contraste d'impédance, amortissement). Une étude paramétrique concernant les effets de site sur les réponses maximales le long de la poutre a été menée, en se basant sur l'hypothèse que les appuis extrêmes sont fondés sur un sol ferme et l'appui intermédiaire sur différentes colonnes de sol ayant divers degrés d'inhomogénéité, traduits par le paramètre p . Dans le cas de conditions de sol identiques (ferme, $p=0.35$), la structure vibre sous excitation uniforme, autrement, elle est vibre sous excitations variables et la corrélation entre ces excitations diminuent graduellement avec l'augmentation du paramètre p . Les résultats obtenus à partir de cette analyse montrent que : Plus le degré d'inhomogénéité augmente plus les effets de site sont importants.

Le sol d'ancrage présente des caractéristiques différentes, les déplacements aux appuis diffèrent et des déplacements différentiels dans la structure apparaissent et spécialement autour de l'appui intermédiaire où le sol inhomogène est imposé. Ces déplacements différentiels augmentent avec l'augmentation de l'inhomogénéité.

L'effet de site conduisant à des déplacements différentiels, induit des forces (moments fléchissants et efforts tranchants) pseudo-statiques additionnelles qui contribuent significativement aux forces totales. Ces forces additionnelles augmentent avec l'augmentation du degré d'inhomogénéité (plus de perte d'incohérence).

L'effet de site est plus important sur les moments que les efforts tranchants du fait que les efforts tranchants sont d'un degré dérivatif supérieur aux moments.

L'effet de site affecte légèrement les composantes dynamiques du fait de la résonance qui se produit quand les fréquences propres de la structure se rapprochent de celle du sol.

Les excitations uniformes génèrent des composantes de réponse dynamiques plus importantes que celles induites par les excitations en présence de conditions de sol différentes quand la fréquence dominante du sol inhomogène est supérieure à celle de la structure, et plus faibles dans le cas contraire.

L'effet de site est tellement important pour spécifier les excitations aux appuis qu'il faut le prendre en considération avec beaucoup d'attention lors de l'analyse sismique des structures

ancrées dans des conditions de sol différentes. La détermination des composantes pseudo-statiques des réponses est essentielle. Ces dernières traduisent les déplacements différentiels et induisent des forces additionnelles qui peuvent causer des ruptures.

Conclusions Générales et Recommandations

Conclusions générales et recommandations

1. Conclusions générales

L'étude que nous avons menée dans le cadre de ce mémoire de magister intitulée " effet de la variabilité des propriétés de sol sur la réponse des structures étendues " s'achève avec le présent chapitre. Pour cela, quatre étapes (chapitre) s'avèrent nécessaires à présenter.

La première étape consiste à formuler une expression analytique permettant d'estimer les fonctions d'amplification d'un profil de sol non-homogène, dont les caractéristiques mécaniques varient en fonction de la profondeur et surmontant un demi-espace est déterminée. L'analyse des résultats obtenus fait ressortir les conclusions suivantes :

La variation du module de cisaillement en profondeur définie par un paramètre adimensionnel p affecte le contenu fréquentiel et l'amplitude de la fonction d'amplification. L'amplification est plus importante pour les sols lâches que pour les sols cohérents et rigides.

La flexibilité du substratum rocheux définie par le paramètre adimensionnel q n'affecte que l'amplitude de la fonction d'amplification. La dissipation radiative augmente avec l'augmentation de q .

La prise en compte du module de cisaillement non nul au niveau de la surface libre a une influence non négligeable sur la réponse des profils de sol lâches de faible résistance (sables et graviers lâches, argiles molles normalement consolidées, vases, etc.). Cet effet est négligeable pour les autres types de sol tels que les sols cohérents (roches altérées, sables et graviers moyennement compacts, argiles de raideur moyenne) et les sols rigides (sables et graviers compacts ou argiles raides surconsolidées).

La deuxième étape est destinée à mettre en exergue l'importance du paramètre de non homogénéité de sol considérée dans l'analyse de réponse de structure et par conséquence dans la classification des sites. Cette importance est illustrée pour déterminer les paramètres de non homogénéité de 33 sites localisés dans la ville d'Alger. Les vitesses de cisaillement moyennes de ces sites seront calculées selon trois modèles définis par la profondeur de profile de sol nous utilisons la méthode des

Conclusions générales et recommandations

moindres carrés et la méthode par la droite de régression. Les relations ou fonctions non linéaires doivent être préalablement transformées afin que les principes de l'ajustement linéaire leur soient appliqués. Il ressort des résultats obtenus que le paramètre de non homogénéité p plus importante pour les sols lâches (site S3 meubles) que pour les sols cohérents et rigides (site S2 ferme).

