

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

Présenté par :

Mr KHELLAFI Abdelwahab Mourad

THEME

Caractérisation sismique de sites à partir
d'enregistrements accélérométriques en surface libre

Devant le jury composé de :

BOUAFIA youcef	Professeur	UMM Tizi Ouzou	Président
AFRA hamid	Directeur de recherches	CNERIB – Alger	Rapporteur
HARICHANE Zamila	Professeur	UHB Chlef	Co-Rapporteur
MELBOUCI Bachir	Professeur	UMM Tizi Ouzou	Examineur
MEHADDENE Rachid	Professeur	UMM Tizi Ouzou	Examineur
BAHAR Ramdane	Professeur	USTHB Alger	Examineur

Soutenu le : 09/04/2018

Dédicaces

A mes chers parents,

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

Puisse Dieu, le très haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A la mémoire de mes grands-parents

J'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde.

Remerciements

Je remercie en premier et en dernier DIEU tout puissant de m'avoir gardé en bonne santé et accordé le courage et la bonne volonté pour réaliser ce modeste travail.

Je remercie vivement mon directeur de thèse, Pr Hamid AFRA, Directeur général du CNERIB, et mon co-directeur, Pr Zamila HARICHANE de l'université de Chlef, qui ont été à l'origine du présent travail, pour leurs disponibilités, assistances et conseils tout au long de cette étude.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux membres de jury, d'avoir acceptés d'examiner cette thèse et faire partie du jury, et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et d'y avoir consacré de leur temps pour son expertise.

Enfin, je tiens aussi à exprimer mes remerciements à toutes les personnes qui ont accepté d'apporter aide par consultations, conseils et prestation de documents et références bibliographiques.

Résumé

La réduction du risque sismique dans les régions à forte sismicité nécessite des études détaillées qui doivent inclure des paramètres mécaniques et physiques des profils de sols sur la profondeur d'investigation. La reconnaissance et l'identification de ces paramètres passent inévitablement par des essais in-situ et/ou au laboratoire afin d'apprécier le comportement des sols vis-à-vis des mouvements sismiques. Cependant, ces essais sont généralement très coûteux et nécessitent du matériel lourd et du personnel très qualifié.

Récemment, les méthodes d'optimisation ont montré une grande capacité pour résoudre les problèmes complexes dans diverses disciplines de l'ingénierie. L'utilisation des méthodes d'optimisation telles que la méthode de Levenberg-Marquart ou l'algorithme génétique adaptatif ont permis d'obtenir des résultats satisfaisants. En combinant ces deux méthodes on aboutit à une méthode hybride qui garantit des solutions plus appréciables.

Ce travail consiste à fournir une autre approche expérimentale, analytique et numérique pour identifier les caractéristiques de profils de sol et réduire ainsi considérablement le coût de l'opération. Cette approche utilise les enregistrements sismiques en surface libre et une procédure d'optimisation hybride.

Les résultats escomptés devraient contribuer à réduire le coût des investigations et de renforcer la sécurité des constructions bâties dans les zones à forte sismicité.

Mots clés : profil de sol, caractéristiques mécaniques et physiques, enregistrements sismiques, identification, algorithme génétique adaptatif, Levenberg-Marquart.

Abstract

The reduction of seismic risk in areas of high seismicity requires detailed studies including mechanical and physical parameters of soil profiles on the depth of investigation. Recognition and identification of these parameters inevitably pass by in-situ and/or laboratory tests to assess the behavior of soils to seismic motions. However, these tests are very expensive and require heavy equipment and highly qualified personnel.

Recently, optimization methods have shown potential achievements to overcome such problems in various disciplines of engineering. The use of optimization methods such as Levenberg-Marquart method or adaptive genetic algorithm has produced satisfactory results. Combining these two methods leads to a hybrid method that guarantees more favorable results.

This work consists in developing another analytical, numerical and experimental approach to identify the characteristics of soil profiles and reduce significantly the cost of the operation. This approach uses seismic data recorded at free-field sites and hybrid optimization procedure.

The expected results should help us to reduce the cost of investigations and enhance the safety of buildings in high seismic areas.

Keywords: soil profile, mechanical and physical characteristics, seismic records, identification, adaptive genetic algorithm, Levenberg-Marquart.

المخلص

للتقليل من مخاطر الزلازل و في إطار تصميم مباني مقاومة للهزات الارضية في المناطق ذات النشاط الزلزالي العالي يتوجب علينا القيام بدراسات تحليلية تتضمن الخصائص الميكانيكية و الفيزيائية للطبقات الترابية المتراسة حسب العمق المطلوب دراسته. لتعريف و تحديد هذه الخصائص يتطلب الأمر المرور حتما بتجارب و إختبارات في الموقع أو في المخبر أو فيها معا لتقييم سلوك الأتربة بالنظر لتأثيرات الهزات الأرضية عليها . لكن هذه التجارب و الإختبارات عادة ما تكون مكلفة و تتطلب معدات كبيرة و يد عاملة مؤهلة تأهيلا عاليا.

في السنوات الأخيرة، أظهرت دراسات عديدة أن اللجوء إلى طرق الإستمثال مكن من حل المسائل المعقدة في مختلف التخصصات الهندسية. إن إستخدام أي طريقة مثل طريقة لونبرك – ماركارد أو الخوارزميات الوراثة المتكيفة أسفرت عن نتائج مرضية. لكن تركيب الطريقتين السابقتين في طريقة هجينة واحدة أعطت نتائج مميزة و أكثر تقديرا.

إن الهدف من هذا البحث هو وضع خطة لبرنامج معالجة تحليلية و عددي و تجريبي تساعد على تحديد خصائص الطبقات الترابية المتراسة بكلفة أقل. و لتحقيقها سنستخدم التسجيلات الزلزالية الرقمية المسجلة على سطح الأرض و طريقة إستمثال هجينة.

إن النتائج المتوقعة و الغاية المرجوة من هذا العمل ستساعد على التقليل من تكاليف التحقيقات و الدراسات و تعزز سلامة المنشآت و المباني في المناطق ذات النشاط الزلزالي العالي.

المفردات الأساسية: الطبقات الترابية، الخصائص الميكانيكية و الفيزيائية، التسجيلات الزلزالية، طرق الإستمثال، الطرق الهجينة ، الخوارزميات الوراثة المتكيفة.

Table des matières

Dédicaces	II
Remerciements	III
Résumé	IV
Abstract	V
الملخص	VI
Table des matières	VII
Liste des tableaux	XIII
Liste des figures	XIV
Liste des notations	XIX

Introduction générale

1. Problématique	1
2. Objectifs	3
3. Organisation de la thèse	4

Chapitre 1 : Techniques expérimentales de caractérisation de sites

1.1. Introduction	8
1.2. Méthodes de caractérisation d'un site	9
1.2.1. Méthodes géologiques	10
1.2.2. Méthodes géomorphologiques	10
1.2.3. Méthodes géotechniques	11
1.2.4. Méthodes géophysiques	12
1.3. Caractérisation sismique d'un site	14
1.3.1. Méthodes des rapports spectraux horizontal-vertical	14

1.3.2.	Méthode du rapport v_{max}/a_{max}	16
1.3.3.	Classification d'un site	17
1.4.	Etude de cas sur le séisme de Boumerdès	17
1.4.1.	Description des sites	21
1.4.2.	Caractérisation des sites	21
1.5.	Conclusion	27

Chapitre 2 : Problèmes d'optimisation pour l'identification inverse

2.1.	Introduction	29
2.2.	Analyse inverse	30
2.3.	Description d'un problème d'optimisation	31
2.4.	Problème mono-objectif	33
2.5.	Méthodes d'optimisation mono-objectif	35
2.5.1.	Méthodes déterministes	35
2.5.1.1.	Méthode du simplexe	35
2.5.1.2.	Méthode du gradient conjugué	36
2.5.1.3.	Méthode de Newton	37
2.5.1.4.	Méthode de Levenberg-Marquardt	38
2.5.2.	Méthodes stochastiques	39
2.5.2.1.	Méthode du recuit simulé	39
2.5.2.2.	Méthodes de Monte-Carlo	40
2.5.2.3.	Méthode Tabou	41
2.5.2.4.	Algorithmes génétiques	41
2.5.3.	Méthodes énumératives	42
2.5.4.	Méthodes hybrides	43
2.5.5.	Critiques sur les méthodes d'optimisation mono-objectif	43
2.6.	Problème multi-objectif	44
2.7.	Méthodes d'optimisation multi-objectif	45
2.7.1.	Méthode d'agrégation pondérée	46
2.7.2.	Méthode ϵ -contrainte	47
2.7.3.	Méthode SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm)	47

2.7.4. Méthode NSGA (Non Sorting Genetic Algorithm)	48
2.7.5. Critiques sur les méthodes d'optimisation multi-objectif	49
2.8. Conclusion	49

Chapitre 3 : Démarche de caractérisation et d'identification des paramètres de sols

3.1. Introduction	52
3.2. Définition du problème	53
3.2.1. Formulation du problème	54
3.3. Fonctions objectif	55
3.4. Développement de la procédure d'optimisation	56
3.4.1. Hybridation des méthodes d'optimisation	56
3.4.2. Optimisation par algorithme génétique adaptatif	57
3.4.2.1. Espace de recherche, individu et population	59
3.4.2.2. Création de la population initiale	60
3.4.2.3. Codage et décodage des individus	60
3.4.2.4. Evaluation de la population	62
3.4.2.5. Détermination des poids de pondération adaptatif	62
3.4.2.6. Evolution de la population	63
3.4.2.7. Opérateur de sélection	63
3.4.2.8. Opérateur de croisement	64
3.4.2.9. Opérateur de mutation	66
3.4.2.10. Adaptation des opérateurs génétiques	66
3.4.2.11. Critère d'arrêt	68
3.4.3. Optimisation par la méthode de Levenberg-Marquardt	69
3.4.3.1. Minimisation au sens des moindres carrées	69
3.4.3.2. Approximation de la fonction objectif	69
3.4.3.3. Principe de la méthode de Levenberg-Marquardt	71
3.4.3.4. Critère d'arrêt	73
3.5. Analyse de sensibilité	73
3.5.1. Sensibilité par rapport aux paramètres d'optimisation	73

3.5.2. Estimation de l'intervalle de confiance	74
3.6. Implémentation numérique	74
3.7. Conclusion	76

Chapitre 4 : Méthodes et modèles d'évaluation de l'amplification de site à partir de deux enregistrements sismiques

4.1. Introduction	77
4.2. Analyse de l'amplification de site	78
4.2.1. Approches expérimentales	78
4.2.2. Approche linéaire équivalente unidimensionnelle	79
4.3. Méthodes d'évaluation de la fonction d'amplification	81
4.3.1. Méthodes expérimentales	82
4.3.1.1. Méthode du rapport spectral standard	83
4.3.1.2. Méthode du rapport inter-spectral	84
4.3.2. Modèles théoriques	84
4.3.2.1. Une couche homogène équivalente	84
4.3.2.2. Sols stratifiés horizontalement	86
4.3.2.3. Une couche non-homogène avec un module de cisaillement variable	87
4.3.2.4. Une couche non-homogène à paramètres aléatoires	92
4.4. Formulation pour une identification simultanée de deux sites	93
4.4.1. Formulation expérimentale	93
4.4.2. Formulation théorique	94
4.5. Conclusion	95

Chapitre 5 : Applications et validations expérimentales

5.1. Introduction	96
5.2. Validation numérique	97
5.2.1. Description du problème	97
5.2.2. Sensibilité de l'optimisation aux opérateurs génétiques	98
5.2.2.1. Analyse des résultats	99
5.2.3. Efficacité de l'algorithme génétique adaptatif	100

5.2.3.1.	Analyse des résultats	101
5.2.4.	Sensibilité par rapport aux paramètres optimisés	104
5.2.4.1.	Analyse des résultats	104
5.3.	Validation expérimentale	105
5.3.1.	Présentation du site de Garner Valley	106
5.3.2.	Description du problème	108
5.3.3.	Identification des propriétés d'une couche homogène équivalente	109
5.3.3.1.	Analyse des résultats	110
5.3.4.	Identification des propriétés d'un profil de sol stratifié horizontalement	112
5.3.4.1.	Analyse des résultats	112
5.3.5.	Identification des propriétés d'une couche de sol non-homogène avec un module de cisaillement variable	116
5.3.5.1.	Analyse des résultats	117
5.3.6.	Identification des propriétés d'une couche de sol à paramètres aléatoires	119
5.3.6.1.	Analyse des résultats	120
5.4.	Conclusion	121

Chapitre 6 : Etudes de cas

6.1.	Introduction	123
6.2.	Application 1	124
6.2.1.	Description des données	124
6.2.2.	Identification des coefficients d'amortissements	127
6.2.2.1.	Analyse des résultats	128
6.2.3.	Détermination de l'accélérogramme du site F	129
6.2.3.1.	Analyse des résultats	130
6.3.	Application 2	131
6.3.1.	Description des données	131
6.3.2.	Identification des propriétés des profils de sols des deux sites	133
6.3.2.1.	Analyse des résultats	134
6.4.	Conclusion	138

Conclusion générale et perspectives

1. Conclusions 141
2. Perspectives 145

Références bibliographiques 146

Liste des tableaux

1.1	Accélérations et vitesses maximales des sols, enregistrées durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 dans les stations considérées	20
1.2	Paramètres de caractérisation des différents sites extraits des enregistrements réalisés sur place durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003	26
4.1	Expressions du module de cisaillement et de la vitesse des ondes de cisaillement d'après plusieurs chercheurs	88
5.1	Propriétés d'une couche de sol homogène et du substratum rocheux	97
5.2	Propriétés d'une couche de sol homogène équivalente	98
5.3	Valeurs des différents opérateurs de l'algorithme génétique adaptatif	101
5.4	Propriétés d'une couche de sol homogène équivalente	101
5.5	Valeurs identifiées des propriétés de la couche de sol homogène équivalente	102
5.6	Valeurs des coefficients de variation et la sensibilité de la fonction optimisée	104
5.7	Valeurs des coefficients d'interaction entre les différents paramètres optimisés	105
5.8	Propriétés du profil de sol du site de Garner Valley	107
5.9	Comparaison entre les valeurs moyennes pondérées et les valeurs identifiées d'une couche homogène équivalente du site de Garner Valley	110
5.10	Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs ajustées par une identification orientée du profil du site de Garner Valley	115
6.1	Propriétés des couches constituant le profil de sol du site F	126
6.2	Valeurs modifiées de h , v_s , ρ_s et valeurs identifiées de ξ_s du site F	128
6.3	Propriétés des profils de sols des sites d'Hussein Dey et de Kouba, identifiés avec le modèle 2	138

Liste des figures

1.1	Processus de propagation des ondes sismiques de la source jusqu'au site étudié	8
1.2	Localisation des sites étudiés avec les enregistrements du séisme de Boumerdès du 21 mai 2003	18
1.3	Accélérations enregistrés à la surface libre des sites sélectionnés durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 : (a) composantes E-O, (b) composantes N-S et (c) composantes V	19
1.4	Vitesses calculées à la surface libre des sites sélectionnés durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 : (a) composantes E-O, (b) composantes N-S et (c) composantes V	19
1.5	Fonctions NHVSR des accélérogrammes enregistrés durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 dans les stations de Keddara 1, Keddara 2 et Dar El-Beïda, respectivement	22
1.6	Fonctions NHVSR des accélérogrammes enregistrés durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 dans les stations d'Hussein Dey, Kouba et Tizi Ouzou, respectivement	23
1.7	Fonctions NHVSR des accélérogrammes enregistrés durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 dans les stations de Blida, Azazga et Al-Afroun, respectivement	24
1.8	Fonctions NHVSR des accélérogrammes enregistrés durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 dans les stations de Hammam Righa, Miliana et Ain Defla, respectivement	25
3.1	Organigramme global de la procédure élaborée pour l'identification des paramètres de sols	58
3.2	Schématisation des niveaux d'organisation d'un algorithme génétique	59

3.3	Illustration schématique du codage binaire des paramètres à identifier par algorithme génétique : un individu	60
3.4	Exemple d'une discrétisation d'un gène en 8 bits	62
3.5	Représentation schématique de formation d'une nouvelle population	64
3.6	Représentation schématique du croisement en plusieurs points	65
3.7	Procédure de déroulement du croisement uniforme	65
3.8	Représentation schématique de l'opération de mutation dans une chaîne de bits	66
4.1	Principe de convolution et déconvolution dans un profil de sol	80
4.2	Nomenclature de description des mouvements du sol	82
4.3	Une couche de sol surmontant un substratum rocheux soumise à la propagation verticale des ondes de cisaillement	85
4.4	Profil de sol stratifié horizontalement soumis à la propagation verticale des ondes de cisaillement	86
4.5	Une couche de sol non-homogène soumise à la propagation verticale des ondes de cisaillement et la distribution du module de cisaillement avec la profondeur	89
4.6	Deux sites A et A' constitués de sols reposant sur un substratum rocheux commun	94
5.1	Topologie de la fitness sur l'espace de recherche : (a) par rapport à la taille de la population et le nombre de générations, (b) par rapport à la probabilité de croisement et le nombre de générations, (c) par rapport à la probabilité de mutation et le nombre de générations, (d) par rapport aux poids de pondération w_1 et w_2	99
5.2	Courbes de convergence de trois essais indépendants	102
5.3	Evolution de la population dans la phase d'optimisation par la méthode d'algorithme génétique adaptatif : chaque point désigné par o représente un individu dans l'espace des paramètres; le point désigné par ☆ représente la solution finale: (a) distribution de la population initiale, (b) distribution de la 10 ^{ème} génération de population, (c) distribution de la 17 ^{ème} génération, (d) distribution de la 30 ^{ème} génération	103

5.4	Comparaison des fonctions d'amplification exacte et identifiée de la couche homogène équivalente	103
5.5	Situation du site de Garner Valley et l'activité sismique de la région	106
5.6	Accélérations enregistrées à la surface libre du site de Garner Valley	107
5.7	Accélérations enregistrées à 22 <i>m</i> de profondeur du site de Garner Valley	108
5.8	Comparaison entre les fonctions d'amplification expérimentales du profil de sols du site de Garner Valley, calculées avec les méthodes du rapport spectral standard et du rapport inter-spectral	109
5.9	Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport spectral standard, la fonction d'amplification théorique calculée avec les valeurs moyennes pondérées et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification du modèle 1 du profil du site de Garner Valley	111
5.10	Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport inter-spectral, la fonction d'amplification théorique calculée avec les valeurs moyennes pondérées et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification, du modèle 1 du profil du site de Garner Valley	111
5.11	Evolution de la valeur minimale de la fitness en fonction du nombre de couches considéré en chaque étape d'optimisation	113
5.12	Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport spectral standard, la fonction d'amplification théorique calculée avec les valeurs moyennes pondérées et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification du modèle 2 du profil du site de Garner Valley	114
5.13	Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport inter-spectral, la fonction d'amplification théorique calculée avec les valeurs moyennes pondérées et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification du modèle 2 du profil du site de Garner Valley	114

5.14	Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport spectral standard, la fonction d'amplification théorique calculée avec les valeurs expérimentales actuelles et la fonction d'amplification théorique calculée avec les valeurs expérimentales ajustées, du profil du site de Garner Valley	116
5.15	Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport inter-spectral, la fonction d'amplification théorique calculée avec les valeurs expérimentales actuelles et la fonction d'amplification théorique calculée avec les valeurs expérimentales ajustées, du profil du site de Garner Valley	117
5.16	Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport spectral standard et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification du modèle 3 du profil du site de Garner Valley	118
5.17	Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport inter-spectral et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification du modèle 3 du profil du site de Garner Valley . .	118
5.18	Profil de la vitesse des ondes de cisaillement de différents modèles correspondant au site de Garner Valley	119
5.19	Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport spectral standard et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification du modèle 4 du profil du site de Garner Valley	120
5.20	Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport inter-spectral et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification du modèle 4 du profil du site de Garner Valley . .	121
6.1	Localisation la ville d'Adapazari et topographie de la région	125
6.2	Coupe transversale de la gravimétrie du sous-sol et topographie de la surface de la ville d'Adapazari suivant la direction EF	125
6.3	Accélérations enregistrées durant la réplique du 12 septembre 1999, dans la station implantée en affleurement rocheux (site E)	126

6.4	Accélérations enregistrées durant la réplique du 13 septembre 1999 dans la station implantée en affleurement rocheux (site E)	126
6.5	Accélérations enregistrées durant la réplique du 13 septembre 1999 dans la station implantée dans la partie alluviale (site F)	127
6.6	Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport spectral standard et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification du site F	129
6.7	Accélérogramme moyen de la réplique du 12 septembre 1999 dans la station implantée dans le site F	130
6.8	Accélérations enregistrées dans la station implantée dans le site d'Hussein Dey	132
6.9	Accélérations enregistrées dans la station implantée dans le site de Kouba	132
6.10	Localisation des communes d'Hussein Dey et de Kouba par rapport à Alger centre	133
6.11	Rapport des amplifications expérimentales lissé des sites d'Hussein Dey et de Kouba	134
6.12	Comparaison entre le rapport des amplifications expérimentales lissé des sites d'Hussein Dey et de Kouba, et le module des fonctions de transfert, identifié avec le modèle 1	135
6.13	Profils des masses volumiques des sites d'Hussein Dey et de Kouba, identifiés avec le modèle 1	136
6.14	Profils des vitesses des ondes de cisaillement des sites d'Hussein Dey et de Kouba, identifiés avec le modèle 1	136
6.15	Profils des vitesses des amortissements des sites d'Hussein Dey et de Kouba, identifiés avec le modèle 1	137
6.16	Comparaison entre le rapport des amplifications expérimentales lissé des sites d'Hussein Dey et de Kouba, et le module des fonctions de transfert, identifié avec le modèle 2	137
6.17	Profils des vitesses des ondes de cisaillement des sites d'Hussein Dey et de Kouba, identifiés avec le modèle 2	138

Liste des notations

Abréviations

AG	Algorithme Génétique
AGA	Algorithme Génétique Adaptatif
HVSR	Horizontal to Vertical Spectral Ratio (ou rapport spectral horizontal-vertical)
LM	Levenberg-Marquardt
NHVSR	Normalized Horizontal to Vertical Spectral Ratio (ou rapport spectral horizontal-vertical normalisé)
PGA	Peak Ground Acceleration (ou accélération maximale du sol)
PSA	Pseudo Spectral Acceleration (ou accélération pseudo-spectrale)
RIS	Rapport Inter-Spectral
RSS	Rapport Spectral Standard
SH	Shear Horizontal (ou onde de cisaillement horizontale)
TF	Transformé de Fourier