Ainsi, on associe à la variable aléatoire non bornée la loi de distribution lognormale, et à la variable aléatoire bornée la loi de distribution beta. Cette technique permet de calculer analytiquement les paramètres de la distribution beta connaissant les données statistiques à savoir, la moyenne, l'écart type et les valeurs extrêmes, et ensuite sa variabilité par le processus d'itérations via la technique proposée.

La technique de simulation utilisée pour modélise la DSP pour différentes valeurs de CV_p et CV_{V_s} . La variabilité de la fonction de densité spectrale de puissance (DSP) est analysée. Les propriétés aléatoires du sol considérées sont la vitesse de cisaillement et le paramètre de non homogénéité p , modélisées par des champs aléatoires, en considérant la corrélation Gaussienne. Le champ aléatoire pour la vitesse de cisaillement est obtenu en adoptant la distribution lognormale, qui permet d'analyser sa grande variabilité. Pour le paramètre de non homogénéité p , qui est des paramètres bornés dans la pratique entre deux valeurs extrêmes, leurs champs aléatoires sont obtenus en utilisant la distribution beta.

Il ressort des résultats obtenus que l'augmentation des coefficients de variation du paramètre de non homogénéité et de la vitesse de cisaillement provoque un effet de filtrage qui fait glisser la fréquence fondamentale du système vers les basses fréquences, et provoque l'atténuation des fréquences élevées. Par ailleurs, on observe que l'augmentation de CV_p induit une augmentation de l'amplification ce qui représente en soi un facteur favorable, par contre que l'augmentation de CV_{V_s} induit une diminution de l'amplification.

Comme synthèse, on peut dire, que les paramètres qui ont une influence prépondérante sur la DSP d'un profil de sol, sont la vitesse de cisaillement et le paramètre de non homogénéité p .

La dernière étape une poutre à deux travées ancrée sur des colonnes de sol ayant des conditions géotechniques différentes est étudiée. Le modèle de Kanai-Tajimi

Conclusions générales et recommandations

modifié, décrivant les densités spectrales de puissance d'accélération aux appuis, a été utilisé. Les paramètres des filtres ont été déterminés à partir des fonctions d'amplification des colonnes de sol sous appuis. Ces fonctions ont été exprimées analytiquement, elles capturent l'essentiel des effets amplificateurs de colonne de sol inhomogène (épaisseur, module de cisaillement et sa variation en profondeur, masse volumique, contraste d'impédance, amortissement). Une étude paramétrique concernant les effets de site sur les réponses maximales le long de la poutre a été menée, en se basant sur l'hypothèse que les appuis extrêmes sont fondés sur un sol ferme et l'appui intermédiaire sur différentes colonnes de sol ayant divers degrés d'inhomogénéité, traduits par le paramètre p . Dans le cas de conditions de sol identiques (ferme, $p=0.35$), la structure vibre sous excitation uniforme, autrement, elle vibre sous excitations variables et la corrélation entre ces excitations diminue graduellement avec l'augmentation du paramètre p . Les résultats obtenus à partir de cette analyse montrent que : Plus le degré d'inhomogénéité augmente plus les effets de site sont importants.

Le sol d'ancrage présente des caractéristiques différentes, les déplacements aux appuis diffèrent et des déplacements différentiels dans la structure apparaissent et spécialement autour de l'appui intermédiaire où le sol inhomogène est imposé. Ces déplacements différentiels augmentent avec l'augmentation de l'inhomogénéité.

L'effet de site conduisant à des déplacements différentiels, induit des forces (moments fléchissants et efforts tranchants) pseudo-statiques additionnelles qui contribuent significativement aux forces totales. Ces forces additionnelles augmentent avec l'augmentation du degré d'inhomogénéité (plus de perte d'incohérence).

L'effet de site est plus important sur les moments que les efforts tranchants du fait que les efforts tranchants sont d'un degré dérivatif supérieur aux moments.