Notations

A_{NHVSR}	Amplitude de la période prédominante déterminer la méthode NHVSR
a_{max}	Accélération maximale du sol
$c_j(x)$	Contrainte d'inégalité
$F(\mathbf{x})$	Fonction objectif globale ou fitness
$\mathbf{f}(\mathbf{x})$	Vecteur de fonctions objectif
$f_j(\mathbf{x})$	Fonction objectif

f_j^{max}	Valeur maximale de la fonction $f_j(\mathbf{x})$
f_j^{min}	Valeur minimale de la fonction $f_j(\mathbf{x})$
B	Gradient de la fonction objectif
h	Epaisseur de la couche de sol
H	Matrice hessienne de la fonction objectif
C	Matrice de covariance
i	Nombre complexe ($i^2 = -1$)
I	Matrice identité
j	Indice
k	Indice
n_p	Nombre de paramètres optimisés
n_c	Nombre de contraintes
n_f	Nombre de fonctions objectif
n_ω	Nombre de pics d'amplifications
n_l	Nombre de couches
n_b	Nombre de bits
n_{ip}	Nombre d'individus-parents
n_{cp}	Nombre de points de croisement
n_e	Nombre d'évaluations maximal
n_{pop}	Nombre d'individus ou taille de la population
P_s	Probabilité de sélection
P_c	Probabilité de croisement
P_m	Probabilité de mutation
q	rapport d'impédance complexe
$r(t)$	Signal d'entrée ou accélérations enregistrées au rocher de référence
$R(\omega)$	Transformé de Fourier de $r(t)$
$s(t)$	Signal de sortie ou accélérations enregistrées en surface libre
$S(\omega)$	Transformé de Fourier de $s(t)$
$T_e(\omega)$	Fonction d'amplification expérimentale
$T_m(\mathbf{x}, \omega)$	Fonction de transfert théorique
v_{max}	Vitesse maximale du sol
v_r	Vitesse des ondes SH dans la roche
v_s	Vitesse des ondes SH dans la couche de sol

v_s^*	vitesse de cisaillement complexe dans la couche de sol
w_j	Poids de pondération
\mathbf{x}	Vecteur des paramètres à optimiser
\mathbf{x}^*	Vecteur des paramètres optimaux
$\mathbf{x}^{(0)}$	Vecteur des valeurs initiales des paramètres à optimiser
$\mathbf{x}^{(j)}$	Vecteur des paramètres à optimiser à l'itération j
x_j	Paramètre
x_j^{max}	Borne supérieure du paramètre x_j
x_j^{min}	Borne inférieure du paramètre x_j
α	coefficient de répartition
δx_j	coefficient de variation du paramètre x_j
β_{jk}	coefficient d'interaction entre les paramètres x_j et x_k
Γ_e	Rapport des fonctions d'amplifications expérimentales
Γ_m	Rapport des fonctions d'amplifications théoriques
θ	Taux de croissance d'une population
θ_0	Taux de croissance initial d'une population
$\lambda^{(i)}$	coefficient d'atténuation
ξ_s	Coefficient d'amortissement dans la couche de sol
ξ_r	Coefficient d'amortissement de la roche
ρ_r	Masse volumique de la roche
ρ_s	Masse volumique dans la couche de sol
τ	Période prédominante
τ_{NHVSR}	Période prédominante déterminer la méthode NHVSR
$\psi_r(\omega)$	Densité spectrale de puissance
$\psi_{rs}(\omega)$	Densité inter-spectrale de puissance
ω	Pulsation angulaire
ω_{max}	Pulsation angulaire maximale
ω_m^{*j}	Pulsation naturelle théorique
ω_e^{*j}	Pulsation naturelle expérimentale
\mathfrak{R}	Espace de recherche

Introduction générale

1. Problématique

Durant ces dernières décennies, les connaissances dans le domaine du génie civil ont fortement progressé. Actuellement, l'ingénieur dispose d'un grand nombre d'outils théorique et expérimental pour l'analyse et la conception de divers ouvrages. Combinés aux progrès informatiques qui rendent les micro-ordinateurs plus performants et accessibles, l'usage des méthodes numériques se banalise en génie civil.

Imprévisibles et dévastateurs, les séismes figurent parmi les phénomènes naturels les plus violents et sont à l'origine de la majorité des dégâts et des effondrements des constructions. Ce phénomène doit être pris en considération lors de la conception des constructions de génie civil. Subséquemment, l'objectif principal de la réglementation parasismique est la sauvegarde des vies humaines et la limitation des destructions des constructions.

Les séismes sont des mouvements transitoires et passagers, provoqués par la libération brutale des contraintes accumulées durant des années, des dizaines, voire des centaines d'années, dans la région où ils se manifestent et se propagent, au loin, sous forme d'ondes sismiques [Baddari et al., 1994]. Ils peuvent dévaster une région entière et sinistrer des dizaines voire des centaines de milliers de personnes. Ceci peut être expliqué par le fait que, lorsqu'une onde

émise par un séisme atteint un bassin sédimentaire, elle est amplifiée et piégée dans le bassin. Cet effet de site se traduit par des vibrations du sol d'amplitude plus importante et de durée plus longue qu'aux sites rocheux, à des fréquences bien particulières qui varient spatialement selon la géologie locale [Renalier, 2010].

Par ailleurs, plusieurs séismes destructifs ont démontré que l'amplification du mouvement du sol et le mode de rupture associés sont dûs aux conditions de site locales [Assimaki et al., 2007]. Donc, les conditions locales de site influent de façon significative sur le mouvement sismique des sols. En effet, l'inclusion des effets de sites dans les codes sismiques a reçu une attention considérable durant ces dernières années [Afra et al., 2007].

Ainsi, il est très important d'estimer les paramètres dynamiques des couches constituant les profils de sol afin de prévoir les performances des ouvrages pendant les séismes. Parmi les paramètres qui affectent la réponse d'un profil de sol on peut citer : les épaisseurs des couches, les paramètres élastiques et non-élastiques des couches de sol, les caractéristiques du mouvement d'incident (fréquence fondamentale, accélération maximale au sol), etc.

Cependant, la connaissance des conditions de site est, généralement, imparfaite à cause des sources d'information (essais, enregistrements sismiques, etc.) qui restent approximatives, limitées et coûteuses. Habituellement, la reconnaissance et l'identification de ces caractéristiques se fait par des essais in-situ et/ou au laboratoire. Cependant, ces essais sont très coûteux et nécessitent du matériel lourd et du personnel très qualifié. De plus, il est reconnu que les caractéristiques des sols sont confuses, variables dans l'espace et dans le temps, ce qui rend leur utilisation, dans les calculs, périlleuse et incertaine. Par conséquent, l'ingénieur est, parfois, appelé à prendre des décisions cruciales en utilisant une information incomplète et défectueuse.

Les enregistrements sismiques constituent une source d'information inestimable, susceptible de nous donner des renseignements sur le comportement dynamique réel des systèmes géotechniques qui permettront, ainsi, de réduire le risque sismique dans les régions à forte sismicité [Garcia et al., 2004]. Les réseaux de surveillance sismique et accélérométrique constituent le moyen pratique le plus utilisé pour collecter ces informations.

La surveillance sismique consiste à détecter, localiser et évaluer les séismes. Pour fonctionner, la surveillance sismique s'appuie sur des réseaux de stations sismologiques. Ces

stations enregistrent, en continu, les vibrations du sol. La densité et la fiabilité de ces réseaux sont les garants de l'efficacité (précision et continuité) de la surveillance [NRC, 2006].

Malheureusement, une surveillance sismique de tels systèmes à partir d'un réseau étendu ne fournit pas, généralement, assez d'informations pour identifier de façon unique, et exacte les mécanismes de la réponse sismique locale. De plus, ces enregistrements sont, en grande partie, affectés par les effets d'amplification du mouvement sismique dans les couches de sol [Garcia et al., 2004].

Pour conclure, les techniques existantes sont très diverses et efficaces mais sont particulièrement trop chères, et nécessitent du matériel lourd et du personnel très qualifié. Les travaux de recherches présentés dans cette thèse proposent de nouveaux outils permettant de réaliser une étude de caractérisation sismique de sites performante et moins chère.

2. Objectifs

Le mouvement sismique observé, en surface, est significativement influencé par les conditions locales de site. Aussi, il a été largement reconnu qu'il y a des désaccords significatifs entre les résultats de laboratoire et les observations in-situ, notamment pour les amortissements, qui sont des paramètres importants de la réponse de site. A cet effet, plusieurs approches ont été proposées pour identifier ces caractéristiques permettant ainsi de réduire le coût de l'opération, et d'optimiser les divergences observées entre les différents résultats [Zeghal et al., 1995 ; Baise et al., 2000 ; Harichane et al., 2005].

L'objectif principal de ce travail de thèse consiste à fournir une autre approche analytique, numérique et expérimentale pour caractériser un site, et réduire ainsi considérablement le coût de l'opération de cette pratique. Cette approche utilise l'identification de systèmes et les enregistrements accélérométriques. En effet, l'identification de systèmes appliquée à la réponse de sol durant les séismes a montré son efficacité dans l'estimation des caractéristiques de sol dans diverses études antérieures [Kurita et al., 1998 ; Ghayamghamian et al., 2001 ; Mikami et al., 2003 ; Harichane et al., 2005].

Dans notre cas, l'approche proposée consiste en la mise en place d'une procédure

d'identification hybride et adaptative permettant d'estimer un ensemble de paramètres liés au comportement dynamique des profils de sol.

Dans cette procédure, une fonction d'amplification théorique (amplitude de la fonction de transfert) est définie, et exprimée en fonctions des différents paramètres du modèle caractérisant les couches constituant le profil de sol. D'autre part, une fonction d'amplification expérimentale est évaluée à partir de deux enregistrements accélérométriques : (1) soit en utilisant deux points, l'un à la surface libre et l'autre sur l'affleurement rocheux hypothétique, ou (2) en utilisant deux enregistrements en surface libre de deux sites sans avoir recours à l'autre enregistrement sur rocher rigide ou sur affleurement rocheux. Ces deux fonctions sont intégrées dans un processus qui consiste à optimiser les écarts entre les fonctions d'amplification théorique et empirique et de tester un certain nombre de solutions potentielles jusqu'à l'obtention de la solution adéquate du problème.

La mise en œuvre de cette approche devrait aider les ingénieurs à mieux caractériser les sites et réduire ainsi le coût de la reconnaissance de sites.

3. Organisation de la thèse

Cette thèse se divise en six chapitres, dont le contenu est précisé dans les paragraphes suivants.

Dans le premier chapitre, une recherche bibliographique sur les principales méthodes utilisées dans la caractérisation expérimentale de site est présentée. Ensuite, nous présenterons brièvement les méthodes proposées par différents auteurs pour caractériser un site à partir d'enregistrements sismiques, seulement. Puis, nous expliquerons en détail la méthode qui sera utilisée, ultérieurement, pour caractériser plusieurs sites du Nord de l'Algérie, à partir d'enregistrements sismiques en surface durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003.

Dans le second chapitre, une recherche bibliographique sur les problèmes d'optimisation est présentée. Nous abordons les notions de base de l'analyse inverse en donnant un bref aperçu sur différentes définitions liées aux problèmes d'optimisation. Ensuite, les concepts de base de l'optimisation mono-objectif sont exposés avec leurs méthodes de résolution les plus utilisées en essayant d'apporter un regard critique sur chacune d'elles. Ensuite, nous exposons

les définitions de base de l'optimisation multi-objectif, ainsi que les méthodes de résolution les plus utilisées. Enfin, nous proposons la procédure d'optimisation qui nous paraît la mieux adaptée, et qui sera retenue pour développer un programme numérique pour la caractérisation numérique de sites.

Le troisième chapitre est consacré au développement de la procédure de caractérisation et d'identification des paramètres de profils de sol en utilisant une hybridation entre deux méthodes d'optimisations numériques. Dans cette procédure, le choix s'est porté sur l'hybridation de la méthode d'algorithme génétique adaptatif et la méthode de Levenberg-Marquardt. Chaque méthode est utilisée là où sa performance est la meilleure. En fonction du modèle du profil de sol choisi et des paramètres impliqués par le modèle, une fonction de transfert est calculée. Cette dernière est ensuite comparée à la fonction d'amplification expérimentale obtenue à partir de deux enregistrements accélérométriques. Cette comparaison se traduit par l'évaluation des écarts entre les fonctions calculées numériquement et expérimentalement. Ces écarts sont, ensuite, minimisés par la procédure élaborée et les paramètres sont ainsi déterminés.

Dans le quatrième chapitre, nous traitons les méthodes d'évaluation de la fonction d'amplification. Dans la littérature, plusieurs approches sont proposées pour déterminer la fonction d'amplification expérimentalement ou théoriquement, à partir d'un, de deux ou plusieurs enregistrements. Ici, nous nous limitons à présenter les techniques qui permettent d'obtenir ces fonctions à partir de deux enregistrements accélérométriques. Nous passons d'abord brièvement en revue les différentes techniques proposées dans la littérature. Ensuite, nous exposons les méthodes expérimentales et théoriques qui seront utilisées, par la suite, dans la procédure élaborée pour la caractérisation numérique de sites. A la fin, nous proposons des formulations qui permettent aussi l'identification simultanée des profils de sols de deux sites à partir de deux enregistrements sismiques en surface libre, seulement.

Le cinquième chapitre propose des applications et validations de la procédure d'identification sur deux exemples. Le premier exemple permet de valider numériquement notre procédure. Il consiste en l'identification des propriétés d'une couche homogène équivalente reposant sur un substratum rocheux. Ce modèle est choisi parce qu'il implique moins de paramètres que les autres modèles et permettra de mieux tester l'efficacité et la sensibilité de la procédure et démontre l'intérêt du choix d'utilisation d'un algorithme génétique adaptatif poursuivi par la

méthode Levenberg-Marquardt. Dans le deuxième exemple, nous validons expérimentalement la procédure élaborée en utilisant les données enregistrées sur le site de Garner Valley en Californie (Etats Unis) pendant la période 1989-1991 et les quatre modèles traités dans cette thèse. Cet exemple permettra d'analyser les performances pratiques et d'évaluer la qualité des résultats et déterminer les avantages et les inconvénients de cette procédure.

Le dernier chapitre est consacré à l'application de la procédure sur des problèmes plus complexes au travers de deux autres exemples. Le premier exemple illustre l'application de la procédure pour la détermination des coefficients d'amortissement et de l'accélérogramme du séisme de Kocaeli du 17 août 1999, non disponibles pour le site d'Adapazari en Turquie. Dans le deuxième exemple, la procédure a été utilisée pour l'identification simultanée des caractéristiques de profils de sols de deux sites à partir d'un seul enregistrement d'accélération à la surface libre de chaque site.

Enfin, cette thèse sera clôturée par une conclusion générale qui retracent les grandes lignes du travail effectué, et souligne les différents résultats obtenus, ainsi que les perspectives envisagées pour des travaux futurs.

Ce travail a donné lieu à deux publications dans une revue internationale :

- **Khellafi A.M., Harichane Z., Afra H., Sadouki A. (2013).** A case study of accelerometric records analysis of May 21st, 2003, Boumerdes (Algeria) earthquake. International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering, 4(2), pp 34-52.
- **Khellafi A.M., Harichane Z., Afra H., Erken A. (2016).** Prediction of parameters of soil stratum and earthen dams from free field acceleration records. International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering, 7(1), pp 33-56.

et à trois communications dans des manifestations internationales :

- **Afra H., Harichane Z., Khellafi A.M., Bennai R. (2010).** Utilisation des enregistrements de mouvements sismiques en surface de sol dans la caractérisation de sites. Colloque International du CRAAG, 12-13 octobre, Alger.

- **Khellafi A.M., Harichane Z., Djillali Berkane H., Afra H. (2013).** Identification des caractéristiques de profils au moyen d'un schéma hybride combinant les algorithmes génétiques et la méthode de Levenberg-Marquardt. International Symposium: Commemoration of the Boumerdes Earthquake of 21 May 2003 (Mw 6.8) – 10 years after, 21-23 May, CRAAG Algiers.
- **Khellafi A.M., Afra H., Harichane Z., Chehat A. (2015).** Identification des caractéristiques d'une couche de sol non homogène à paramètres aléatoires à partir d'enregistrements accélérométriques en utilisant une méthode d'optimisation hybride multi-objective. 9ème Colloque National AFPS 2015, 1-2 décembre, IFSTTAR Marne la Vallée, France.
- **Khellafi A.M., Afra H., Harichane Z., Chehat A. (2015).** Identification des caractéristiques de profils de sols à partir d'enregistrements accélérométriques en utilisant une méthode d'optimisation hybride multi-objectif. 13th Arab Structural Engineering Conference, 13-15 décembre, Université de Blida 1.

Ainsi, cette thèse de Doctorat constitue une contribution utile pour la recherche dans le domaine de génie civil, ou éventuellement pour les bureaux d'études techniques chargés des études géotechniques et sismiques. Ce travail ouvre des perspectives pour une caractérisation rigoureuse de sites servant d'assise aux constructions, pour un coût réduit comparé à l'approche classique utilisant les essais in-situ et/ou au laboratoire lorsque des mouvements de sol enregistrés lors de séismes antérieurs sont disponibles.

Chapitre 1**Techniques expérimentales de
caractérisation de sites****1.1. Introduction**

La caractérisation de sites est une phase importante dans la réalisation de toute étude incluant les risques liés aux séismes et aux mouvements de terrains. En effet, l'analyse de la réponse sismique d'un site doit tenir compte du mécanisme de rupture de la faille et de la propagation des ondes sismiques jusqu'à ce qu'elles atteignent la surface du site (Fig. 1.1).

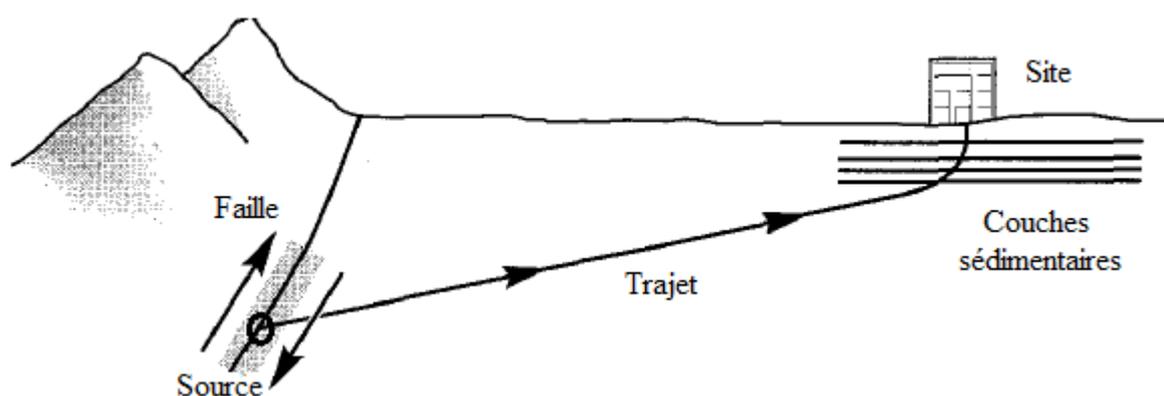


Fig. 1.1. Processus de propagation des ondes sismiques de la source jusqu'au site étudié [Kramer, 1996].

Ces ondes sismiques peuvent voyager à travers des centaines de kilomètres dans les couches de roches profondes avant d'atteindre des bassins sédimentaires de dimensions moins importantes. Cependant, ce sont ces couches sédimentaires, proches de la surface, qui jouent le rôle le plus important dans la détermination des caractéristiques du mouvement de la surface du sol [Bouafia et al., 2011].

L'objectif fondamental de la caractérisation de sites est de fournir des informations suffisantes et fiables sur les conditions de site afin de prendre les bonnes décisions lors de la construction d'un ouvrage [Cambefort, 1980]. Cette caractérisation doit fournir des informations sur les diverses propriétés des sols, qui sont déterminées par exploration, en profondeur, des couches du sous-sol afin d'identifier et d'évaluer les dangers potentiels. Elle comprend, en général, les investigations par des essais au laboratoire et in-situ, l'interprétation des données et leurs présentations sous forme de cartes.

Les approches concernant la caractérisation de sites ont été largement débattu dans différents ouvrages et articles traitant du domaine du Génie Civil [Vera-Grunauer et al., 2006 ; Huang et al., 2008]. Cette documentation montre que plusieurs méthodes sont proposées et utilisées dans la pratique pour la caractérisation de sites.

Ce chapitre passe en revue les principales méthodes employées pour la caractérisation expérimentale de sites. Nous allons exposer les différentes méthodes utilisées dans la pratique en citant, pour chaque cas, les différents moyens expérimentaux les plus utilisés. Ensuite, nous présenterons brièvement les méthodes proposées par différents auteurs pour caractériser un site à partir d'enregistrements sismiques, seulement. Puis, nous détaillerons la méthode qui sera utilisée ultérieurement pour caractériser plusieurs sites du Nord de l'Algérie à partir d'enregistrements sismiques en surface, enregistrés durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003.

1.2. Méthodes de caractérisation d'un site

Pour se prévenir des dégâts causés par un séisme, des analyses multiples basées sur un grand nombre de données sont nécessaires. Couramment, les méthodes utilisées pour la caractérisation de sites sont regroupées en quatre grandes catégories [Anbazhagan, 2011] :

- méthodes géologiques,
- méthodes géomorphologiques,
- méthodes géotechniques,
- méthodes géophysiques.

Ces méthodes sont discutées brièvement au fur et à mesure de la lecture de ce chapitre.

1.2.1. Méthodes géologiques

La caractérisation géologique de sites se focalise, généralement, sur l'évaluation des formations géologiques locales et la réalisation d'un relevé décrivant les différentes formations géologiques du sous-sol. Les méthodes géologiques permettent, aussi, la localisation et la quantification des failles actives du substratum qui présentent des évidences de déplacements récents et susceptibles de déclencher des séismes. Ce relevé ou carte doit indiquer, clairement, les formations géologiques et leurs variations.

Les méthodes géologiques utilisées dans la pratique peuvent être divisées en deux catégories principales : les investigations en surface et les investigations souterraines. Ces méthodes sont basées sur l'utilisation des informations disponibles, éventuellement :

- cartes géologiques,
- l'exploration et investigations des terrains,
- les sondages et les forages.

1.2.2. Méthodes géomorphologiques

Souvent confondue avec la caractérisation géologique, la géomorphologie caractérise l'ensemble des formes de reliefs des sites. Son objectif est de rechercher comment les formes de reliefs sont nées, comment elles ont évolué au cours du temps et quels sont les processus responsables de leur formation.

Les méthodes géomorphologiques utilisées dans la pratique sont très variées. Chacune d'entre elles possède des avantages et des inconvénients. Cependant, l'utilisation conjointe de ces

différentes méthodes permet une interprétation fiable de l'occurrence et de l'évolution des phénomènes géomorphologiques. On distingue [Goudie et al., 1990] :

- **Cartographie géomorphologique** : a pour but de délivrer des informations sur la géométrie des formes du relief, la nature et la structure des formations superficielles, l'activité des processus et l'âge des formes du relief.
- **Méthodes sédimentologiques** : l'analyse des dépôts sédimentaires (granulométrie, faciès...) permet à la fois de différencier leurs conditions d'érosion, leurs conditions de transport, ainsi que les conditions de dépôt (et leur évolution).
- **Méthodes thermiques** : le meilleur moyen de connaître les caractéristiques thermiques et l'évolution d'un terrain est de mesurer sa température directement en forages.
- **Méthodes géodésiques** : (GPS, théodolites...) permettent à la fois la localisation de points de mesures (lors de répétition), la cartographie ainsi que la mesure de déplacement de la surface du terrain.
- **Stations météorologiques et hydrologiques** : les variables météorologiques comme la température de l'air, les précipitations (pluie et neige) et les écoulements de surface jouent un rôle fondamental dans l'évolution des phénomènes glaciaires, périglaciaires, gravitaires et torrentiels.
- **Téledétection** : concerne l'acquisition d'informations à distance par le biais de multiples instruments (radar, lasers, appareils photographiques...) utilisant différentes longueurs d'onde.

1.2.3. Méthodes géotechniques

La caractérisation géotechnique de sites est effectuée à l'aide de plusieurs essais réalisés sur site et au laboratoire. Ces tests sont effectués en divers points éparpillés de la surface du site. Leur nombre dépend de divers facteurs techniques et économiques. Il dépend, aussi, du type de projet ainsi que d'autres paramètres tels que la géologie et la topographie du site.

Les essais géotechniques employés sont purement expérimentaux. Ils sont regroupés en trois catégories :

- **Sondages** : deux types sont réalisés, l'un permettant de réaliser des tests de résistance au sol au moyen d'une sonde que l'on descend au fond d'un forage, et l'autre permettant de prélever des échantillons de sol.
- **Essais au laboratoire** : sont réalisés selon des procédures et au moyen d'appareils dûment normalisés, à partir d'échantillons remaniés ou intacts. Ils permettent d'identifier et classer les sols et mesurer leurs propriétés physiques, mécaniques, chimiques et hydrauliques.
- **Essais in-situ** : sont réalisés à l'aide de machines ou appareils sur site. Ils permettent de mesurer certaines propriétés des sols, sur site, dans les conditions locales.

Les appareillages de mesure et les procédures de réalisation de ces essais sont largement discutées dans divers ouvrages [[Philipponnat et al., 1979](#) ; [Filliat, 1981](#)].

1.2.4. Méthodes géophysiques

Les méthodes géotechniques utilisent des tests à petite échelle effectués sur de petits volumes représentés par des forages ou des échantillons de sol. Cependant, il est parfois nécessaire d'obtenir un profil détaillé du sous-sol du site étudié. Donc une exploration à grande échelle s'impose, et la réalisation d'explorations géotechniques sur de grandes surfaces est très chère. Les méthodes géophysiques permettent de surmonter cet inconvénient, et sont la seule alternative pour éviter ces difficultés en fournissant la variabilité latérale des matériaux près de la surface sous un site.

Actuellement, il existe plusieurs méthodes géophysiques qui utilisent les lois de la physique pour caractériser et explorer le sous-sol. Elles consistent en la recherche d'une variation d'un paramètre physique correspondant à la présence d'un obstacle géologique à l'intérieur de la terre. Toutefois, c'est la combinaison de plusieurs d'entre elles qui permettra de fournir la réponse adéquate.

Les méthodes géophysiques sont regroupées en cinq grandes catégories [[Anbazhagan, 2011](#)] :

- **Méthodes sismiques** : elles consistent à envoyer des ondes sonores (créées par un coup de masse sur une plaque métallique, l'explosion de dynamite, etc.) dans le sol et d'enregistrer le retour en surface des ondes directes, réfléchies ou réfractées. Pour ce faire, différentes techniques sont employées dont : sismique réfraction, sismique réflexion, MASW (Multiple Analysis of Surface Waves), cross-hole, etc.
- **Méthodes électromagnétiques** : elles consistent à mesurer les propriétés des ondes électromagnétiques et leur interaction avec le terrain en se basant sur l'induction de courant électrique dans les corps conducteurs, lorsque ceux-ci sont excités par un champ magnétique. Ces ondes se réfléchissent et se réfractent, partiellement, lorsqu'elles rencontrent un contraste d'impédance électromagnétique. Dans cette catégorie différentes techniques sont employées dont : RF-EM (Radio Frequency ElectroMagnetics), RMT (Radio MagnétoTellurique), etc.
- **Méthodes électriques** : les méthodes électriques par courant continu ont pour objet de déterminer les propriétés des sols par la mesure de leur résistivité. Cette dernière varie en fonction de la nature du matériau, de la teneur en eau, de la porosité du milieu et de la salinité de l'eau. Les techniques employées dans ce cas sont : sondage électrique, panneau électrique, etc.
- **Méthodes gravimétriques** : elles consistent à étudier les variations du champ de la pesanteur à la surface du sol par la mesure des variations de densité du sous-sol. Ces méthodes ne servent pas à mesurer la gravité absolue mais ses variations dans l'espace et dans le temps. En génie civil, la microgravimétrie est la seule technique pour le moment. D'autres techniques existent mais sont applicables dans d'autres domaines.
- **Diagraphie de radioactivité naturelle** : elle consiste à mesurer le rayonnement naturel émis en cours de la désintégration des atomes des éléments radioactifs présents dans les couches sédimentaires. La radioactivité du sol est obtenue en émettant des impulsions par une sonde de mesure descendue dans un forage. Ces impulsions sont intégrées dans un circuit dit *intégrateur*, et converties en une courbe par un appareil enregistreur dont la vitesse de déroulement du film est synchronisée avec le mouvement de la sonde.

1.3. Caractérisation sismique d'un site

Actuellement, plusieurs méthodes expérimentales sont proposées dans la littérature pour déduire directement les caractéristiques de sites à partir des enregistrements sismiques [Tokimatsu et al., 2001 ; Bouckovalas et al., 2002 ; Boominathan, 2004 ; Renalier, 2010].

Ces méthodes récentes sont encore à un stade d'essai. Elles permettent de déterminer certains paramètres (vitesse des ondes S et la période prédominante) ou de classer un site afin de permettre la prise des bonnes décisions lors de la construction d'un ouvrage.

Dans cette thèse, nous nous limiterons à l'application de la méthode proposée par Bouckovalas et al., (2002). Cette méthode permet de classer un site selon la nature du sous-sol, en utilisant conjointement les deux méthodes les plus couramment utilisées dans la pratique, soit :

- le rapport spectral horizontal-vertical (Horizontal to Vertical Spectral Ratio : HVSR),
- le rapport de la vitesse maximale du sol sur l'accélération maximale du sol (v_{max} / a_{max}).

Ces deux méthodes sont discutées en détail ci-dessous, puis appliquées sur un cas d'étude réel.

1.3.1. Méthode des rapports spectraux horizontal-vertical

Cette technique a été proposée par Nogoshi et Igarashi en 1971, et utilisée par la communauté japonaise jusqu'en 1989 lorsque Nakamura a fait propager cette technique dans le monde.

Basée sur des explications plutôt qualitatives que quantitatives, La méthode HVSR, ou méthode de Nakamura, consiste à estimer la fréquence prédominante d'un site, et identifier les sites présentant des risques d'amplification sismique, en effectuant le rapport de la moyenne des composantes horizontales sur la composante verticale des amplitudes spectrales du bruit enregistré.

La période prédominante τ du site, pour un milieu unidimensionnel avec une couche d'épaisseur h et de vitesse d'ondes de cisaillement v_s surmontant un substratum rocheux, est :

$$\tau = \frac{4h}{v_s} \quad (1.1)$$

Cette méthode consiste à poser un capteur de vibration de trois composantes (Vertical : V, Nord-Sud : N-S, Est-Ouest : E-O) sur le site à étudier.

Les trois composantes du bruit ambiant enregistrées durant plusieurs périodes de quelques minutes seulement sont traitées de la manière suivante [Duloutre, 2010] :

1. Pour chaque enregistrement on recherche d'abord des fenêtres de signal dans lesquelles le signal est le plus stable (stationnaire) possible. Un traitement spectral est alors appliqué sur ces fenêtres.
2. H représente l'amplitude spectrale lissée des composantes horizontales du bruit de fond sismique, obtenue par combinaison de l'amplitude spectrale des deux composantes N-S et E-O.
3. V représente l'amplitude spectrale lissée de la composante V du même enregistrement.
4. Le rapport entre ces deux amplitudes spectrales (H/V) est effectué sur plusieurs fenêtres de temps et le rapport moyen est donné en résultat.

S'il existe un effet de site au point de mesure, la courbe résultante du traitement présente un pic à une fréquence correspondant à la fréquence prédominante. Ces courbes sont généralement plates sur des sites à rocher affleurant.

Afin de valider cette méthode, plusieurs études ont comparé les résultats obtenus avec cette méthode avec ceux obtenus avec la méthode spectrale basée sur des enregistrements sismiques où une référence est prise au niveau du rocher. Plusieurs auteurs concluent que, les fréquences prédominantes coïncident dans les deux méthodes [Field et al., 1995 ; Bonilla et al., 1997].

Outre la détermination des fréquences prédominantes du site, la méthode HVSR permet d'estimer l'épaisseur des sédiments superficiels et la profondeur du substratum rocheux, notamment dans le cas où il y a un fort contraste d'impédance entre les sédiments et le substratum rocheux.

Cependant, la méthode HVSR est très dépendante de la méthode de lissage utilisée. Il

convient dans ce cas d'utiliser la méthode HVSR modifiée soit : la méthode NHVSR (Normalized Horizontal to Vertical Spectral Ratio : NHVSR). Cette méthode procède comme suit :

1. Calcul de l'accélération pseudo-spectrale (Pseudo Spectral Acceleration : PSA) pour un amortissement égal à 5 % des trois composantes N-S, E-O et V pour une station donnée.
2. Normalisation des PSA obtenues précédemment, en les divisant par l'accélération maximale du sol (Peak Ground Acceleration : PGA).
3. Le rapport entre la PSA normalisée de la composante N-S (également la composante E-O) et la composante V représente le rapport spectral normalisé.

Ainsi, les méthodes HVSR et NHVSR sont presque similaires, mais la méthode HVSR est plus sensible à la méthode de lissage, et ne peut pas être interprétée clairement comme la méthode NHVSR. De plus, la méthode NHVSR est plus sensible aux conditions du sol, et les périodes prédominantes et celles de leurs amplitudes correspondantes sont plus faciles à identifier [Bouckovalas et al., 2002].

1.3.2. Méthode du rapport v_{max}/a_{max}

La vitesse maximale et l'accélération maximale des sols peuvent être utilisées dans la caractérisation de sites afin de classer les sites étudiés et déterminer leurs périodes fondamentales.

En effet, pour un mouvement harmonique, le déplacement horizontal d'une onde SH est donné par [Jafarian et al., 2010] :

$$u = A \cos\left(\frac{\omega Z}{v_s}\right) e^{i\omega t} \quad (1.2)$$

où ω est la pulsation angulaire. La vitesse et l'accélération sont obtenus en calculant la dérivée première et deuxième de l'Eq. (1.2), soit :

$$v = i\omega A \cos\left(\frac{\omega Z}{v_s}\right) e^{i\omega t} \Rightarrow v_{max} = \omega A \quad (1.3)$$

et

$$a = -\omega^2 A \cos\left(\frac{\omega z}{v_s}\right) e^{i\omega t} \Rightarrow a_{max} = \omega^2 A \quad (1.4)$$

Donc, la relation entre la vitesse maximale et l'accélération maximale est donnée par l'équation suivante :

$$v_{max} = \frac{1}{\omega} a_{max} \quad (1.5)$$

ou

$$v_{max} = \frac{\tau}{2\pi} a_{max} \quad (1.6)$$

où τ est la période. Cette méthode propose d'interpréter le rapport $2\pi v_{max} / a_{max}$ comme étant la période de vibration d'une onde harmonique équivalente [Newmark, 1973].

1.3.3. Classification d'un site

A partir d'une évaluation conjointe des données géologiques et géotechniques, Bouckovalas et al., (2002) ont proposé les valeurs suivantes, représentatives des conditions de site :

- Roche dur – roche tendre : $A_{NHVSR} < 3$,
 $0,07 \text{ s} < \tau_{NHVSR} < 0,26 \text{ s}$,
 $v_{max} / a_{max} < 58 \text{ cm/s/g}$.
- sol ferme – sol meuble : $A_{NHVSR} > 3$,
 $0,22 \text{ s} < \tau_{NHVSR} < 0,5 \text{ s}$,
 $v_{max} / a_{max} > 58 \text{ cm/s/g}$.

où τ_{NHVSR} est la période prédominante, définie comme étant la période pour laquelle l'amplification A_{NHVSR} est maximale du rapport spectral calculé avec la méthode NHVSR [Meslem et al., 2010].

1.4. Etude de cas sur le séisme de Boumerdès

Le nord de l'Algérie est l'une des régions les plus sismiquement actives dans le bassin

méditerranéen. Au cours des siècles passés, elle a connu plusieurs séismes majeurs (Alger en 1716, Oran en 1790, Jijel en 1856, El-Asnam en 1954 et 1980, Boumerdès en 2003, etc.) qui ont fait des milliers de victimes et causé d'importants dommages aux infrastructures.

Le 21 mai 2003, un séisme de magnitude 6,8 sur l'échelle de Richter et localisé au nord de Zemmouri (60 km à l'est d'Alger) a ravagé les régions environnantes. Ce séisme a été ressenti dans un rayon de 250 km de l'épicentre, et jusqu'aux côtes méditerranéenne espagnole et française.

Dans ce cas d'étude, onze sites sont choisis : Azazga, Tizi Ouzou, Keddara, Dar El-Beïda, Hussein Dey, Kouba, Blida, El-Afroun, Hammam Righa, Miliana et Ain Defla (**Fig. 1.2**). Ces sites ont été sélectionnés pour représenter une large gamme de contextes géologiques de la région étudiée.

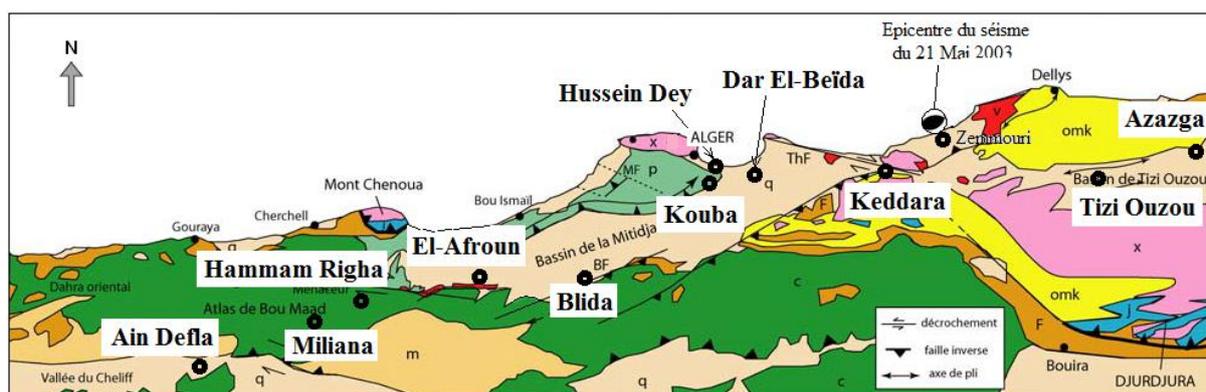


Fig. 1.2. Localisation des sites étudiés avec les enregistrements du séisme de Boumerdès du 21 mai 2003.

Les enregistrements sismiques peuvent nous permettre d'extraire plusieurs informations sur le mouvement des sols sous les stations d'enregistrements. Les accélérations enregistrées à la surface des stations implantées sur les sites sélectionnés plus haut durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 sont représentées dans la **figure 1.3**. Par ailleurs, les vitesses sont obtenues par intégration dans le domaine temporel et sont représentées dans la **figure 1.4**.

Les accélérations maximales des sols (a_{max}) et les vitesses maximales des sols (v_{max}) correspondants aux mouvements enregistrés dans les différents sites sont indiquées dans le **tableau 1.1**.

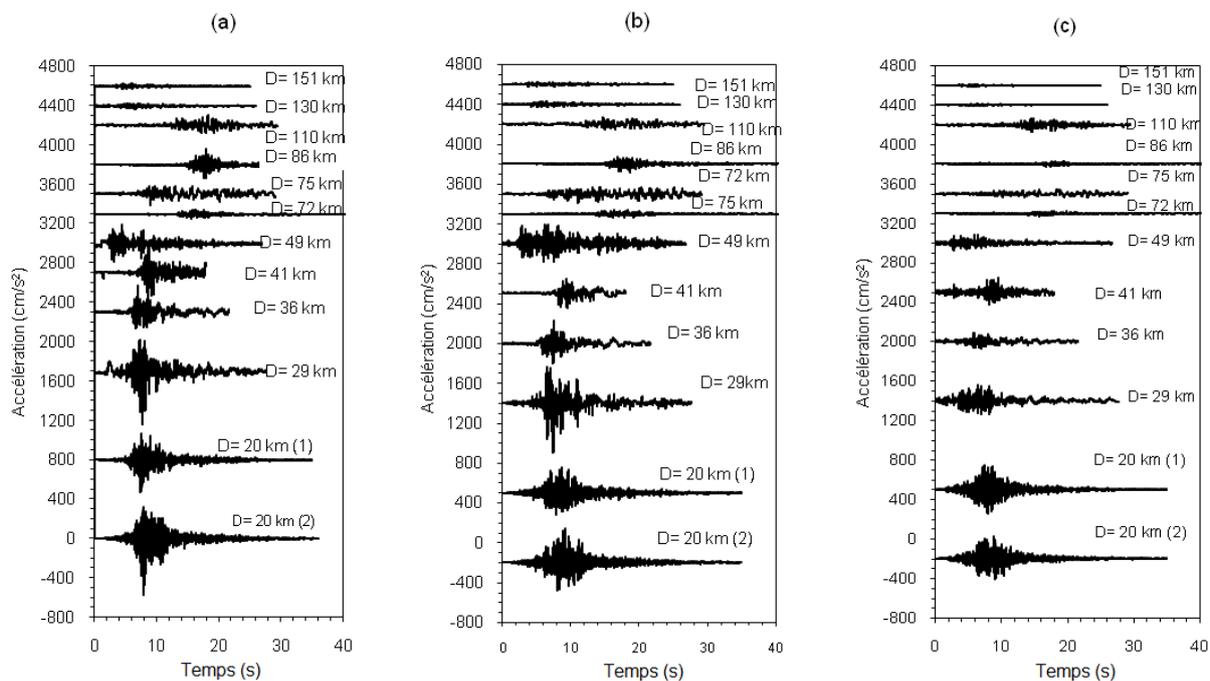


Fig. 1.3. Accélération enregistrées à la surface libre des sites sélectionnés durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 : (a) composantes E-O, (b) composantes N-S et (c) composantes V.

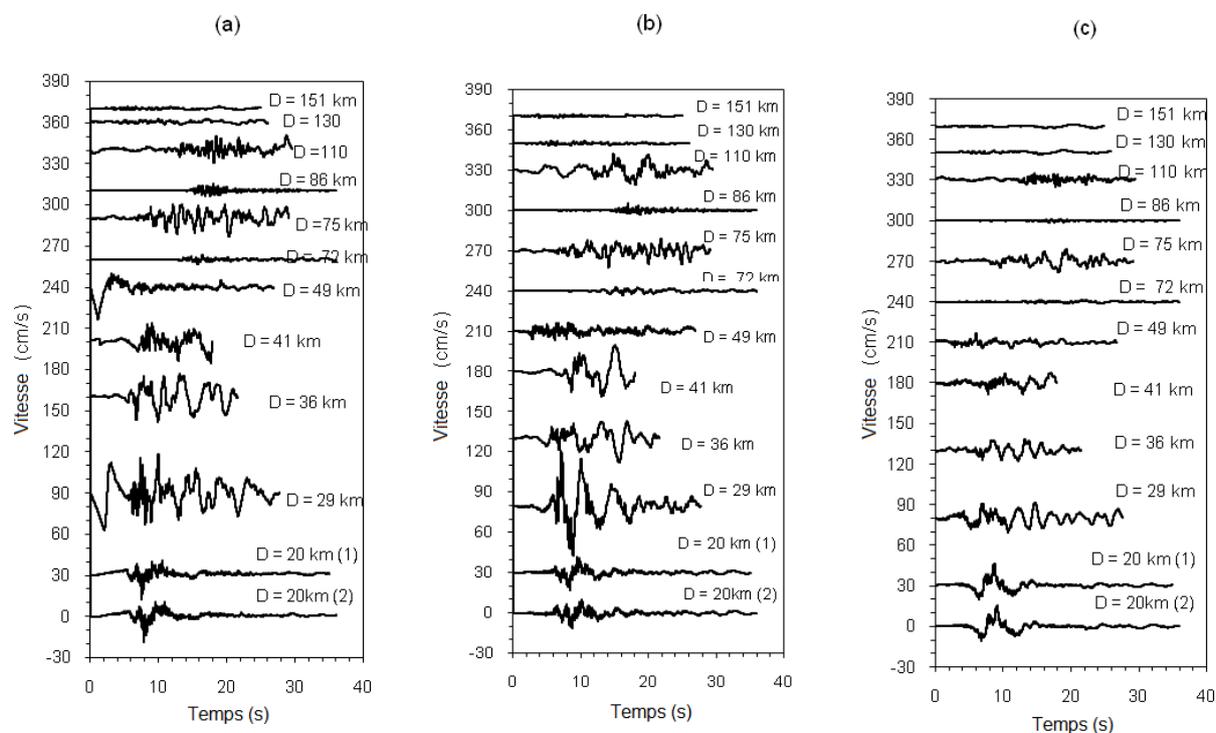


Fig. 1.4. Vitesses calculées à la surface libre des sites sélectionnés durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 : (a) composantes E-O, (b) composantes N-S et (c) composantes V.

Tab. 1.1. Accélération et vitesses maximales des sols, enregistrées durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 dans les stations considérées.