L'effet de site affecte légèrement les composantes dynamiques du fait de la résonance qui se produit quand les fréquences propres de la structure se rapprochent de celle du sol.

Les excitations uniformes génèrent des composantes de réponse dynamiques plus importantes que celles induites par les excitations en présence de conditions de sol

différentes quand la fréquence dominante du sol inhomogène est supérieure à celle de la structure, et plus faibles dans le cas contraire.

L'effet de site est tellement important pour spécifier les excitations aux appuis qu'il faut le prendre en considération avec beaucoup d'attention lors de l'analyse sismique des structures ancrées dans des conditions de sol différentes. La détermination des composantes pseudo-statiques des réponses est essentielle. Ces dernières traduisent les déplacements différentiels et induisent des forces additionnelles qui peuvent causer des ruptures.

2. Recommandations

Des travaux de recherche futurs qui peuvent être menés dans le domaine de la variabilité spatiale des propriétés de sol ainsi que leurs effets sur les réponses des structures sont recommandés et résumés autour des points suivants :

- Associer l'interaction sol-structure aux effets de la variabilité spatiale des propriétés de sol dans l'analyse des structures.
- Étendre en statique et en dynamique, l'aspect 2D à l'aspect 3D du problème.
- Étendre l'aspect linéaire à l'aspect non linéaire équivalent.
- Tenir compte l'effet des autres propriétés de sol (la porosité, l'angle de frottement interne, la perméabilité, etc.) sur la réponse des structure étendus.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- A. Der Kiureghian**, “A coherency model for spatially varying ground motions,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* , Vol. 25, pp. 99–111, 1996.
- A. Der Kiureghian**, “Structural response to stationary excitation,” *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE* , Vol. 106, pp. 1195–1213, 1980.
- A. Der Kiureghian**, “CQC modal combination rule for high-frequency modes,” *Transactions of the 11th International Conference in Reactor Technology, Tokyo, Japan*, 1991.
- A. Der Kiureghian and A. Neuenhofer**, 1992. “Response spectrum method for multisupport seismic excitation,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* , Vol. 21, pp. 713–740,
- A.M. Abdel-Ghaffar and L.I. Rubin**, “Suspension bridge response to multiple support excitations,” *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 108, pp. 419–435, 1982.
- A.M. Abdel-Ghaffar and L.I. Rubin**, “Lateral earthquake response of suspension bridges,” *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 109, pp. 665–675, 1983.
- Ang, AHS., Tang, WH.**, (1975). *Probability concepts in engineering planning and design*. John Wiley & Sons.
- A. Hindy and M. Novak**, “Pipeline response to random ground motion,” *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 106, pp. 339–360, 1980.
- C.H. Loh**, “Analysis of the spatial variation of seismic waves and ground movements from SMART-1 data,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* , Vol. 13, pp. 561–581, 1985.
- C.H. Loh and Y.T. Yeh**, “Spatial variation and stochastic modeling of seismic differential ground movement,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* , Vol. 16, pp. 583–596, 1988.
- CGS**, *Propriétés de la géologie technologie (Etude JICA-CGS)*.
- Elkated, T., Chalaturnyk, R., Robertson, PK**, An overview of soil heterogeneity: quantification and implication on geotechnical field problems. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003; 40: 1-15.
- Faccioli, E.**, (1977). A Stochastic approach to soil amplification. *BSSA*. 1977 ; 66: 1277-1291.
- Fenton, GA.**, (1990) *Simulation and Analysis of Random Fields*. Ph.D. thesis, Princeton University.

Fenton, GA., Vanmarcke, EH. Spatial Variation in Liquefaction Risk Assessment. Proc. Of Geotechnical Engrg. Congress, ASCE, Geotech. Div., Boulder, Colorado, 1991: 594 - 607.

Fenton, GA. and Vanmarcke, EH., (1998). Spatial variation in liquefaction risk. Géotechnique. 48(6): 819-831.

F.E. Richart, J.R. Hall and D. Woods, “Vibration of soils and foundations”, Prentice Hill, New Jersey, 1970.

Gazetas, G., Debchaudhury, A., Gaspirani, DA., (1982). Stochastic estimation of the nonlinear response of dams to strong earthquake. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1(1):10-19.