Station	Distance épacentrale (<i>km</i>)	Composante	a_{max} (<i>cm/s²</i>)	v_{max} (<i>cm/s</i>)
Keddara 1	20	E-O	331,55	17,95
		N-S	260,14	12,51
		V	246,40	15,79
Keddara 2	20	E-O	577,40	18,84
		N-S	344,74	11,32
		V	224,95	15,70
Dar El Beida	29	E-O	537,45	28,23
		N-S	501,00	40,78
		V	164,14	11,23
Hussein Day	36	E-O	269,50	18,56
		N-S	231,60	18,02
		V	85,94	8,12
Kouba	41	E-O	311,90	15,75
		N-S	148,30	20,30
		V	151,00	8,33
Tizi Ouzou	49	E-O	195,20	10,00
		N-S	192,00	6,53
		V	87,00	6,82
Blida	72	E-O	46,35	3,35
		N-S	38,62	3,38
		V	28,53	1,45
Azazga	75	E-O	120,00	14,00
		N-S	86,00	12,25
		V	46,30	8,74
El Affroun	86	E-O	164,00	5,06
		N-S	90,93	5,40
		V	30,70	1,24
Hammam Righa	110	E-O	105,00	10,40
		N-S	73,50	12,51
		V	67,23	5,48
Miliana	130	E-O	31,24	1,72
		N-S	25,70	2,28
		V	16,50	1,94
Ain Défla	151	E-O	33,00	1,57
		N-S	25,00	1,36
		V	10,00	1,22

1.4.1. Description des sites

Onze sites sont étudiés dans ce cas (**Fig. 1.2**). Ces sites sont répartis entre les bassins de la Mitidja, du Chélif, de Tizi Ouzou, et les monts du Dahra et de l'Atlas Blidéen. La structure géologique du nord de l'Algérie a été, largement, discutée dans la littérature [[Meghraoui, 1988](#) ; [Maouche et al., 2008](#)].

Les sites de Dar El-Beida, Blida et El-Affroun se situent dans le bassin de la Mitidja. Ce bassin repose essentiellement sur des dépôts alluvionnaires.

Le site de Keddara se situe à l'Est de la chaîne de l'Atlas Blidéen. A l'Ouest, les sites de Hammam Righa et de Miliana se situent sur les monts du Dahra. Ces deux massifs rocheux font partie de l'Atlas tellien.

En centre, le site d'Hussein Dey se situe sur la plaine côtière de la baie d'Alger. Elle est constituée, essentiellement, de dunes de sable comprenant des dépôts alluvionnaires et marins. Pas loin, le site de Kouba se situe sur l'un des derniers mamelons de la chaîne du Sahel algérois. Ce dernier est une petite chaîne de collines constituées, essentiellement, par des alluvions argileuses et de graviers.

Plus à l'Ouest, le site d'Ain Défla se situe dans le bassin du haut Chélif. La zone d'étude est constituée, essentiellement, par des alluvions très argileux représentant les terrasses de l'oued Chlef.

Enfin, plus à l'Est, les sites de Tizi Ouzou et d'Azazga se situent dans le bassin de Tizi Ouzou reposant sur des dépôts alluvionnaires et un substratum marneux.

1.4.2. Caractérisation des sites

La méthode NHVSR est appliquée aux accélérogrammes enregistrés durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 [[Khellafi et al., 2013](#)]. Les courbes obtenues sont représentées sur les **figures 1.5-1.8**.

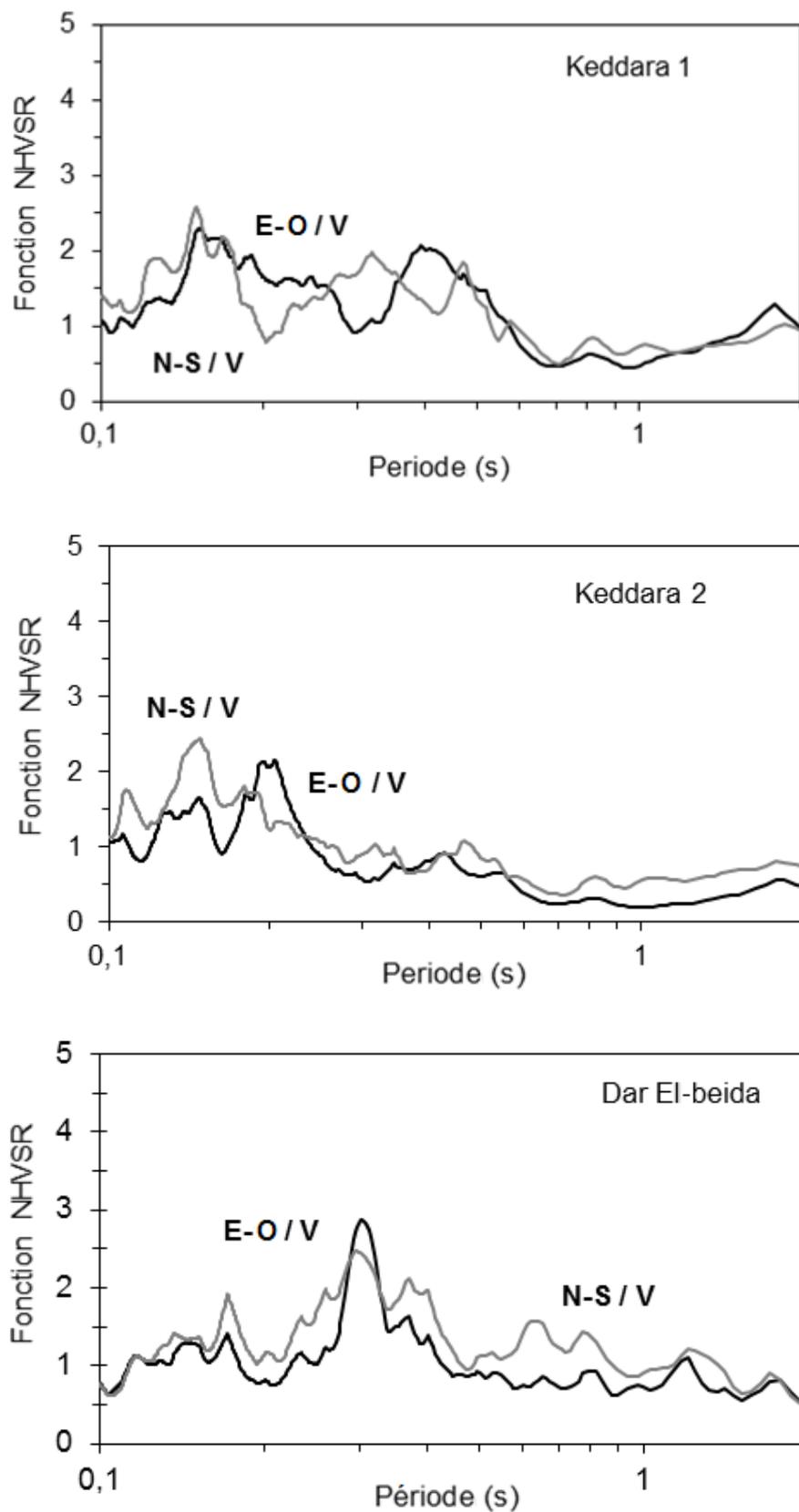


Fig 1.5. Fonctions NHVSR des accélérogrammes enregistrés durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 dans les stations de Keddara 1, Keddara 2 et Dar El-Beida, respectivement.

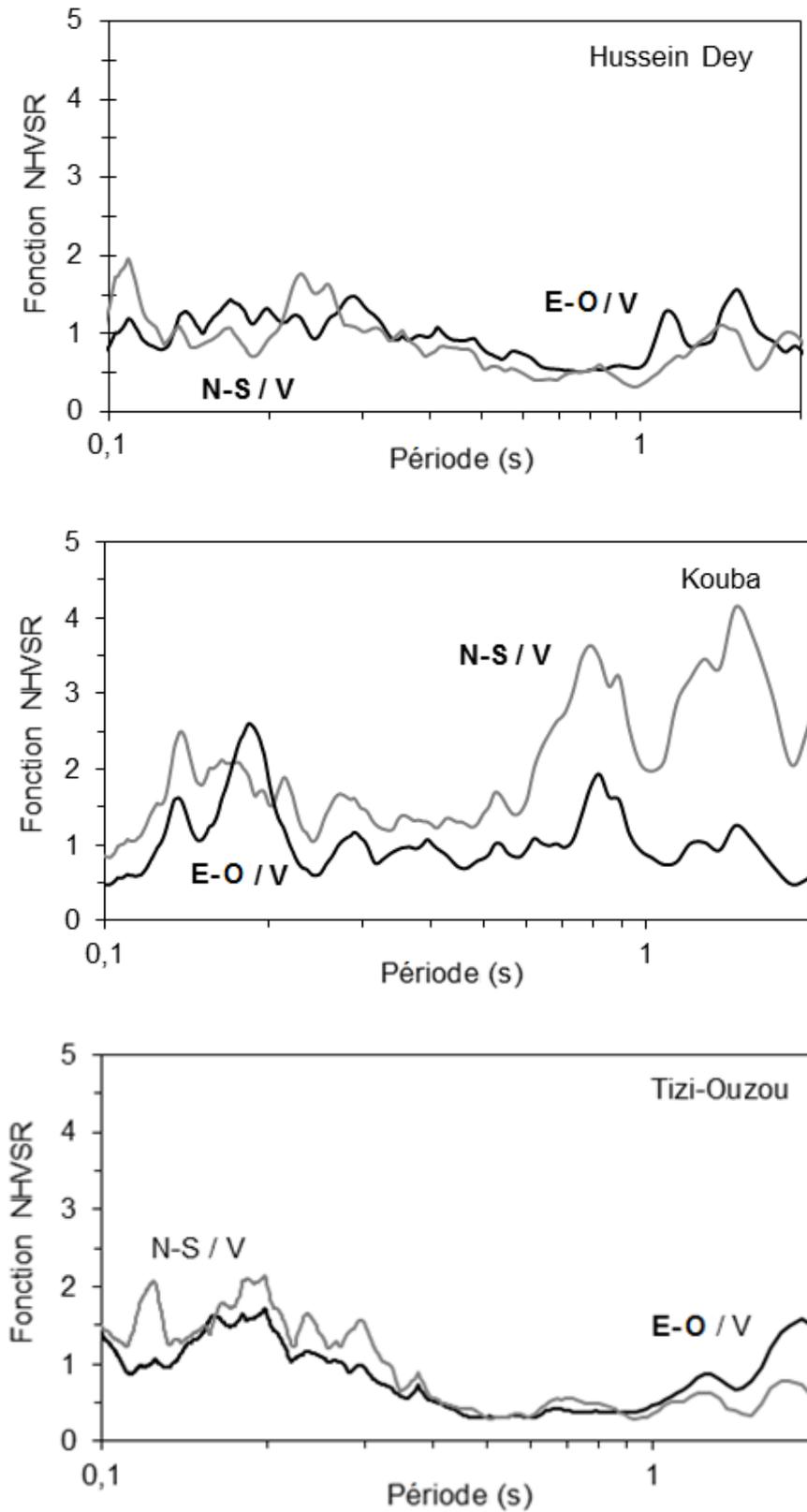


Fig 1.6. Fonctions NHVSR des accélérogrammes enregistrés durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 dans les stations d'Hussein Dey, Kouba et Tizi Ouzou, respectivement.

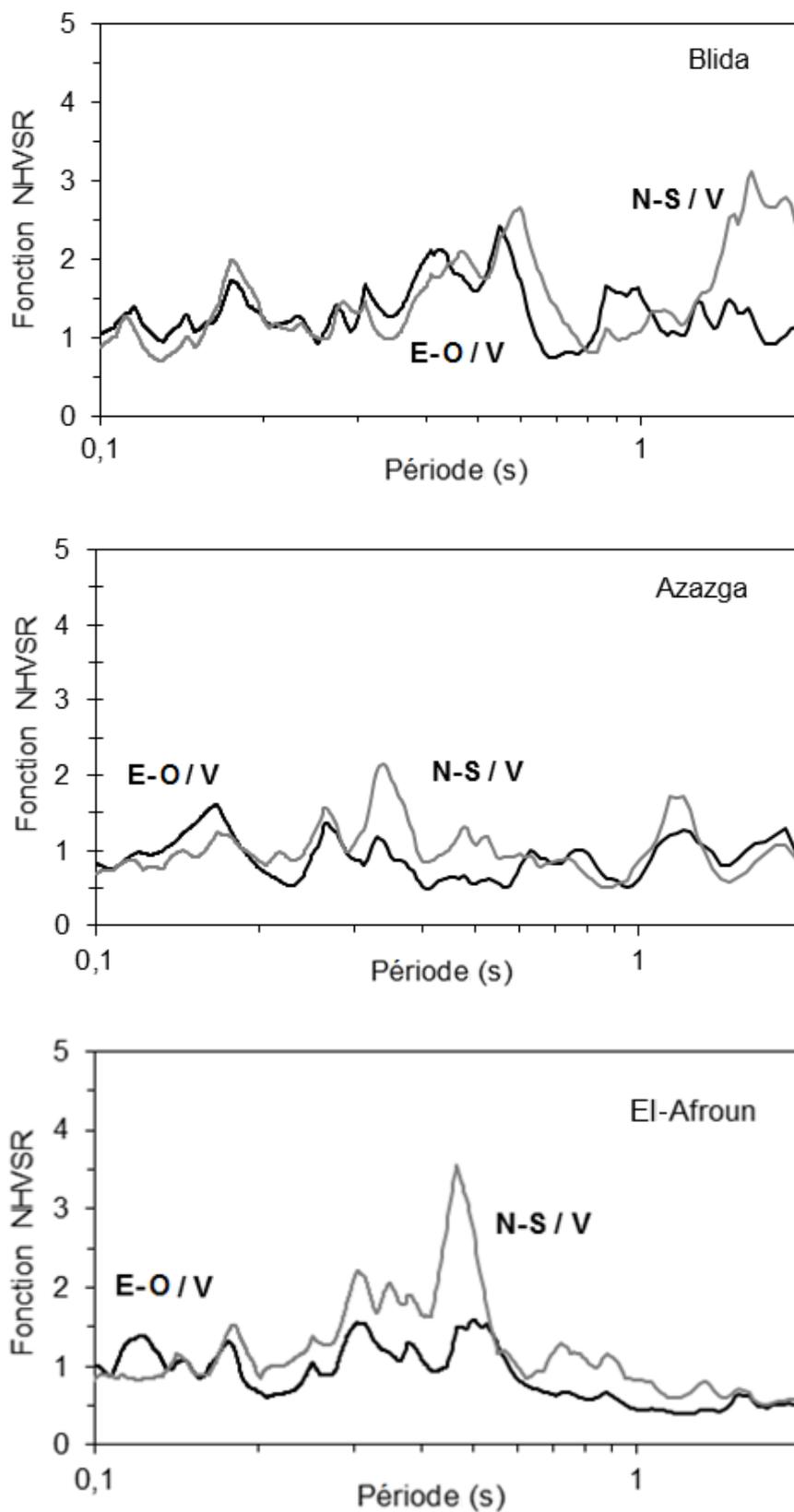


Fig 1.7. Fonctions NHVSR des accélérogrammes enregistrés durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 dans les stations de Blida, Azazga et Al-Afroun, respectivement.

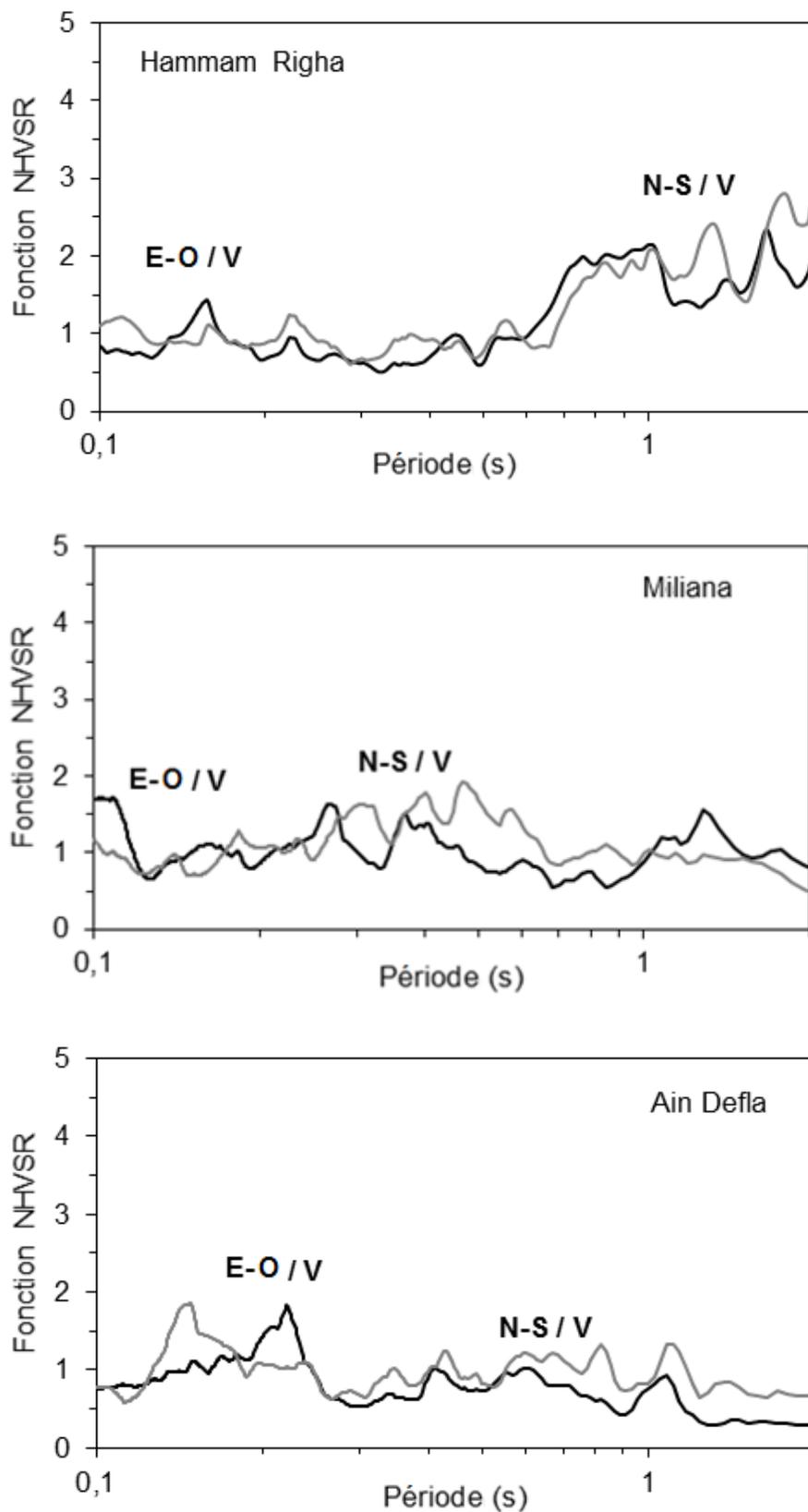


Fig 1.8. Fonctions NHVSR des accélérogrammes enregistrés durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 dans les stations de Hammam Righa, Miliana et Ain Defla, respectivement.

Dans les figures précédentes, on remarque que seules les courbes obtenues dans les stations de Keddara 2, Dar El-Beida, El-Affroun et Ain Défla montrent des pics imposants. Cependant, les courbes obtenues dans les stations de Keddara 1, Hussein Dey, Tizi Ouzou, Blida, Azazga, Kouba, Hammam Righa et Miliana sont presque similaires dans les deux directions N-S et E-O avec des pics répétés et insignifiants, ce qui rend le choix de la période prédominante plus difficile.

Comme mentionné plus haut, les paramètres nécessaires à la caractérisation, obtenus par l'application de la méthode décrite dans le [paragraphe 1.3.3](#), sont :

- les périodes prédominantes (τ_{NHVSR}) et leurs amplitudes correspondantes (A_{NHVSR}) : sont obtenues par lecture directe sur les [figures 1.5-8](#),
- les valeurs du rapport v_{max}/a_{max} sont calculées à partir des valeurs présentées dans le [tableau 1.1](#).

Les résultats ainsi que les classifications correspondantes sont présentés dans le [tableau 1.2](#).

Tab. 1.2. Paramètres de caractérisation des différents sites extraits des enregistrements réalisés sur place durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003.

Station	Composante E-O			Composante N-S			Classification du site
	τ_{NHVSR} (s)	A_{NHVSR}	v_{max}/a_{max} (cm/s/g)	τ_{NHVSR} (s)	A_{NHVSR}	v_{max}/a_{max} (cm/s/g)	
Keddara 1	0,155	2,225	54,14	0,153	2,448	48,089	Roche
Keddara 2	0,207	2,1	32,629	0,15	2,561	32,836	Roche tendre
Dar El-Beida	0,31	2,91	52,526	0,308	2,77	81,397	-
Hussein Dey	0,297	1,415	68,868	0,234	1,711	77,807	-
Kouba	0,17	2,52	50,497	0,141	2,365	136,885	-
Tizi Ouzou	0,2	1,643	51,23	0,199	2,107	34,01	-
Blida	0,181	1,624	72,276	0,177	1,941	87,519	-
Azazga	0,173	1,62	116,667	0,33	2,46	142,442	-
El-Afroun	0,512	1,517	30,854	0,468	3,483	59,386	-
Hammam Righa	0,158	1,388	99,048	0,16	1,075	170,204	-
Miliana	0,185	0,94	55,058	0,188	1,758	88,716	-
Ain Defla	0,224	1,753	47,576	0,15	1,8	54,4	Roche

D'autre part, les descriptions géologiques des mêmes sites, déterminées à partir de cartes géologiques de la région étudiée présentées dans les travaux de [Maouche et al., \(2008\)](#) et [Ayadi et al., \(2003\)](#), sont comme suit :

- Roche : Keddara 1, Hammam Righa, Miliana, Ain Defla
- Roche tendre : Keddara 2
- Sol ferme : Hussein Dey, Kouba, Tizi Ouzou, Blida, Azazga
- Sol meuble : Dar El-Beida, El-Afroun

La comparaison montre que les deux descriptions sont identiques dans trois sites seulement (Keddara 1, Keddara 2 et Ain Defla). Ceci est dû au fait que les valeurs limites fixées sont souvent dépassées.

On conclut que la méthode de caractérisation proposée par [Bouckovalas et al., \(2002\)](#), établie à partir de données géologiques et géotechniques de sites localisés en Grèce, n'est pas tout à fait applicable au cas du Nord de l'Algérie et une étude plus approfondie est nécessaire pour mieux cerner le problème.

1.5. Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les différentes méthodes employées pour la caractérisation expérimentale de sites. Ces méthodes sont, principalement, basées sur l'utilisation de cartes, l'exploration et l'investigation sur site et l'interprétation des données fournies par les sondages et les essais in-situ et au laboratoire.

Ensuite, nous avons présenté brièvement quelques méthodes récentes proposées par différents auteurs pour caractériser un site à partir d'enregistrements sismiques seulement. Ces méthodes récentes sont encore à un stade d'essai. Elles permettent de déterminer certains paramètres (vitesse des ondes S et la période prédominante) ou classer un site afin de permettre la prise des bonnes décisions lors de la construction d'un ouvrage.

Puis, la méthode de caractérisation proposée par [Bouckovalas et al., \(2002\)](#) a été exposé en détail pour être utilisée, ultérieurement, pour caractériser plusieurs sites du Nord de l'Algérie à partir d'enregistrements accélérométriques en surface. Ainsi, la méthode NHVSR a été

appliquée aux accélérogrammes enregistrés durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 par diverses stations implantées dans plusieurs sites. Ces derniers ont été sélectionnés pour représenter une large gamme de contextes géologiques de la région étudiée.