H. Afra and A. Pecker “Calculation of free field response spectrum of a non-homogeneous soil deposit from bed rock response spectrum”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering , Vol. 22, pp. 157–165, 2002.

Hao, H., (1992). Response of multiply supported rigid foundation to spatially random ground motion. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 20:821-838.

Harichandran, RS., Vanmarcke, EH., (1986). Stochastic variation of earthquake ground motion in space-time. Journal of Engineering Mechanics ASCE, 112(2):154-174.

H. Sandi, “Conventional seismic forces corresponding to non-synchronous ground motion,” Proceedings of the Third European Symposium on Earthquake Engineering, Sofia, Bulgaria, 1970.

Hao, H., (2002). Effect of random variations of soil properties on site amplification of seismic ground motions. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22: 551-564.

I.M. Idriss, and H.B. Seed “Seismic response of horizontal layers”. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 94 (SM4) pp.1003-1031, 1968.

Jaksa, M. B.The influence of spatial variability on the geotechnical design properties of a stiff, overconsolidated clay. Ph.D. Thesis, The University of Adelaide, Faculty of Engineering. 1995.

LNHC, Rapport géotechnique de l'étude du site de propriétés de la géologie locale.

M. Hadid and H. Afra, “Sensitivity analysis of site effects on response of pipelines”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering , Vol. 20, pp. 249–260, 2000.

M.F. Barstein, Application of probability method for design the effect of forces on engineering structures”, Proceedings of the 2WCEE, Vol. 2, 1467-1481, Tokyo, 1960.

M. Novak and A. Hindy, “Seismic response of buried pipelines,” Proceedings of the Third Canadian Conference on Earthquake Engineering, Montreal, Canada, 1979.

Nour, A., Slimani, A., Laouami, N., (2002). Foundation settlement statistics via finite element analysis. Journal Computers and Geotechnics, 29(8): 641-672.

Nour, A., Slimani, A., Laouami, N., Afra, H., (2003). Finite element model for the probabilistic seismic response of heterogeneous soil profile. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(5): 331-348.

Pecker, A., “Dynamique des sols”, Presse de l’ENPC, Paris.1984.

Pecker, A. and Afra, H., “Charts for Natural Frequencies and Transfer Functions of Inhomogeneous Soil Deposits”, Fifth International Conference on Seismic Zonation, Nice (France), pp. 17-19.1995.

Romo-Organista, M. P. Soil-structure interaction in a random environment. P.h.D, Dissertation, University of California, Berkeley. 1977.

Rahman, M. S., Yeh, C. H., (1999). Variability of seismic response of soils using stochastic finite element method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 18: 229-245.**Wang, S.,**

Rosenblueth, E., (1975). Point estimates for probability moments. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 72: 3812-3814.

Rosenblueth, E., (1981). Two-point estimates in probability. *Appl. Math. Model.*, 5:329 335.

R.N. Iyengar and K.T.S. Iyengar, “A non-stationary random process model for earthquake acceleration,” *Bulletin of the Seismological Society of America* , Vol. 59, 142.

R.S. Harichandran and E.H. Vanmarcke, “Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time,” *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 112, pp. 154–174, 1986.

Suzuki, S., Asano, K., (1992). Dynamic amplification functions of the surface layer considering the variation of soil parameters. Tenth World conference on earthquake engineering, Balkema Rotterdam 1992, 19-24 July Madrid, Spain: 1193-1198.

Tian, L., Jie L., (1992). Influence of random mechanical parameters on earthquakes response analysis of site. Tenth World conference on earthquake engineering, Balkema Rotterdam 1992, 19-24 July Madrid, Spain: 1181-1185.

Vanmarcke, E. H., (1977a). Probabilistic Modeling of Soil Profiles. *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, Vol. 103, No. GT11, 1227-1246.

Vanmarcke, E. H., (1977b). Random vibration approach to soil dynamics. The use of probability in earthquake engineering. New York; ASCE Publication, 146-176.

Zaiguang, W., Goucheng, H., (1992). Stochastic seismic response analysis for soil layers with random dynamic parameters. Tenth World conference on earthquake engineering, Balkema Rotterdam 1992, 19-24 July Madrid, Spain: 1187-1192.

Zerva, A., Harada, T., (1997). Effect of surface layer stochastically on seismic ground motion coherence and strain estimates. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 16:445-457.