Les résultats ont montré que les courbes obtenues avec la méthode NHVSR ne montrent pas toujours des pics imposants mais sont parfois répétés et insignifiants, ce qui rend la détermination des périodes prédominantes et leurs amplitudes correspondantes difficiles.

Les descriptions géologiques des sites étudiés selon les cartes géologiques établies par [Maouche et al., \(2008\)](#) et [Ayadi et al., \(2003\)](#) montrent que les valeurs limites fixées par [Bouckovalas et al., \(2002\)](#) (voir [paragraphe 1.3.3](#)) ne sont pas adaptées au cas présent car elles sont souvent dépassées. En effet, cette méthode de caractérisation a été établie sur la base des données géologiques de sites localisés en Grèce, et nécessite donc des modifications pour être adaptée à la région du Nord de l'Algérie. Par conséquent, une étude plus approfondie est nécessaire pour corriger les limites et adapter la méthode au Nord de l'Algérie.

Par conséquent, cette méthode de caractérisation permet de déterminer uniquement une description géologique du site, mais sans plus de détails sur le profil de sol ou sur ses caractéristiques géotechniques.

Durant ces dernières décennies, plusieurs chercheurs [[Kurita et al., 1998](#) ; [Carvajal et al., 2001](#) ; [Ghayamghamian et al., 2001](#) ; [Mikami et al., 2003](#) ; [Garcia et al., 2004](#) ; [Harichane et al., 2005](#)] ont développé des approches permettant de déterminer les propriétés de sols en utilisant l'identification de systèmes et les enregistrements accélérométriques.

C'est dans ce contexte que nous allons aborder le chapitre suivant relatif aux problèmes d'identification de système et les méthodes d'optimisation numérique.

Chapitre 2

Problèmes d'optimisation pour l'identification inverse

2.1. Introduction

La reconnaissance et l'identification des paramètres influençant le mouvement sismique s'effectuent, par des essais in-situ et/ou au laboratoire. Les essais *downhole* peuvent donner l'information unique sur le comportement du sol réel pour un grand nombre de conditions de charges qui ne sont pas, facilement, traitées par les procédures d'expérimentation in-situ ou au laboratoire [Zeghal et al., 1995].

Cependant, ces essais sont généralement très coûteux et nécessitent du matériel lourd et du personnel très qualifié. D'autre part, il a été largement reconnu qu'il y a des désaccords significatifs entre les résultats de laboratoire et les observations in-situ, notamment pour les atténuations ou amortissements, qui sont des paramètres importants de la réponse de site [Dimitriu P. et al., 2001].

A cet effet, plusieurs approches ont été proposées pour identifier ces caractéristiques permettant ainsi de réduire le coût de l'opération et d'optimiser les divergences observées entre les différents résultats [Zeghal et al., 1995 ; Baise et al., 2000 ; Harichane et al., 2005].

Ainsi, l'objectif visé dans cette thèse, consiste à fournir une autre approche pour identifier les propriétés de profils de sol à partir d'enregistrements accélérométriques. Cette approche

utilise l'identification de systèmes et les enregistrements en champ libre. L'identification de ces paramètres peut se faire en résolvant un problème d'optimisation.

La procédure d'identification des systèmes mécaniques est souvent très compliquée. Elle regroupe à la fois l'identification des systèmes linéaires et celui des systèmes non-linéaires. L'identification des systèmes linéaires est connue et maîtrisée depuis fort longtemps, cela à travers divers algorithmes dédiés à ce sujet. Cependant, ces méthodes présentent des inconvénients majeurs, et s'avèrent non-applicables aux problèmes réels à cause de la non-linéarité de ces derniers. Pour surmonter ce problème, de nombreuses méthodes robustes d'identification des systèmes non-linéaires sont proposées dans la littérature et fournissent de bons résultats [Nelles, 2001].

Dans ce chapitre, nous nous proposons de faire une étude bibliographique des diverses méthodes numériques applicables à l'identification de paramètres par analyse inverse. Nous proposons tout d'abord d'introduire les notions de base d'une analyse inverse, puis nous présentons un ensemble de définitions liées aux problèmes d'optimisation. Ensuite, nous exposons les concepts de base de l'optimisation mono-objectif ainsi que les différentes méthodes de résolution les plus utilisées en essayant d'apporter un regard critique sur chacune d'elles. Après, nous exposons les définitions de base de l'optimisation multi-objectif et la classification des méthodes de résolution les plus utilisées en faisant le point sur quelques unes d'entre elles. Enfin, nous proposons une procédure d'optimisation qui nous paraît la mieux adaptée et sera retenue pour développer un programme numérique pour le reste de ce travail.

2.2. Analyse inverse

Le but de l'analyse inverse est de déterminer des paramètres difficilement observables à partir de données facilement mesurables. Les méthodes inverses peuvent être divisées en deux grandes classes :

- l'estimation d'une fonction,
- ou l'identification de paramètres.

L'identification de système ou l'identification paramétrique est une procédure consistant à

obtenir un modèle mathématique d'un système à partir de mesures entrées/sorties. Elle consiste à construire un modèle mathématique qui produirait une sortie approximative lorsqu'il est soumis à la même entrée que celle du système à identifier et ceci dans le but d'optimiser un certain critère de performance basé sur l'erreur entre la sortie du système à identifier et la sortie du modèle d'identification [Landau, 1998].

Deux types d'approches existent pour résoudre un problème inverse [Levasseur, 2007] :

- **Analyse inverse par méthode analytique inverse** : c'est lorsque les données du problème sont connues avec précision. Dans ce cas, le problème peut être résolu, analytiquement, par des théories de mathématiques appliquées. Ainsi, les paramètres inconnus sont identifiés en inversant les équations du modèle constitutif. Cette méthode est bien adaptée lorsque le système mécanique est peu complexe, le nombre de paramètres est faible et les sollicitations extérieures sur le système sont simples.
- **Analyse inverse par méthode numérique directe** : c'est lorsque les données du problème sont incomplètes et incertaines. Dans ce cas, trouver une solution analytique devient difficile car la solution est sensible aux données et aux erreurs sur ces données. Ainsi, la résolution du problème consiste à ajuster un modèle numérique sur des données expérimentales observées. La qualité de l'ajustement est estimée par une fonction d'erreur, qui indique l'écart entre les résultats du modèle numérique et les observations expérimentales. Les paramètres sont obtenus en minimisant la fonction d'erreur par une méthode numérique.

En général, la deuxième approche est le cas le plus fréquent dans la pratique, et l'identification est souvent exprimée sous la forme d'un problème d'optimisation. C'est l'objet du paragraphe suivant.

2.3. Description d'un problème d'optimisation

L'optimisation est une discipline mathématique ayant pour but la recherche de solutions optimales (maximum ou minimum) d'une ou plusieurs fonctions, appelées fonctions de *coût*,

critère ou *objectif*, auxquelles peuvent s'ajouter un certain nombre de contraintes d'égalité ou d'inégalité. Cet ensemble de fonctions est appelé problème d'optimisation [Landau, 1998]. Dans cette thèse, nous nous intéressons, essentiellement, au cas de minimisation.

On peut distinguer plusieurs types d'optimisation, suivant le nombre de fonctions entrant en jeu : l'optimisation mono-objectif, lorsque l'on a un seul objectif, et l'optimisation multi-objectif, lorsque l'on en a plusieurs.

La méthode d'optimisation de base est la méthode essai/erreur : il s'agit de tester un certain nombre de solutions potentielles jusqu'à l'obtention d'une solution adéquate [Popper, 1994]. Les algorithmes informatiques constituent un puissant outil pour l'automatisation de ce processus.

En général, un problème d'optimisation est défini par :

- **Un espace de recherche** : il est défini par l'ensemble des domaines de définition envisageable à chacune des variables du problème d'optimisation. En effet, cet espace est fini ou dénombrable car les méthodes d'optimisation nécessitent un espace restreint pour bien fonctionner.
- **Un ou plusieurs paramètres** : appelés aussi *variables de décision*, ils peuvent être de natures diverses (réelle ou entière, déterministe ou aléatoire, etc.). Ils peuvent exprimer des données qualitatives ou quantitatives.
- **Les contraintes** : elles définissent des restrictions imposées par les caractéristiques particulières de l'environnement (souvent des limitations physiques). Ces restrictions doivent être respectées afin d'envisager une certaine solution acceptable. Ces contraintes décrivent les dépendances entre les variables de décision et les contraintes impliquées dans le problème.

Dans certains cas, aucune contrainte n'est exigée, alors on parle de *problème sans contraintes*.

- **Une méthode d'optimisation** : elle recherche une solution ou un ensemble de solutions à l'intérieur de l'espace de recherche qui satisfait au mieux à la fonction objectif et contraintes associées. Le résultat est appelé valeur optimale ou solution optimale.

Le choix de la méthode de résolution à mettre en œuvre dépend souvent de la nature de la fonction à optimiser. Elle peut être une fonction linéaire et on parle de *problème linéaire* ou une fonction non-linéaire et on parle alors de *problème non-linéaire*.

- **Un critère d'arrêt** : il est défini selon le problème posé et les exigences de l'utilisateur, il permet de mettre fin au processus de calcul. Il peut être basé sur l'erreur absolue tolérée ¹ ou l'erreur relative tolérée ² ou un nombre maximum d'itérations.
- **Une ou plusieurs fonctions objectif** : elles représentent le but à atteindre pour un problème et permettent de déterminer l'ensemble des solutions potentielles au problème.

Lorsqu'un seul objectif est donné, le problème d'optimisation est dit *mono-objectif*. Dans ce cas la solution optimale est clairement définie, c'est celle qui a le coût optimal. Cependant, la plupart des problèmes réels dans la pratique sont, naturellement, *multi-objectif* et ont généralement deux ou plusieurs fonctions objectif qui doivent être satisfaites au même moment, et peuvent-être en conflit les unes aux autres.

Dans le paragraphe suivant, nous discuterons, avec plus de détails, le cas d'optimisation mono-objectif. L'autre cas sera discuté plus loin (voir [paragraphe 2.5](#)).

2.4. Problème mono-objectif

Dans ce cas la solution recherchée est celle qui minimise la fonction objectif définie par rapport à certains paramètres. Ces paramètres constituent les inconnues du problème à résoudre et correspondent aux composantes du vecteur \mathbf{x} :

$$\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_{n_p}\} \quad (2.1)$$

L'espace de recherche \mathfrak{R} est défini par les bornes inférieures x_j^{\min} et supérieures x_j^{\max} de chaque paramètre x_j . La fonction objectif $f(\mathbf{x})$ est définie dans cette espace.

¹ Dans ce cas, on écrit : $|x_{k+1} - x_k| < \varepsilon_a$, où k désigne le numéro de l'itération, x désigne le paramètre étudié et ε_a désigne l'erreur absolue tolérée.

² Dans ce cas, on écrit : $|(x_{k+1} - x_k)/x_{k+1}| < \varepsilon_r$, où ε_r désigne l'erreur relative tolérée.

Dans certains cas, le problème peut être restreint à des contraintes décrites par n_c équations (d'égalités ou d'inégalités) supplémentaires notées :

$$c_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n_c \quad (2.2)$$

où $c_j(\mathbf{x})$ est la $j^{\text{ème}}$ contrainte. Ces restrictions doivent être satisfaites afin de considérer la solution comme acceptable ou admissible.

Ainsi, dans le cas général, un problème mono-objectif peut se formuler comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser } f(\mathbf{x}) \\ \mathbf{x} \in \mathfrak{R} \\ c_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n_c \end{array} \right. \quad (2.3)$$

La résolution du problème que nous venons de formuler consiste à trouver le vecteur \mathbf{x} qui optimise la fonction objectif f et satisfait aux contraintes c_j du problème. La solution retrouvée \mathbf{x}^* est soit :

- **un minimum global** : de la fonction f si : $f(\mathbf{x}^*) < f(\mathbf{x})$, $\forall \mathbf{x} \in \mathfrak{R}$ et $\mathbf{x} \neq \mathbf{x}^*$,
- **un minimum local** : de la fonction f si : $f(\mathbf{x}^*) < f(\mathbf{x})$, $\forall \mathbf{x} \in V(\mathbf{x})$ et $\mathbf{x} \neq \mathbf{x}^*$ où $V(\mathbf{x})$ définit un voisinage de \mathbf{x}^* .

Actuellement, il n'existe aucune solution analytique permettant de déterminer le minimum global au problème d'optimisation décrit ci-dessus. Cependant, diverses méthodes numériques [Bonnans et al., 2006 ; Russel et al., 1995] basées sur le modèle discret ont été proposées pour le déterminer.

On rappelle que, dans cette thèse, nous nous focalisons au cas de minimisation. Toutefois, les problèmes de maximisation et de minimisation sont strictement équivalents. Le principe de la dualité [Deb, 2001] énonce qu'un problème de minimisation peut être converti en un problème de maximisation et le passage de l'un à l'autre peut s'effectuer à l'aide de la relation suivante :

$$\max f(\mathbf{x}) = - \min f(\mathbf{x}) \quad (2.4)$$

Dans le paragraphe suivant, nous discuterons brièvement les méthodes de résolution numériques.

2.5. Méthodes d'optimisation mono-objectif

Ces méthodes sont regroupées en trois grandes familles :

- les méthodes déterministes,
- les méthodes stochastiques,
- les méthodes énumératives.

Le choix de la méthode d'optimisation à employer, dans un problème, est influencé par divers critères dont la nature des variables de décision, la nature de la fonction objectif, la présence ou non de contraintes, etc.

2.5.1. Méthodes déterministes

Plusieurs méthodes d'optimisation déterministes sont proposées dans la littérature. Elles se caractérisent par une exploration méthodique de l'espace de recherche. Ci-après, nous allons présenter brièvement les méthodes les plus utilisées dans la littérature, soit : la méthode du simplexe, celle du gradient conjugué, celle de Newton et celle de Levenberg-Marquardt.

2.5.1.1. Méthode du simplexe

Introduite par Dantzig en 1947 [Dantzig, 1990], cette méthode permet de résoudre un problème d'optimisation linéaire en s'appuyant sur un processus itératif qui permet d'améliorer la résolution de la fonction objectif à chaque étape. Son processus fonctionne comme suivant :

- Si n' est le nombre de variables de départ et n'' le nombre d'équations (on a n'' variables d'écart et donc au total $n' + n''$ inconnues), à chaque itération n' variables sont rendues nulles. Il reste donc un système carré de n'' équations à n'' inconnues dont

les solutions sont fournies en s'inspirant de la méthode de résolution du pivot.

- Les n' variables rendues nulles sont dites *hors base*, les n'' variables dont les valeurs sont obtenues par résolution du système carré sont dites *dans la base*. Le processus itératif est tel que toutes les solutions successives obtenues sont acceptables pour l'ensemble des contraintes. A chaque itération, la méthode consiste à faire entrer dans la base une variable hors base à la place d'une variable de la base à condition que cette substitution augmente la valeur de la fonction objectif.
- Le processus se termine lorsque aucune substitution ne permet plus d'augmenter la fonction objectif.

Au cours des années, cette méthode a été améliorée par divers chercheurs pour être applicable aux problèmes d'optimisations non-linéaires [Nelder et al., 1965 ; Pham et al., 2011].

Néanmoins, cette méthode est dépendante du bon choix de la solution de départ et ses performances tendent à se dégrader lorsque le nombre de paramètres optimisés augmente [Berro, 2001].

2.5.1.2. Méthode du gradient conjugué

Cette méthode [Hestenes et al., 1952] permet de résoudre les problèmes d'optimisation non linéaires. C'est une méthode itérative qui converge en un nombre fini d'itérations vers la solution optimale (généralement un optimum local proche).

Grosso modo, la méthode du gradient conjugué fait partie des méthodes de descente, qui ont comme principe commun la recherche de l'optimum suivant le procédé itératif :

$$\mathbf{x}^{(0)} \text{ donnée, } \mathbf{x}^{(j+1)} = \mathbf{x}^{(j)} + \mathbf{P}^{(j)} \mathbf{D}^{(j)} \quad (2.5)$$

où $\mathbf{x}^{(0)}$ est la solution initiale, $\mathbf{P}^{(j)}$ est le pas de descente et $\mathbf{D}^{(j)}$ la direction de descente, évalués en fonction du gradient de la fonction objectif.

Son grand intérêt pratique du point de vue du temps de calcul vient du fait qu'une initialisation astucieuse permet d'aboutir en seulement quelques passages à une estimation

très proche de la solution finale.

Le succès de cette méthode a incité de nombreux auteurs à proposer des méthodes plus générales et plus efficaces comme la méthode BiCGStab (Bi-Conjugate Gradient Stabilized), la méthode CGS (Conjugate Gradient Squared), la méthode GMRES (Generalized Minimum Residual method), etc.

Cependant, malgré que cette méthode soit facile à mettre en œuvre numériquement, elle rencontre une difficulté pour converger vers l'optimum local, car elle est très dépendante du bon choix de la solution de départ et du pas de descente, et peut soit diverger, soit converger vers d'autres optimums (cas des problèmes à plusieurs optimums locaux) [Berro, 2001].

2.5.1.3. Méthode de Newton

Elle est utilisée pour résoudre les problèmes d'optimisation non-linéaires suivant le procédé itératif en fonction du gradient et la matrice hessienne de la fonction objectif, de la forme [Bonnans et al., 2006] :

$$\mathbf{x}^{(0)} \text{ donnée, } \mathbf{x}^{(j+1)} = \mathbf{x}^{(j)} - \mathbf{H}^{(j)^{-1}} \cdot \nabla f^{(j)} \quad (2.6)$$

où $\mathbf{H}^{(j)}$ est la matrice hessienne et $\nabla f^{(j)}$ le gradient de la fonction objectif.

En effet, cette méthode consiste à approximer la fonction objectif par son développement de Taylor à l'ordre 2 autour du point courant et à choisir le nouveau point comme un minimiseur de ce développement de Taylor.

Cependant, cette méthode est pénalisante pour les grands systèmes du fait de la nécessité de calculer à chaque itération j le gradient et la hessienne, les stocker, et de résoudre le système en question.

Comme pour les méthodes précédentes, cette méthode a connu aussi des améliorations pour développer sa convergence ou pour palier à ses inconvénients telle que la méthode de Quasi-Newton) [Chun, 2005 ; Allaire, 2005].

Ce qui fait l'intérêt de cette méthode est la rapidité de convergence par rapport aux méthodes précédentes. Cependant, son inconvénient majeur est sa sensibilité au choix de la solution de

départ, et peut soit diverger, soit converger vers d'autres optimums [Berro, 2001].

2.5.1.4. Méthode de Levenberg-Marquardt

Cette méthode, développée par Levenberg puis Marquardt [Levenberg, 1944 ; Marquardt, 1963], permet d'obtenir une solution numérique aux problèmes d'optimisation non-linéaires. Elle combine le principe de la méthode de Gauss-Newton quant au processus de convergence rapide et la méthode du gradient.

Cette méthode est développée suivant un processus itératif de la forme :

$$\mathbf{x}^{(0)} \text{ donnée, } \mathbf{x}^{(j+1)} = \mathbf{x}^{(j)} - [\mathbf{H}^{(j)} + \lambda^{(j)}\mathbf{I}]^{-1} \cdot \nabla f^{(j)} \quad (2.7)$$

où \mathbf{I} est la matrice identité et $\lambda^{(j)}$ est un coefficient d'atténuation strictement positif permettant de contrôler la direction de recherche de l'optimum.

A chaque itération, la solution actuelle est remplacée par une nouvelle estimation calculée en fonction du gradient et de la matrice hessienne de la fonction objectif, et le coefficient d'atténuation. Ce dernier, après chaque itération, est réduit si la convergence vers la solution optimale progresse et est augmenté dans le cas contraire.

Subséquentement, la méthode est adaptative et contrôle automatiquement l'atténuation. De ce fait, elle est capable d'alterner entre la méthode du gradient et la méthode de Gauss-Newton afin de profiter de leurs avantages respectifs. Ainsi, lorsque la solution est loin de l'optimum local, on privilégie la méthode du gradient qui offre une convergence lente mais assurée. Au contraire, quand on s'approche de la solution, c'est la méthode de Gauss-Newton qui est utilisée pour permettre une convergence plus efficace.

Ce qui fait l'intérêt de cette méthode est sa stabilité par rapport aux méthodes précédentes. Cette méthode trouve une solution même si le point initial est loin du minimum, et s'adapte d'elle-même à la forme de la fonction objectif. Cependant, pour certaines fonctions très régulières, elle peut converger, légèrement moins vite, vers l'optimum local ou converger vers d'autres optimums.

2.5.2. Méthodes stochastiques

Plusieurs méthodes d'optimisation stochastiques sont proposées dans la littérature. Elles s'appuient sur des mécanismes de transition probabilistes et aléatoires. Elles sont caractérisées par [Levasseur, 2007] :

- un processus de création aléatoire ou pseudo-aléatoire (création aléatoire conditionnée) des points dans l'espace de recherche,
- une heuristique³ qui permet de guider la convergence de l'algorithme.

Les méthodes stochastiques sont utilisées lorsqu'on espère trouver une solution approchée de l'optimum global dans des problèmes à plusieurs optimums locaux. En effet, ces méthodes évitent de rester piégées dans un optimum local. Souvent, ces techniques trouvent des solutions utiles quand les techniques locales ne le permettent pas.

Ci-après, nous allons présenter brièvement les méthodes les plus utilisées dans la pratique, soit : la méthode du recuit simulé, Monte-Carlo, Tabou et les algorithmes génétiques.

2.5.2.1. Méthode du recuit simulé

Elle est basée sur une analogie avec le processus physique de recuit des matériaux cristallins. Ce dernier consiste à amener un solide à basse température après l'avoir élevé à forte température [Russel et al., 1995].

Lorsque le solide est à une forte température, chaque particule possède une très grande énergie et peut effectuer de grands déplacements aléatoires dans la matière. Au fur et à mesure que la température est abaissée, chaque particule perd de l'énergie et sa capacité de déplacement se réduit. Les différents états transitoires de refroidissement permettent d'obtenir des matériaux très homogènes et de bonne qualité.

La recherche d'un minimum est réalisée suivant le processus itératif suivant [Bogaert, 2005] :

³ Une heuristique est une méthode de calcul qui fournit rapidement une solution réalisable (pas nécessairement optimale) pour un problème d'optimisation.

- on part de valeurs initiales pour les variables, choisies arbitrairement parmi un ensemble de valeurs possibles,
- chaque itération consiste à modifier quelque peu les valeurs des variables. Si ce choix aboutit à une valeur de la fonction objectif qui est plus faible, il est accepté. Sinon, il est accepté avec une probabilité donnée, qui dépend de l'augmentation de la valeur de la fonction que ce choix induit et qui décroît en fonction du nombre d'itérations déjà effectuées,

Ce procédé autorise donc toujours à la fonction objectif à prendre des valeurs de plus en plus faibles lorsque c'est possible tout en lui permettant de prendre, à l'occasion, des valeurs plus élevées, ce qui l'autorise à sortir d'un éventuel minima local.

Les principaux inconvénients du recuit simulé résident dans le choix des paramètres, tels que la température initiale, la loi de décroissance de la température, les critères d'arrêt ou la longueur des paliers de température. Ces paramètres sont souvent choisis aléatoirement [Bogaert, 2005].

2.5.2.2. Méthodes de Monte-Carlo

Les méthodes de type Monte-Carlo recherchent l'optimum d'une fonction en générant une suite aléatoire de nombres en fonction d'une loi de distribution aléatoire uniforme [Fishman, 1997].

Ces méthodes consistent à simuler pour un modèle donné un grand nombre de résultats fictifs à partir d'une séquence aléatoire dont les caractéristiques sont en accord avec les hypothèses du modèle. Les résultats ont alors le même sens que celui des valeurs que l'on aurait pu observer, et leur grand nombre permet de se faire une idée sur certaines des propriétés de ce modèle. Dans un schéma répétitif, ces approches tentent de suivre le processus suivant [Bogaert, 2005] :

1. générer une solution initiale $x^{(0)}$ dans l'espace de recherche, considéré comme solution courante : $x = x^{(0)}$,
2. générer aléatoirement une nouvelle solution x' .

3. si x' est meilleur que x alors : $x = x'$,
4. répéter les étapes 2 et 3 jusqu'à un certain critère d'arrêt à satisfaire.

Ainsi, il n'existe pas d'algorithme unique et le terme Monte-Carlo décrit un ensemble d'approches largement utilisées. Malgré la simplicité de sa mise en œuvre, cette méthode est gourmande en temps de calcul car elle nécessite un nombre important d'évaluations de la fonction objectif [El Hacem, 2015].

2.5.2.3. Méthode Tabou

Cette méthode, développée par Glover [Glover et al., 1997], est une méthode itérative qualifiée de recherche locale au sens large. Elle consiste à explorer le voisinage d'une solution initiale donnée afin de choisir la solution qui minimise la fonction objectif.

L'idée fondamentale de la méthode Tabou est l'utilisation d'une mémoire dynamique dite *liste Tabou* qui permet de conserver les informations des positions déjà explorées précédemment. Cette liste empêche le blocage de la recherche sur un minimum local en interdisant, à plus ou moins court terme, de retourner sur des solutions précédemment explorées.

Cette méthode est, souvent, utilisée avec des techniques dites d'intensification et de diversification. L'intensification permet l'enregistrement des propriétés des situations à priori bonifiées afin de les exploiter ultérieurement. La diversification cherche à diriger l'algorithme vers des régions de l'espace de recherche non encore explorées.

Cependant, cette opération peut conduire à augmenter la valeur de la fonction (lorsque tous les points du voisinage ont une valeur plus élevée) ou à se bloquer sur un optimum local [Carlomagno et al., 2011].

2.5.2.4. Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques sont basés sur la théorie de l'évolution naturelle. Créés par Holland [Holland, 1975] puis développés par Goldberg [Goldberg, 1989], ils sont très utilisés pour les problèmes d'optimisation comportant plusieurs paramètres et des objectifs multiples.

Ils consistent à faire simuler l'évolution d'une population de solutions à l'aide de différents opérateurs (sélection, croisements, mutations). Ils utilisent à la fois les principes de la survie des structures les mieux adaptées et les échanges d'informations pseudo-aléatoires pour former un algorithme d'exploration qui possède certaines caractéristiques de l'évolution des espèces. A chaque génération, une nouvelle population est créée en utilisant des parties des meilleurs éléments de la population antérieure, ainsi que des parties novatrices, à l'occasion.

Leur application peut être structurée en différentes étapes comme suit :

1. créer la population initiale et évaluer chacun de ses individus,
2. sélectionner les individus à utiliser pour construire la nouvelle population,
3. effectuer une recombinaison des individus sélectionnés à l'aide des opérateurs de croisement et de mutation,
4. évaluer les nouveaux individus et établir la nouvelle population,
5. recommencer à l'étape 2 tant que la condition d'arrêt n'est pas remplie.

Les algorithmes génétiques possèdent un inconvénient majeur : ils sont très gourmands en temps de calcul. Afin d'améliorer les propriétés de convergence et gagner en temps de calcul, plusieurs chercheurs ont proposé l'utilisation d'algorithmes génétiques adaptatifs [Gen et al., 2000].

2.5.3. Méthodes énumératives

Ces méthodes sont de principe simple. Dans un espace de recherche fini et discrétisé, un algorithme énumératif évalue la valeur de la fonction à optimiser en chaque point de l'espace de recherche. Par cette exploration exhaustive de l'espace de recherche, l'ensemble des critères d'optimisation sont comparés entre eux. La solution est donc celle pour laquelle la valeur de la fonction objectif est la plus optimale.

Dans la pratique, les espaces de recherche sont souvent de grandes tailles pour que l'on puisse explorer toutes les possibilités, une par une, afin d'obtenir la solution appropriée. Ainsi, ces méthodes sont très coûteuses et manquent d'efficacité [Levasseur, 2007].

2.5.4. Méthodes hybrides

Dans la littérature, pour un problème donné, il est connu qu'il n'y a pas de moyens permettant d'assurer qu'une méthode d'optimisation donnera, dans tous les cas possibles, les meilleurs résultats. De plus, selon le cas, on peut toujours mettre en défaut une méthode par rapport à d'autres. Ainsi, il peut être avantageux de considérer des méthodes hybrides qui se présentent comme un moyen efficace permettant de trouver un compromis entre les avantages et les inconvénients de plusieurs méthodes d'optimisation.

Ces dernières années, les méthodes hybrides sont très utilisées dans diverses études d'ingénierie. On peut citer, à titre d'exemple, les travaux de Kiran et al. [Kiran et al., 2011] et les travaux de Tsai et al. [Tsai et al., 2003]. Ces travaux et d'autres ont montré que les méthodes hybrides sont des méthodes d'optimisation très puissantes et ont apporté une nette amélioration vis-à-vis de la rapidité de convergence, l'efficacité de recherche et la précision des résultats.

2.5.5. Critiques sur les méthodes d'optimisation mono-objectif

Chaque méthode d'optimisation possède des avantages et des inconvénients et ne possède pas la même efficacité de calcul pour tous les types de problème.

Pratiquement, il est reconnu que les méthodes déterministes manquent, généralement, de robustesse et sont particulièrement sensibles aux minimums locaux et n'assurent pas la convergence vers l'optimum global de la fonction objectif. Cela implique que la solution initiale (point de départ) doit être aussi proche que possible de la solution recherchée.

D'autre part, les méthodes stochastiques ont une grande capacité à trouver l'optimum global d'un problème donné. Effectivement, ces méthodes ne nécessitent ni point de départ, ni la connaissance du gradient de la fonction objectif pour atteindre la solution optimale. Cependant, elles requièrent un volume de calcul plus important et n'offrent aucune garantie de convergence vers l'optimum global en un temps fini.

Comme mentionné plus haut, les méthodes énumératives sont très coûteuses et manquent généralement d'efficacité.

Enfin, les méthodes hybrides se présentent comme un moyen efficace permettant de trouver un compromis entre les avantages et les inconvénients de plusieurs méthodes d'optimisation.

Ainsi, le choix d'une méthode d'optimisation n'est pas toujours évident et dépend principalement des besoins de l'utilisateur, du type du problème et de la taille et la géométrie de la fonction optimisée.

Après avoir exposé les problèmes mono-objectif ainsi que leurs méthodes de résolution, nous passons dans le paragraphe suivant à la présentation des problèmes multi-objectif.

2.6. Problème multi-objectif

Dans la pratique, l'optimisation de problèmes est, généralement, composée de plusieurs critères (fonctions objectif), qui peuvent être :

- contradictoires où toute amélioration de l'un des critères se fait au détriment des autres,
- exprimés dans des unités différentes.

Ainsi, le but de l'optimisation multi-objectif consiste à optimiser simultanément ces fonctions.

La difficulté principale d'un problème multi-objectif est qu'il n'existe pas de définition de la solution optimale. On peut simplement exprimer le fait qu'une solution est préférable à une autre mais il n'existe pas une solution meilleure que toutes les autres. La résolution du problème peut nous conduire à plusieurs solutions réalisables pour lesquelles on ne pourra pas faire d'amélioration sur un objectif sans dégradation d'au moins d'un autre [Collette et al., 2004].

De façon formelle, un problème multi-objectif consiste à définir n_f fonctions objectif :

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_{n_f}(\mathbf{x})\} \quad (2.8)$$

qu'il faut minimiser par rapport au vecteur de variable de décisions (**Eq. (2.1)**). Le problème d'optimisation multi-objectif est défini comme suite :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser } \mathbf{f}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{x} \in \mathfrak{R} \\ c_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n_c \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Pour résoudre ce type de problème, trois approches de résolutions sont proposées dans la littérature. Le choix entre ces approches s'exprime par le besoin du décideur ⁴ et la manière dont il doit intervenir pour résoudre le problème. On a [Jozefowicz, 2013] :

- **Préférence a priori** : le décideur définit ses préférences entre les différents critères avant d'utiliser la méthode d'optimisation.
- **Préférence progressive** : le décideur affine son choix de compromis au fur et à mesure du déroulement de la méthode d'optimisation.
- **Préférence a posteriori** : le décideur choisit la solution de son choix parmi l'ensemble des solutions fournies par la méthode d'optimisation.

Dans le paragraphe suivant, nous discutons brièvement les méthodes de résolution.

2.7. Méthodes d'optimisation multi-objectif

Les méthodes de résolution d'un problème multi-objectif, et qui prennent en compte la présence de plusieurs objectifs, sont regroupées en trois catégories :

- **Les méthodes agrégées** : elles transforment un problème multi-objectif en un problème mono-objectif.
- **Les méthodes basées sur Pareto** : fondées sur la notion de dominance ⁵ au sens de Pareto, elles privilégient une recherche satisfaisant au mieux tous les objectifs.

⁴ Le décideur est celui chargé d'utiliser la méthode.

⁵ Lorsqu'on obtient une multitude de solutions, seul un nombre limité de ces solutions va nous intéresser. Pour qu'une solution soit intéressante, il faut qu'il existe une relation de dominance entre la solution considérée et les autres solutions. On dit que la solution \mathbf{x}_1 domine la solution \mathbf{x}_2 si:

- \mathbf{x}_1 est au moins aussi bon que \mathbf{x}_2 dans tous les objectifs,
- et \mathbf{x}_1 est strictement meilleur que \mathbf{x}_2 dans au moins un objectif.

Les solutions qui dominent les autres mais ne se dominent pas entre elles sont appelées solutions optimales au sens de Pareto (ou solutions non dominées).

- **Les méthodes non-agrégées et non-Pareto** : ces méthodes n'utilisent aucun des deux concepts précédents et possèdent un processus de recherche qui traite séparément les objectifs.

Nous allons présenter, ci dessous, brièvement les méthodes les plus utilisées dans la littérature, soit : la méthode d'agrégation pondérée, celle de ϵ -contrainte, celle de SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm) et celle de NSGA (Non Sorting Genetic Algorithm).

2.7.1. Méthode d'agrégation pondérée

Cette méthode, appelée aussi méthode de la somme pondérée, est largement utilisée en pratique. Elle consiste à ramener le problème multi-objectif en un problème mono-objectif via un ensemble de coefficients appelées *poids de pondération* [Jozefowicz, 2013].

Ces coefficients représentent l'importance qu'attribue le décideur à chaque objectif. Cela permettra de transformer un problème multi-objectif en un problème mono-objectif de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser } \sum_{j=1}^{n_f} w_j f_j(\mathbf{x}) \\ \text{avec } w_j \in [0,1] \text{ et } \sum_{j=1}^{n_f} w_j = 1 \\ \mathbf{x} \in \mathfrak{R} \\ c_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n_c \end{array} \right. \quad (2.10)$$

Cette méthode, très simple à mettre en œuvre et très efficace, dépend fortement du choix des valeurs des poids de pondération w_j . Ces derniers doivent également être choisis en fonction des préférences du décideur associées aux objectifs, ce qui est une tâche délicate.

Pour résoudre cela, une technique a été proposée dans la littérature. Elle consiste à utiliser des coefficients avec des poids *adaptatifs*. Cette technique a prouvé son efficacité, et conduit généralement à des gains de précision appréciables [Gen et al., 2000].

Néanmoins, son utilisation exige que les objectifs soient comparables. Ainsi, il est très difficile d'utiliser cette technique quand l'ensemble des critères est composé à la fois de critères qualitatifs et quantitatifs [Jozefowicz, 2013].

2.7.2. Méthode ϵ -contrainte

C'est une autre méthode très utilisée par les chercheurs. Elle consiste à transformer le problème multi-objectif en un problème mono-objectif en optimisant une seule fonction objectif $f_k(\mathbf{x})$ tandis que les autres fonctions objectif sont transformées en contraintes [Jozefowicz, 2013]. Le problème d'optimisation s'écrit alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser } f_k(\mathbf{x}) \\ \mathbf{x} \in \mathfrak{R} \\ f_j(\mathbf{x}) \leq \epsilon_j, \quad j = 1, 2, \dots, n_f \text{ et } j \neq k \\ c_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n_c \end{array} \right. \quad (2.11)$$

Le décideur peut ensuite répéter ce processus pour différentes valeurs de ϵ_j et sur un objectif différent jusqu'à ce qu'il trouve une solution satisfaisante.

Cependant, un choix arbitraire des valeurs de ϵ_j ne permet pas d'obtenir une bonne répartition des solutions de compromis ⁶. De plus, cette méthode est gourmande en temps de calcul [Collette et al., 2004].

2.7.3. Méthode SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm)

C'est en 1998 que les chercheurs Zitzler et Thiele [Zitzler et al., 1998] ont proposé la méthode élitiste ⁷ SPEA. Cette méthode représente une extension d'un algorithme génétique classique, qui consiste à comparer les solutions en se basant sur le concept de Pareto.

⁶ Solutions de compromis ou solutions de Pareto, c'est l'ensemble de solutions que l'on obtient à la fin de l'optimisation.

⁷ Les méthodes élitistes introduisent dans la procédure d'optimisation une population externe (ou archive) permettant de stocker les solutions Pareto.

Les solutions non-dominées sont sauvegardées dans une archive externe. En effet, le passage d'une génération à une autre commence par la mise à jour de l'archive : tous les individus dominés existants sont remplacés par les individus non-dominés.

Si le nombre d'individus de l'archive excède un nombre donné, on applique la technique de clustering⁸ pour réduire sa taille. Ensuite, on applique la fonction de notation avant de passer à la sélection. Pour préserver la diversité de la population et éviter tous risques de convergence prématurée, la méthode niche est employée. Pour terminer, on applique les opérateurs génétiques de modification.

Récemment, une version améliorée de SPEA appelée SPEA-2 est apparue. Cependant, cette méthode reste très gourmande en temps de calcul.

2.7.4. Méthode NSGA (Non Sorting Genetic Algorithm)

Proposée par Srivinas et Deb [Srivinas et al., 1993], cette technique est basée sur les algorithmes génétiques et le calcul de la fitness⁹. Elle s'effectue en séparant la population en plusieurs groupes en fonction du degré de domination au sens de Pareto de chaque individu.

Le passage d'une génération à une autre se fait en commençant par une classification des individus selon leur degré de domination. Ensuite, les individus non dominés forment le front initial et on leur applique une fonction de notation qui est supposée leur donner des chances égales pour se reproduire. Après, ce front est supprimé de la population. Puis, on recommence le processus précédent afin de déterminer un nouveau front de la population, et la valeur de la fonction de notation pour ce groupe d'individus doit être inférieure à celle attribuée aux individus du front initial. Ce processus est répété jusqu'à ce que l'on ait traité tous les individus de la population.

Le grand inconvénient de cette méthode est sa grande complexité et le très grand volume de calcul requis pour la résolution d'un problème.

⁸ La technique de cluster est utilisée pour réduire l'ensemble des solutions Pareto-optimal sans supprimer ses caractéristiques.

⁹ Avec les algorithmes génétiques, on utilise souvent le terme fitness pour désigner la fonction objectif.

2.7.5. Critiques sur les méthodes d'optimisation multi-objectif

Les difficultés rencontrées lors de la résolution d'un problème multi-objectif sont liées aux propriétés des fonctions objectif. Selon la méthode d'optimisation utilisée, ces dernières peuvent créer des difficultés à la progression vers le front optimal global.

Les différentes méthodes de résolution des problèmes multi-objectif tentent de calculer la meilleure approximation du front de Pareto. Or, le lancement plusieurs fois l'exécution de ces méthodes (comme elles intègrent un aspect stochastique) ne conduit pas toujours aux mêmes résultats. Il est donc, nécessaire, de comparer les différents résultats obtenus lors de la phase d'optimisation, dans le but de tester l'efficacité des méthodes employées.

La méthode d'agrégation pondérée est la méthode la plus simple à mettre en œuvre et très efficace surtout lorsque l'ensemble des critères est composé d'objectifs comparables.

De leur part, les algorithmes évolutionnaires ont permis la réalisation de méthodes de résolution très performantes mais sont très gourmandes en temps de calcul.

2.8. Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les définitions fondamentales d'un problème d'optimisation. Généralement, un problème inverse est formulé comme un problème d'optimisation sur un espace de dimension finie. Chaque point de l'espace de recherche représente un ensemble de paramètres décrivant quelques propriétés physiques ou mécaniques à identifier. Le but d'un problème d'optimisation est de minimiser une fonction objectif, mesurant l'écart entre des observations et les prédictions théoriques d'un modèle.

Cette recherche bibliographique montre que la résolution d'un tel problème nécessite tout d'abord une bonne compréhension du problème. Selon les critères d'optimisation, la fonction objectif est soit une fonction scalaire et on parle de problème mono-objectif, soit une fonction vectorielle et on parle de problème multi-objectif, et par conséquent la résolution diffère selon le cas.

Ensuite, nous avons défini le problème d'optimisation mono-objectif ainsi que ses méthodes

de résolution. En effet, Ces méthodes peuvent être réparties en trois catégories : les méthodes énumératives, déterministes et stochastiques. Chaque méthode d'optimisation possède des avantages et des inconvénients. Pratiquement, il est reconnu que les méthodes déterministes manquent, généralement, de robustesse, et sont particulièrement sensibles aux minimums locaux et n'assurent pas la convergence vers l'optimum global de la fonction objectif. D'autre part, les méthodes stochastiques ont une grande capacité à trouver l'optimum global d'un problème donné. Cependant, elles requièrent un volume de calcul plus important et n'offrent aucune garantie de convergence vers l'optimum global en un temps fini.

Puis, nous avons défini le problème d'optimisation multi-objectif et ses méthodes de résolution. La résolution peut être effectuée en utilisant trois approches : les méthodes agrégées qui transforment le problème multi-objectif en un problème mono-objectif, les méthodes basées sur Pareto et les méthodes non-agrégées et non-Pareto. Une revue de certaines techniques a également été présentée. Cette revue bibliographique nous a permis de faire le point sur les méthodes qui seront utilisées ultérieurement pour résoudre le problème d'identification traité dans cette thèse.

Au vu des particularités et difficultés rencontrées pendant ce travail (celles-ci seront discutées en détail plus loin dans cette thèse), il en ressort que notre problème sera traité comme suit :

- Notre problème sera considéré comme un problème multi-objectif adaptatif. On utilisera plusieurs fonctions afin d'aider le programme élaboré dans la recherche de l'optimum global.
- Un schéma hybride, combinant l'Algorithme Génétique Adaptatif (AGA) et la méthode de Levenberg-Marquardt (LM), sera utilisé pour rechercher l'optimum global. Ce schéma va permettre d'utiliser chaque méthode là où sa performance est la meilleure.
- Au début, une optimisation multi-objectif par algorithme génétique adaptatif est lancée pour obtenir un point proche de la solution optimale. La méthode d'agrégation pondérée sera utilisée pour transformer notre cas en un problème mono-objectif. En effet, les objectifs choisis ne sont pas en conflit les uns avec les autres et peuvent être additionnés en une seule fonction.

- Ensuite, une optimisation mono-objectif locale avec la méthode de Levenberg-Marquardt est utilisée pour affiner la solution finale. Ce processus devrait conduire vers les bonnes régions de l'espace. Cette méthode permettra une convergence plus efficace et plus rapide à l'approche de la solution optimale.

Chapitre 3

Démarche de caractérisation et d'identification des paramètres de sols

3.1. Introduction

La démarche de caractérisation proposée dans cette thèse, consiste en la mise en place d'une procédure d'identification hybride multi-objectif adaptatif permettant d'estimer un groupe de paramètres liés au comportement dynamique des profils de sol.

En effet, les méthodes stochastiques convergent rapidement, et quasi-systématiquement vers l'optimum global, tandis que les méthodes déterministes convergent mieux lorsqu'on est proche de la solution finale, ce qui rend cet assemblage, particulièrement, adapté à notre problème et permettra d'aboutir à des résultats plus performants avec une meilleure précision en un moindre temps de calcul.

L'objectif de ce chapitre est de développer une procédure analytique, expérimentale et numérique pour la caractérisation d'un site. Au début, nous allons décrire le problème traité et définir la stratégie de résolution du problème. Ensuite, nous présenterons la procédure mise en place pour l'optimisation des paramètres de sols. Nous allons aussi décrire en détails les méthodes utilisées dans notre approche à savoir l'Algorithme Génétique Adaptatif (AGA) et la méthode de Levenberg-Marquardt (LM).

3.2. Définition du problème

En général, une procédure d'identification consiste à appliquer un ou plusieurs signaux d'excitation à l'entrée d'un système, et analyser la sortie dans le but de déterminer les paramètres d'un modèle prédéfini ou d'obtenir un modèle mathématique permettant de mieux représenter le système étudié.

Cette identification peut se faire soit dans le domaine temporel soit dans le domaine fréquentiel, et doit comprendre les éléments suivants [Németh et al., 1999] :

- application d'un signal (ou des signaux) de perturbation à l'entrée du système,
- mesure du signal de sortie du système,
- l'estimation et la validation du modèle paramétrique.

Ces éléments sont intégrés par la définition d'un modèle et l'utilisation systématique d'un algorithme pour résoudre le problème d'optimisation.

Notre problème consiste à déterminer les valeurs optimales de quelques paramètres mécaniques et physiques d'un profil de sol (l'épaisseur, l'amortissement, la masse volumique et la vitesse de propagation des ondes de cisaillement) à partir d'enregistrements accélérométriques de mouvements sismiques.

Dans cette approche, une fonction de transfert (fonction d'amplification théorique) pour un site est définie et calculée. Cette fonction est exprimée en termes des différents paramètres des couches constituant le profil de sol. D'autre part, une fonction d'amplification empirique est évaluée, expérimentalement, à partir de deux enregistrements accélérométriques. Ces deux fonctions permettent de constituer la fonction objectif pour le problème d'optimisation considéré.

L'identification de ces paramètres peut se faire en résolvant un problème d'optimisation qui consiste donc à minimiser, dans le domaine fréquentiel, les différences entre le module de la fonction de transfert exprimée en termes des différents paramètres optimisés, et le module de la fonction d'amplification expérimentale.

Pour aider la procédure élaborée à mieux converger vers la solution optimale, les courbes expérimentales seront lissées.

Dans notre cas, la résolution du problème est effectuée à l'aide d'un schéma hybride multi-objectif adaptatif. Au début, la méthode des Algorithmes Génétiques Adaptatif (AGA) est exécutée pour trouver un point proche de la solution recherchée. Dans cette phase, une optimisation multi-objectif adaptatif est appliquée afin de se rapprocher des valeurs optimales des paramètres du modèle théorique choisi. Ensuite, une optimisation mono-objectif locale avec la méthode de Levenberg-Marquardt (LM) est lancée pour raffiner la solution.

Enfin, ce schéma n'inclut aucune contrainte sur les paramètres optimisés du fait que la méthode AGA explore un espace de recherche borné par des valeurs réelles.

3.2.1. Formulation du problème

Dans la phase d'optimisation par l'AGA, trois fonctions objectifs sont utilisées sans contrainte car non nécessaire du fait que, dans cette phase, chaque paramètre est défini dans son intervalle de possibilité respectif.

La méthode de la somme pondérée (voir [paragraphe 2.7.1](#)) est utilisée pour transformer notre cas en un problème mono-objectif. Cette méthode est très convenable à notre cas, puisque les objectifs traités sont comparables. En se référant à l'[Eq. \(2.10\)](#), notre cas de problème s'écrit comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser } F(\mathbf{x}) \\ \text{avec } F(\mathbf{x}) = w_1 f_1(\mathbf{x}) + w_2 f_2(\mathbf{x}) + w_3 f_3(\mathbf{x}) \\ w_1 + w_2 + w_3 = 1 \end{array} \right. \quad (3.1)$$

où w_1 , w_2 et w_3 sont les poids de pondération, $f_1(\mathbf{x})$, $f_2(\mathbf{x})$ et $f_3(\mathbf{x})$ sont les fonctions objectifs qui seront discutées en détail dans le [paragraphe 3.3](#), et $F(\mathbf{x})$ est la fonction objectif globale ou *fitness*. Pour rendre cette méthode efficace, la technique des poids adaptatifs est utilisée. Cette technique sera discutée plus bas (voir [paragraphe 3.4.2.5](#)).

Ensuite, lors de l'optimisation par LM, le problème se réduit à :

$$\begin{cases} \text{minimiser } F(\mathbf{x}) \\ \text{avec } F(\mathbf{x}) = f_1(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (3.2)$$

Le choix de cette fonction se justifie par le fait qu'elle a été utilisée avec succès par Harichane [Harichane et al., 2005] lorsque le point de départ est proche de la solution optimale.

3.3. Fonctions objectif

La procédure d'identification proposée ici, se réduit à un problème d'optimisation qui consiste à minimiser plusieurs critères traduisant les différences entre la réponse théorique et la réponse expérimentale. Cette procédure sera menée dans le domaine fréquentiel pour deux raisons :

- premièrement, ce domaine traduit bien les caractéristiques dynamiques des profils de sols,
- deuxièmement, l'opération complexe de convolution temporelle se transforme en un simple produit scalaire, ce qui conduit donc à une simplification du problème [Kramer, 1996].

La première fonction objectif traduit l'écart existant entre les courbes correspondant à la fonction de transfert théorique et la fonction d'amplification expérimentale. Elle est basée sur la technique de minimisation, au sens des moindres carrés, décrite en détail dans les références [Afra, 1991 ; Harichane, 2005]. Formellement, c'est la somme quadratique des écarts entre les mesures et les prédictions de la fonction de transfert, soit :

$$f_1(\mathbf{x}) = K \int_0^{\omega_{max}} |T_e(\omega) - T_m(\mathbf{x}, \omega)|^2 d\omega \quad (3.3)$$

où ω est la pulsation angulaire, ω_{max} est la pulsation angulaire maximale définissant la fonction mesurée, $T_m(\mathbf{x}, \omega)$ est la fonction de transfert théorique, $T_e(\omega)$ est la fonction de transfert expérimentale et K est un facteur de normalisation, tel que :

$$K = \left(\int_0^{\omega_{max}} |T_e(\omega)|^2 d\omega \right)^{-1} \quad (3.4)$$

Les expressions de la deuxième et troisième fonction objectif sont inspirées de la forme spéciale des fonctions d'amplifications utilisées. Lors de l'optimisation, ces fonctions auront pour tâche d'orienter, efficacement, la procédure d'optimisation vers les solutions présumées optimales. Ainsi, ces deux objectifs ne sont pas en conflit avec le premier objectif.

Formellement, la deuxième fonction objectif est définie comme étant la somme quadratique normalisée des écarts entre les pulsations naturelles théoriques ω_m^{*j} et les pulsations naturelles expérimentales ω_e^{*j} , soit :

$$f_2(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{j=1}^{n_\omega} [\omega_e^{*j} - \omega_m^{*j}]^2}{\sum_{j=1}^{n_\omega} (\omega_e^{*j})^2} \quad (3.5)$$

tandis que la troisième fonction objectif représente la somme quadratique normalisée des écarts entre les n_ω pics d'amplification calculés et mesurés, correspondant aux pulsations naturelles considérées précédemment, soit :

$$f_3(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{j=1}^{n_\omega} |T_e(\omega_e^{*j}) - T_m(\mathbf{x}, \omega_m^{*j})|^2}{\sum_{j=1}^{n_\omega} |T_e(\omega_e^{*j})|^2} \quad (3.6)$$

3.4. Développement de la procédure d'optimisation

Comme mentionné précédemment, l'idée clé de notre procédure est l'hybridation de deux méthodes : AGA et LM.

3.4.1. Hybridation des méthodes d'optimisation

La forme la plus simple d'hybridation est la combinaison séquentielle. Chaque méthode est utilisée là où sa performance est la meilleure.

Dans la première phase, une recherche par l'AGA est exécutée, en commençant avec une population initiale générée aléatoirement, parmi les solutions possibles. Cette population évoluera à travers les générations jusqu'à ce qu'un certain critère d'arrêt soit rempli.

L'évolution de la population se réalise en appliquant, à chaque génération, différents opérateurs (sélection, croisement, mutations) afin d'obtenir une nouvelle population qui évoluera à son tour de la même façon, jusqu'à ce qu'on aboutisse à une génération jugée optimale [Goldberg, 1989].

Dans cette phase, l'ajustement des propriétés des opérateurs génétiques et des poids de pondération est effectué sur la base d'informations utiles de la population de chaque génération.

Dans la seconde phase, une recherche LM est exécutée en commençant par la meilleure solution trouvée par l'AGA dans la phase précédente. Cette solution sera considérée comme point de départ de la méthode LM qui consiste à utiliser les méthodes de Gauss-Newton, et de descente de gradient conjointement, en faisant intervenir une constante qui changera de valeur à chaque itération jusqu'à ce que l'on parvienne à faire décroître l'erreur. Cette méthode permet donc d'allier les avantages de chaque méthode, efficacité d'un côté et garantie de décroissance de l'autre [Marquardt, 1963].

La **figure 3.1** illustre l'organigramme de la procédure proposée. Les différentes étapes sont discutées en détails dans les paragraphes suivants.

3.4.2. Optimisation par algorithme génétique adaptatif

Les algorithmes génétiques (AG) sont des techniques de recherche probabilistes basées sur la théorie de l'évolution naturelle des espèces et de la génétique. Ils utilisent à la fois les principes de la survie des individus les mieux adaptées et les échanges d'informations pseudo-aléatoires pour former un algorithme d'exploration [Goldberg, 1989].

Cette technique permet de simuler l'évolution d'une population d'individus, choisis aléatoirement au départ, à laquelle on applique, à chaque génération, différents opérateurs. Les individus vont être sélectionnés et croisés entre eux, et certains vont être mutés afin d'évoluer la population de générations en générations, et la guider vers les bonnes solutions, en évitant autant que possible, une convergence vers un optimum local.

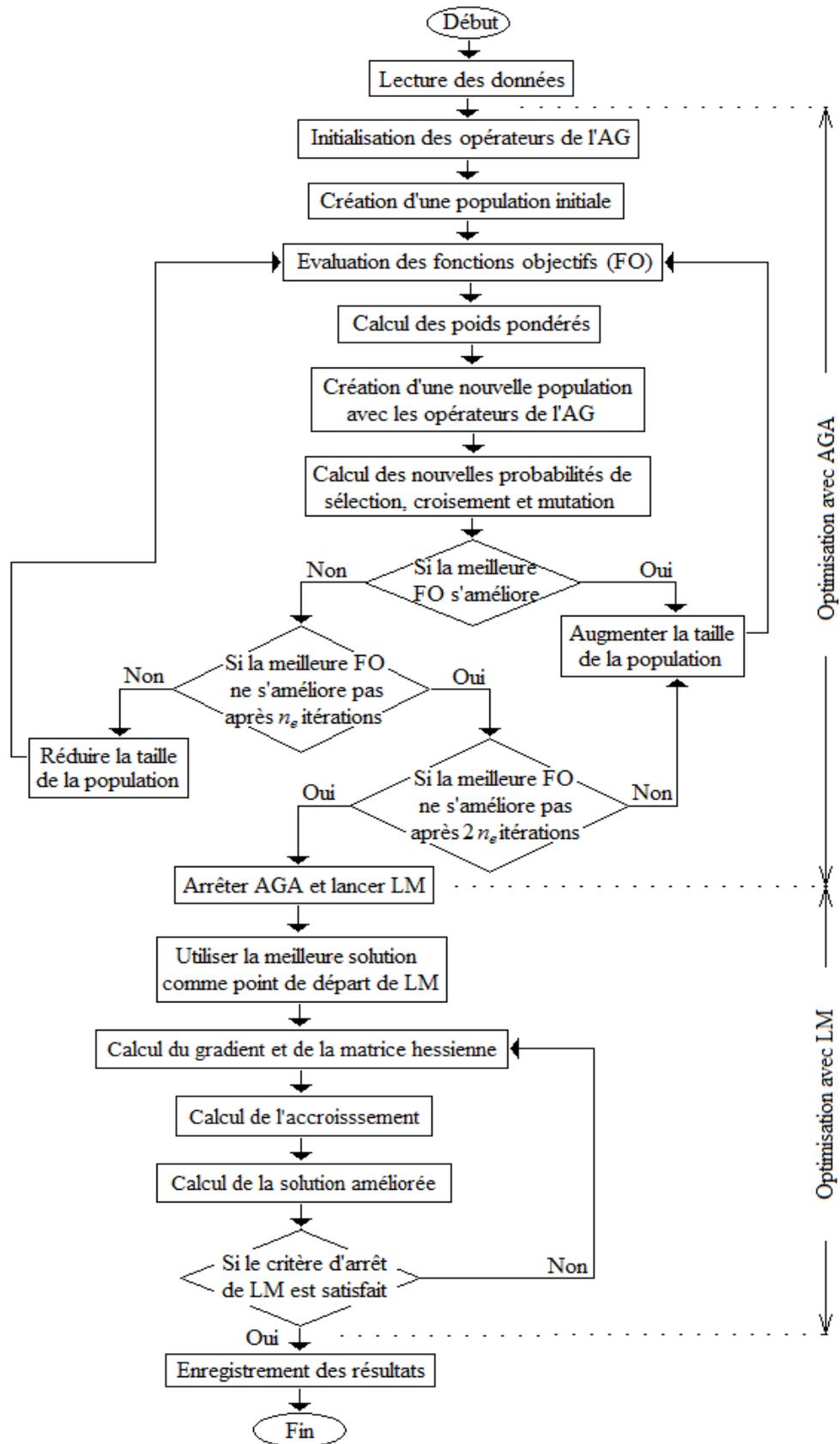


Fig. 3.1. Organigramme global de la procédure élaborée pour l'identification des paramètres de sols.

Dans cette thèse, la méthode AGA est composée de cinq étapes de base [Gen et al., 2000] :

- définition de l'espace de recherche,
- création d'une population initiale constituée d'individus choisis aléatoirement parmi les solutions possibles,
- Evaluation de la population pour qualifier ses individus avant de subir les différents opérateurs génétiques,
- génération d'une nouvelle population et abandon de l'ancienne,
- ajustement des propriétés des opérateurs génétiques.

3.4.2.1. Espace de recherche, individu et population

L'espace de recherche doit, nécessairement, être fini. En effet, les intervalles de définition des paramètres sont naturellement limités, et on dispose souvent d'une idée sur l'ordre de grandeur de chaque paramètre du problème, comme c'est le cas dans ce travail. La taille de cet espace est fonction de la connaissance a priori de la solution du problème.

Chaque *individu* représente une solution possible au problème. Le regroupement de plusieurs individus constitue une *population*. Par analogie avec la génétique, chaque individu de cette population est un *chromosome* et chaque caractéristique de l'individu est un *gène*. Chaque gène représente une partie élémentaire du problème et sera représenté par un *bit*, il peut être assimilé à une variable et peut prendre des valeurs différentes (Fig. 3.2).

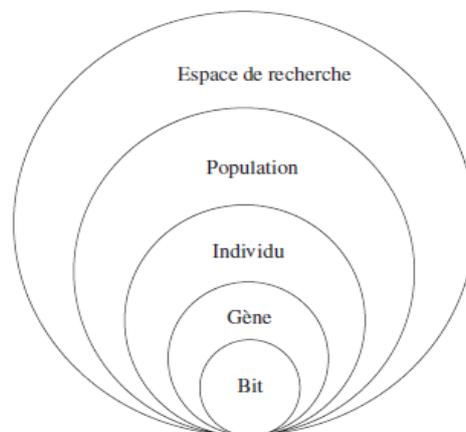


Fig. 3.2. Schématisation des niveaux d'organisation d'un algorithme génétique [Magnin, 1998].

Ainsi, une population est donc un tableau d'individus dans lequel chaque élément représente les paramètres codés.

3.4.2.2. Création de la population initiale

Au lancement de la méthode AGA, une population initiale est créée avec des individus générés aléatoirement, et répartis sur tout le domaine de recherche, car il est essentielle de maintenir une certaine diversité dans la population initiale afin d'éviter de rester piégé dans les optimums locaux.

La taille de cette population est proportionnelle à son adaptation au problème. Elle est modifiée pour chaque génération en fonction de l'amélioration des résultats de l'optimisation.

3.4.2.3. Codage et décodage des individus

Dans notre cas, les individus sont codés sous forme binaire. Un gène est représenté par une chaîne de bits qui peuvent prendre les valeurs 0 ou 1 (**Fig. 3.3**).

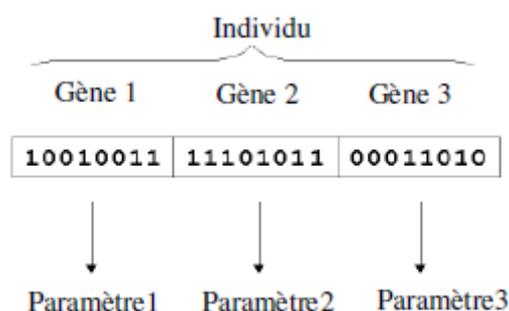


Fig. 3.3. Illustration schématique du codage binaire des paramètres à identifier par algorithme génétique : un individu [Magnin, 1998].

Ce codage est simple à mettre en œuvre, mais implique une perte de précision lors du codage des nombres réels. Dans ce travail, cet inconvénient n'est pas un problème du fait que la méthode AGA est utilisée pour se rapprocher de l'optimum global, et la méthode LM pour

affiner la solution finale avec la précision requise.

Afin de coder nos variables réelles en binaire, nous discrétisons l'espace de recherche. Un codage sur n_b bits implique une discrétisation des intervalles en g^{max} valeurs discrètes, tel que :

$$g^{max} = 2^{n_b} - 1 \quad (3.7)$$

La taille de la chaîne de bits n_b dépend de la précision souhaitée sur cette solution. Elle est déterminée, pour chaque paramètre, de façon à optimiser le temps de calcul sans perdre en précision.

A chaque paramètre réel x_j on associe donc un entier long g_j (gène), tel que :

$$0 \leq g_j \leq g^{max} \quad \text{pour } j = 1, 2, \dots, n_p \quad (3.8)$$

Les opérations de codage et décodage sont effectuées à l'aide des formules respectives suivantes :

$$g_j = \frac{x_j - x_j^{min}}{x_j^{max} - x_j^{min}} g^{max} \quad (3.9)$$

et

$$x_j = x_j^{min} + (x_j^{max} - x_j^{min}) \frac{g_j}{g^{max}} \quad (3.10)$$

où x_j^{min} et x_j^{max} sont, respectivement, les valeurs minimales et maximales que peut prendre le paramètre x_j .

Rappelons que la transformation la plus simple d'une chaîne binaire B en nombre entier g_j (**Fig. 3.4**) s'opère par la règle suivante :

$$g_j = \sum_{k=0}^{n_b-1} B_k \times 2^k \quad (3.11)$$

Pour finir, les gènes codés seront placés dans l'individu (les mêmes gènes sont placés au même endroit sur un individu) et les individus seront placés dans la population (**Fig. 3.3**)

avant de subir les différents opérateurs génétiques.

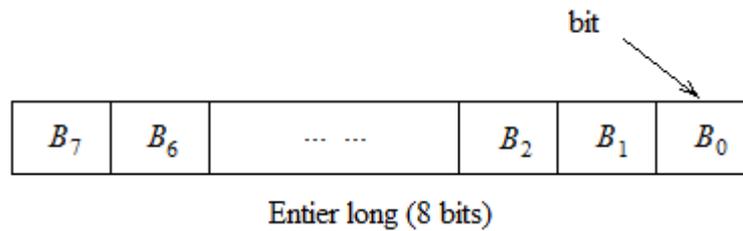


Fig. 3.4. Exemple d'une discrétisation d'un gène en 8 bits.

3.4.2.4. Evaluation de la population

Après avoir généré, aléatoirement, la population initiale sur l'espace de recherche, chaque individu est affecté d'une évaluation numérique correspondant à sa fitness $F(\mathbf{x})$, qui sert à qualifier chaque individu.

Cette fonction est propre à chaque individu, et est indépendante des autres individus. Elle est évaluée avec l'[Eq. \(3.1\)](#). Elle est à la base des mécanismes d'évolution de la population décrits ci-dessous.

3.4.2.5. Détermination des poids de pondération adaptatif

Pour déterminer l'ensemble des poids appropriés pour un problème donné, Gen et Cheng [[Gen et al., 2000](#)] ont proposé un procédé utilisant quelques informations utiles de la population actuelle lors de l'optimisation par la méthode AG pour réajuster les poids de pondération afin d'avoir une convergence de recherche adéquate vers l'optimum global.

Cette procédure a été développée pour les problèmes de maximisation, mais est valable aussi pour les problèmes de minimisation. En effet, le principe de la dualité [[Deb, 2001](#)] permet le passage de l'un à l'autre en multipliant seulement la valeur de la fonction fitness par -1 ([Eq. \(2.4\)](#)). Lorsque l'on considère un problème de maximisation, nous définissons, pour chaque génération d'un AG, deux ensembles extrêmes des valeurs des fonctions objectif :

- ensemble des points extrêmes maximums : $\{f_1^{max}, f_2^{max}, f_3^{max}\}$,
- ensemble des points extrêmes minimums : $\{f_1^{min}, f_2^{min}, f_3^{min}\}$,

puis, un poids w_j sera attribué pour chaque fonction objectif, tel que :

$$w_j = 1/(f_j^{max} - f_j^{min}) \quad j = 1, 2, 3 \quad (3.12)$$

Par la suite, la fonction fitness est la somme pondérée des fonctions objectif, et se calcule comme suit :

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^3 \frac{f_j(\mathbf{x}) - f_j^{min}}{f_j^{max} - f_j^{min}} \quad (3.13)$$

3.4.2.6. Evolution de la population

Après avoir évalué chaque individu, l'AG fait évoluer la population vers les optimums du problème. Chaque génération correspond à une itération de l'algorithme. Une nouvelle génération est créée en utilisant des parties des meilleurs individus (parents) sélectionnés de la génération précédente. Ensuite, de nouveaux individus (enfants) sont générés par mutation, croisement, et la reproduction directe pour créer la nouvelle génération.

Ce processus est répété sur plusieurs générations jusqu'à ce que soit satisfait un certain critère d'arrêt.

3.4.2.7. Opérateur de sélection

Cet opérateur est chargé de choisir les individus qui vont être copiés dans la nouvelle population, et vont servir de parents et qui seront autorisés à se reproduire. Quatre méthodes de sélection sont proposées dans la littérature : la loterie biaisée, élitiste, la sélection par tournoi et la sélection universelle stochastique [Goldberg, 1989].

Dans notre procédure, la sélection par tournoi est utilisée. Cette méthode consiste à choisir au hasard deux individus, et sélectionner celui ayant la meilleure fitness d'entre eux. Ce dernier sera inclus comme un individu de la prochaine génération de la population. La probabilité de sélection P_s (ou pression de sélection) est proportionnelle à l'amélioration des résultats de l'optimisation.

Ce processus est répété, plusieurs fois, jusqu'à l'obtention des n_{ip} individus qui serviront de parents. A la fin, il faut s'assurer que l'individu ayant la meilleure fitness de toute la population est sélectionné et copié dans la prochaine population.

3.4.2.8. Opérateur de croisement

Une fois la sélection terminée, les individus choisis sont répartis en couples. L'opérateur de croisement est alors appliqué aux individus parents pour générer de nouveaux individus enfants. Cet opérateur caractérise la phase d'échange et de transmission d'informations entre les parents et les enfants (Fig. 3.5).

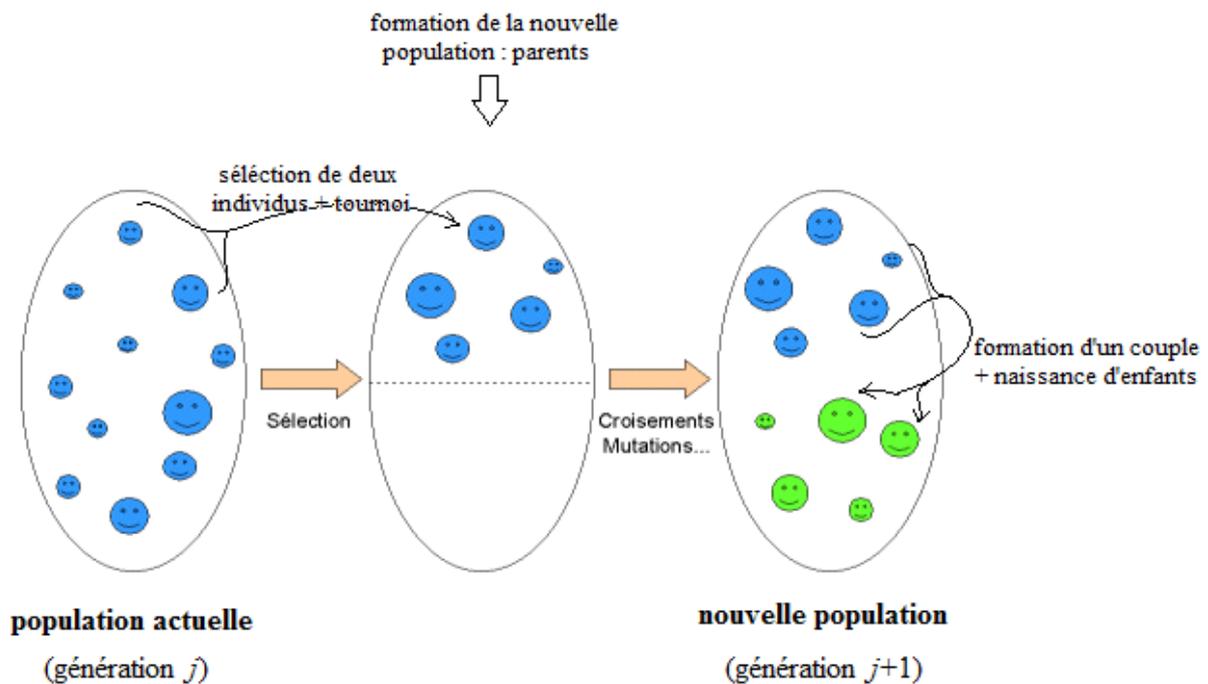


Fig. 3.5. Représentation schématique de formation d'une nouvelle population [Magnin, 1998].

Le croisement consiste à échanger des chaînes de bits entre les parents. Les individus d'un couple sont coupés en un nombre n_{cp+1} de morceaux. Les positions des n_{cp} points de croisement (coupures) sur la chaîne de bits sont choisies aléatoirement et indépendamment des gènes.

De part et d'autre de ces coupures, les individus échangent les morceaux de chaînes de bits pour former les chaînes de bits enfants (Fig. 3.6). Cette opération est répétée sur tous les couples de la population parent jusqu'à compléter la population enfant.

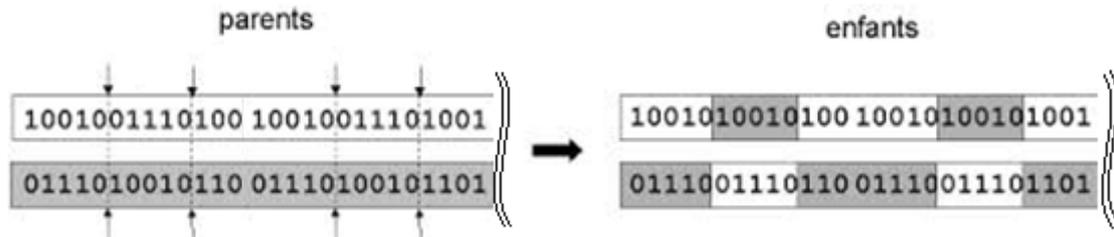


Fig. 3.6. Représentation schématique du croisement en plusieurs points [Magnin, 1998].

Il est noté que le nombre de points de croisement ainsi que la probabilité de croisement permettent d'introduire plus ou moins de diversité. En effet, Stoffa et Sen [Stoffa et al., 1991] expliquent qu'un nombre de points de croisements et une probabilité de croisement P_c faibles limitent le nombre d'échanges entre paramètres, et apporteront moins de diversité et que l'exploration de l'espace de recherche à chaque génération est limitée.

Plusieurs techniques sont proposées dans la littérature, dont l'opérateur de *croisement uniforme* [Dréo et al., 2003] qui sera utilisé dans notre procédure. Cette technique consiste à définir de manière aléatoire un *masque*, c'est-à-dire une chaîne de bits (comportant des 0 et des 1) de même longueur que les parents sur lesquels il sera appliqué (Fig. 3.7a).

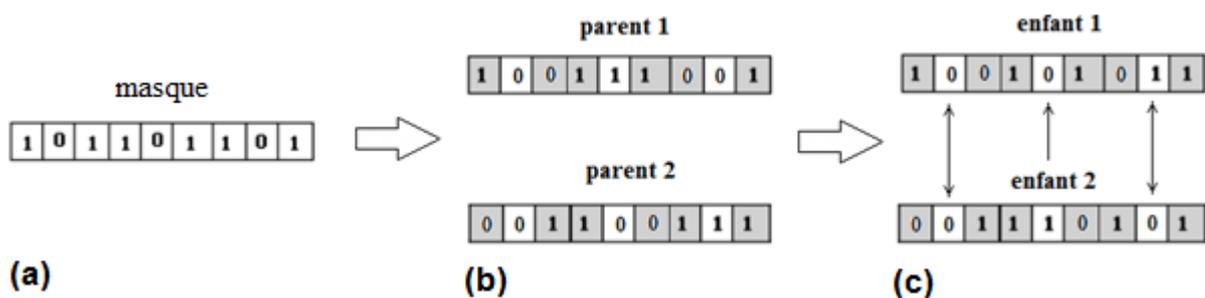


Fig. 3.7. Procédure de déroulement du croisement uniforme [Dréo et al., 2003].

Les 0 du masque définissent les bits préservés dans le parent 1, et les 1 du masque définissent les bits préservés dans le parent 2 (**Fig. 3.7b**). Ensuite on permute les bits non-préservés de façon à respecter l'ordre qu'ils ont dans les parents (**Fig. 3.7c**).

3.4.2.9. Opérateur de mutation

Cet opérateur consiste à modifier, aléatoirement et occasionnellement, la valeur d'un bit dans une chaîne de bits avec une probabilité de mutation P_m très faible. Goldberg [Goldberg, 1989] recommande d'utiliser un taux de mutation compris entre 0,001 et 0,1.

La mutation génère des erreurs de recopie, pour diversifier les individus de la nouvelle population. Elle empêche la convergence prématurée et permet d'explorer de nouvelles zones dans l'espace de recherche. Pour quelques individus nouvellement créés, un bit choisi, aléatoirement, dans la chaîne de caractères est inversé comme représenté sur la **Fig. 3.8**.

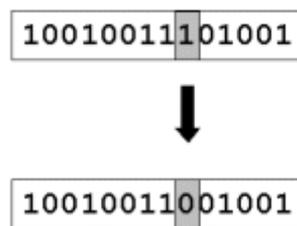


Fig. 3.8. Représentation schématique de l'opération de mutation dans une chaîne de bits [Dréo et al., 2003].

Par conséquent, l'AG fait évoluer la population sur plusieurs générations. Dans ce processus, la sélection tend à réduire la diversité de cette population tandis que le croisement et la mutation accroît cette diversité.

3.4.2.10. Adaptation des opérateurs génétiques

La performance de l'AG dépend de nombreux paramètres tels que la taille de la population et les probabilités de sélection, de croisement et de mutation. Plusieurs chercheurs [Goldberg,

1989 ; Gen et al., 2000 ; Dréo et al., 2003 ; Levasseur, 2007] ont étudié les effets de ces paramètres, et ont proposé des valeurs permettant de mieux exploiter l'AG dans les problèmes d'optimisation.

Dans notre procédure, ce problème est soulevé par l'utilisation d'une méthode adaptative. Dans ce cas, les étapes de l'AG sont les mêmes que celles décrites ci-dessus, et avec le même enchaînement. La modification des valeurs des différents paramètres est effectuée, au fur et à mesure, de la progression de l'optimisation dans notre procédure.

Le processus commence par la lecture des valeurs initiales des différents opérateurs prédéfinis par défaut. Ensuite, une population initiale est créée, aléatoirement, puis on enchaîne avec les étapes de l'AG exposées ci-dessus. Les modifications sont effectuées pour chaque paramètre comme suit :

- **Taille de la population :** elle est modifiée à la fin des étapes typiques de sélection, croisement et mutation. Elle peut augmenter ou diminuer en fonction de l'amélioration de la valeur de la meilleure fitness contenue dans la population.

La taille de la population change lorsqu'il y a une amélioration de la valeur de la meilleure fitness ou lorsqu'il n'y a aucune amélioration au cours des dernières n_e évaluations. Si ni l'une ni l'autre des conditions ci-dessus n'est vérifiée, la taille de la population est diminuée par un petit pourcentage (1–5 %). Le taux de croissance d'une population θ est donné par [Eiben et al., 2004] :

$$n_{pop}^{(k+1)} = (1 + \theta^{(k)})n_{pop}^{(k)} \quad (3.14)$$

avec

$$\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)}(N_w - N_c) \frac{F_a^{max} - F_p^{max}}{F_i^{max}} \quad (3.15)$$

où $n_{pop}^{(k+1)}$ et $n_{pop}^{(k)}$ représentent, respectivement, les tailles de la nouvelle population et la population actuelle, $\theta^{(0)}$ est le taux de croissance initial d'une population (choisi arbitrairement entre 0 et 1), N_w et N_c sont respectivement le nombre maximal d'évaluations de la fitness et le nombre de l'évaluations actuelle, F_a^{max} , F_p^{max} et F_i^{max} sont respectivement les meilleures valeurs de la fitness dans la génération actuelle, précédente et initiale.

Il est noté que la taille de la population initiale, ainsi que les tailles minimale et maximale de la population doivent être spécifiées au début de cette opération.

- **Adaptation des opérateurs génétiques** : les probabilités de sélection P_s , de croisement P_c et de mutation P_m sont augmentées lorsque la population a tendance à se coincer dans un optimum local, et sont diminuées lorsque la population est dispersée dans l'espace de recherche. Elles sont modifiées, pour la génération k , à l'aide des formules suivantes [Liu et al., 2008] :

$$P_s^{(k+1)} = \frac{N_d f_j^{\kappa(t)}}{\sum_{j=1}^{N_d} f_j^{\kappa(t)}} \quad (3.16)$$

où $P_s^{(k+1)}$ est la probabilité de sélection dans la nouvelle génération, $f_j^{\kappa(t)}$ est la fitness de l'individu j et $\kappa(t)$ est une séquence monotone croissante de nombre réels positifs,

$$P_c^{(k+1)} = \frac{\sum_{j=n_{ga}-1-l}^{n_{ga}-1} \Delta F_j}{\sum_{j=n_{ga}-l}^{n_{ga}} \Delta F_j} P_c^{(k)} \quad (3.17)$$

où $P_c^{(k+1)}$ est la probabilité de croisement dans la nouvelle génération, $P_c^{(k)}$ est la probabilité de croisement actuelle, n_{ga} est le numéro de la génération actuelle et ΔF_j est la différence entre la fitness moyenne des individus dans les l générations immédiates,

$$P_m^{(k+1)} = \frac{\bar{F}}{F_j} P_m^{(k)}, \quad j = 1, 2, \dots, l \quad (3.18)$$

où F_j est la fitness de l'individu j , \bar{F} est la fitness moyenne de la population actuelle, $P_m^{(k+1)}$ est la probabilité de mutation ajustée et $P_m^{(k)}$ est la probabilité de mutation actuelle.

3.4.2.11. Critère d'arrêt

Ce processus est répété sur plusieurs générations jusqu'à satisfaire un critère d'arrêt du processus itératif. Les critères d'arrêt envisageables pour cette procédure sont :

- non convergence de l'algorithme : si l'algorithme ne converge pas vers une solution,

- la procédure est stoppée après un nombre maximal de calculs.
- non amélioration significative de la fitness (convergence atteinte) au cours des dernières n_e évaluations.

3.4.3. Optimisation par la méthode de Levenberg-Marquardt

Une fois l'optimisation par la méthode AGA achevée, les solutions obtenues seront considérées comme estimations initiales pour la prochaine phase d'optimisation effectuée par la méthode de Levenberg-Marquardt (LM).

La méthode LM est parmi les algorithmes les plus utilisés pour la résolution des problèmes non-linéaires. C'est une technique d'optimisation locale mono-objectif qui permet une recherche déterministe dans l'espace des solutions à partir de la fonction objectif et de sa dérivée première et seconde, qui peuvent être estimées numériquement. Elle consiste en une procédure permettant d'améliorer à chaque étape d'un processus itératif, les valeurs initiales d'un ensemble de paramètres donnés (\mathbf{x}), et ceci en minimisant la fonction objectif. Le processus itératif se poursuit jusqu'à ce qu'un critère de convergence prédéfini soit satisfait.

3.4.3.1. Minimisation au sens des moindres carrés

Elle est basée sur la minimisation, au sens des moindres carrés, de la somme des différences entre les réponses temporelles ou fréquentielles, d'un modèle donné à priori et celles mesurées aux différents points d'instrumentation du système étudié [Harichane et al., 2005].

Comme déjà mentionné dans le [paragraphe 3.2.1](#), les paramètres du modèle doivent être choisis de façon à minimiser la fonction $f_1(\mathbf{x})$.

3.4.3.2. Approximation de la fonction objectif

Le développement en série de Taylor de la fonction $f_1(\mathbf{x})$ dans le voisinage de la solution initiale $\mathbf{x}^{(0)}$, permet d'écrire :

$$\begin{aligned}
 f_1(\mathbf{x}) \simeq & f_1(\mathbf{x}^{(0)}) + \sum_{k=1}^{n_p} \frac{\partial f_1(\mathbf{x}^{(0)})}{\partial x_k} (x_k - x_k^{(0)}) \\
 & + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n_p} \sum_{l=1}^{n_p} \frac{\partial^2 f_1(\mathbf{x}^{(0)})}{\partial x_k \partial x_l} (x_k - x_k^{(0)}) (x_l - x_l^{(0)})
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

ou sous une forme condensée :

$$f_1(\mathbf{x}) \simeq f_1(\mathbf{x}^{(0)}) + \nabla f_1^T(\mathbf{x}^{(0)}) \cdot \delta \mathbf{x} + \delta \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{x} \tag{3.20}$$

où n_p est le nombre de paramètres à optimiser, T indice de transposition, ∇f_1 est le vecteur gradient et \mathbf{H} la matrice hessienne dont les éléments sont respectivement définis par :

$$B_k = \nabla f_{1k}(\mathbf{x}^0) = \frac{\partial f_1(\mathbf{x}^{(0)})}{\partial x_k} \tag{3.21}$$

$$H_{kl} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f_1(\mathbf{x}^{(0)})}{\partial x_k \partial x_l} \tag{3.22}$$

et $\delta \mathbf{x}$ vecteur d'incrémentaux aux paramètres à optimiser

$$\delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}^{(0)} \tag{3.23}$$

En dérivant l'Eq. (3.20) par rapport à \mathbf{x} , on obtient :

$$\nabla f_1(\mathbf{x}) \simeq \nabla f_1(\mathbf{x}^{(0)}) + \mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{x} \tag{3.24}$$

Deux cas se distinguent de cette approximation :

1. L'Eq. (3.20) est une bonne approximation de $f_1(\mathbf{x})$ au voisinage du minimum \mathbf{x}^* . Ce dernier se déduit on posant :

$$\nabla f_1(\mathbf{x}^*) = 0 \tag{3.25}$$

d'où on déduit :

$$\delta \mathbf{x} = -\mathbf{H}^{-1} \cdot \nabla f_1(\mathbf{x}^0) \tag{3.26}$$

Par conséquent :

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{x}^0 + \delta \mathbf{x} \tag{3.27}$$

2. A l'opposé, l'**Eq. (3.20)** est une mauvaise approximation de $f_1(\mathbf{x})$ au voisinage de \mathbf{x}^* . Dans ce cas, tout ce qu'on peut tenter est de se déplacer d'un pas p , de longueur fixée, arbitrairement, dans la direction opposée au gradient (méthode des plus fortes pentes) :

$$\delta \mathbf{x} = -p \mathbf{B} \quad (3.28)$$

et

$$\mathbf{x}^* \simeq \mathbf{x}^0 + \delta \mathbf{x} \quad (3.29)$$

3.4.3.3. Principe de la méthode de Levenberg-Marquardt

Levenberg et Marquardt ont proposé une méthode efficace pour passer continûment du schéma de la hessienne inverse (**Eq. (3.26)**) à celui des plus fortes pentes (**Eq. (3.28)**). Ainsi, La méthode LM permet de réunir ces deux méthodes en une méthode unique.

La méthode des plus fortes pentes est utilisée loin du minimum, laissant graduellement la place à la méthode de la hessienne inverse au fur et à mesure que l'on s'approche du minimum.

La stratégie de la méthode LM repose sur deux idées principales [[Numerical Recipes, 1999](#)] :

- 1- La première idée modifie le schéma des plus fortes pentes en remplaçant le pas p par une matrice diagonale \mathbf{P} de composantes :

$$P_{kk} = \frac{1}{\lambda H_{kk}} \quad k = 1, 2, \dots, n_p \quad (3.30)$$

où λ est le coefficient d'atténuation. Il permet de réduire globalement le pas si celui-ci s'avérait trop grand. L'**Eq. (3.28)** devient :

$$\delta \mathbf{x} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{B} \quad (3.31)$$

ou en termes de composantes :

$$\delta x_k = \frac{B_k}{\lambda H_{kk}} \quad (3.32)$$

- 2- La deuxième idée consiste à combiner les deux **Eqs. (3.26)** et **(3.31)** pour ne donner qu'une seule équation, telle que :

$$\delta \mathbf{x} = -\mathbf{H}'^{-1} \cdot \mathbf{B} \quad (3.33)$$

avec

$$\mathbf{H}' = \mathbf{H} + \mathbf{P}^{-1} \quad (3.34)$$

ou en termes de composantes :

$$\begin{cases} H'_{kk} = H_{kk} (1 + \lambda) \\ H'_{kl} = H_{kl} \quad (k \neq l) \end{cases} \quad (3.35)$$

Ainsi, à l'aide d'un processus itératif :

$$\mathbf{x}^{(j+1)} = \mathbf{x}^{(j)} + \delta \mathbf{x} \quad (3.36)$$

qui fournit des approximations successives $\mathbf{x}^{(j)}$ de plus en plus proches des valeurs finales.

La stratégie précédente peut être traduite sous forme d'algorithme permettant de déterminer les valeurs ajustées par itérations successives :

- 1- Initialisation de l'ensemble des paramètres : $\mathbf{x}^{(0)}$ avec $j = 0$,
- 2- Calcul de $f_1(\mathbf{x}^{(0)})$,
- 3- Initiation de λ : $\lambda^{(0)} = 0,001$,
- 4- Calcul de \mathbf{B} , \mathbf{H} et \mathbf{H}' à l'aide des **Eqs. (3.21)**, **(3.22)** et **(3.34)** respectivement,
- 5- Calcul de $\delta \mathbf{x}$ à l'aide de l'**Eq. (3.33)**,
- 6- Calcul de $\mathbf{x}^{(j+1)}$ à l'aide de l'**Eq. (3.36)**,
- 7- Calcul de $f_1(\mathbf{x}^{(j+1)})$,
- 8- Si $f_1(\mathbf{x}^{(j+1)}) \geq f_1(\mathbf{x}^{(j)})$ alors :

$$\lambda^{(j+1)} = 10 \lambda^{(j)}$$

Sinon

$$\lambda^{(j+1)} = \lambda^{(j)} / 10$$

$$\mathbf{x}^{(j+1)} = \mathbf{x}^{(j)} + \delta \mathbf{x}$$

Fin Si

- 9- Si le critère d'arrêt (comme décrit dans le paragraphe suivant) est satisfait alors :

stop

Sinon

Retourner à **4**,

Fin Si

3.4.3.4. Critère d'arrêt

La procédure itérative de la méthode LM se poursuit jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit satisfait. Dans notre procédure, la convergence est atteinte quand l'équation suivante est satisfaite :

$$|f_1(\mathbf{x}^{(j+1)}, \omega) - f_1(\mathbf{x}^{(j)}, \omega)| \leq 10^{-4} \quad (3.37)$$

3.5. Analyse de sensibilité

L'objectif de l'analyse de sensibilité est de quantifier l'effet d'incertitudes entachant les paramètres optimisés sur la variabilité de la fonction objectif d'un modèle. Cela peut notamment servir à identifier les paramètres les plus influents, à les hiérarchiser selon leur influence ou encore à déterminer les entrées ayant le moins d'influence de sorte à pouvoir les fixer à une valeur constante. De même, la détermination de l'intervalle de confiance des paramètres optimisés et la précision de leur estimation, permet de porter un jugement sur leur fiabilité.

Ici, uniquement l'analyse de sensibilité par rapport aux variables d'optimisation est présentée et sera appliquée ultérieurement (voir [paragraphe 5.2.4](#)).

3.5.1. Sensibilité par rapport aux paramètres d'optimisation

Habituellement, la sensibilité d'un modèle est déterminée grâce à l'estimation du vecteur gradient de la fonction objectif ([Eq. \(3.21\)](#)) autour d'un point nominal. En effet, ce vecteur permet de donner une information locale sur la dépendance de la fonction objectif à chacun de ses paramètres. Théoriquement, ce vecteur est nul. L'[Eq. \(3.20\)](#) devient :

$$f_1(\mathbf{x}) \simeq f_1(\mathbf{x}^{(0)}) + \delta \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{x} \quad (3.38)$$

Cette équation montre que la sensibilité de la fonction objectif par rapport aux variations des valeurs des paramètres autour des valeurs optimales est gouvernée par les termes de la matrice hessienne \mathbf{H} .

Ainsi, une variation relative de ε % dans la valeur du paramètre x_k autour de sa valeur optimale, produirait une variation [Afra, 1991] :

$$\Delta f_1(\mathbf{x}) \simeq \frac{1}{2} H_{kl} x_k^2 \varepsilon^2 \quad (3.39)$$

3.5.2. Estimation de l'intervalle de confiance

L'intervalle de confiance, avec lequel les paramètres sont optimisés, est évalué à l'aide de la matrice de covariance \mathbf{C} . Cette matrice, qui pour l'ensemble des paramètres, est la matrice carrée dont l'élément de la ligne k et de la colonne l est la covariance des paramètres x_k et x_l . Cette matrice permet de quantifier la variation de chaque paramètre par rapport à chacune des autres.

On supposant que les données expérimentales présentent une distribution normale et que la variance est la même pour toutes les données, le coefficient de variation δx_k pour chaque paramètre optimisé, et le coefficient d'interaction β_{kl} entre ces paramètres sont donnés par [Afra, 1991] :

$$\delta x_k = \sqrt{C_{kk}} \quad (3.40)$$

et

$$\beta_{kl} = -\frac{C_{kl}}{\sqrt{C_{kk} C_{ll}}} \quad (3.41)$$

Il est rappelé que β_{kl} , compris entre -1 et 1 , exprime le degré d'interaction entre les divers paramètres, il traduit l'influence d'une erreur d'estimation commise sur un paramètre x_l , sur la précision d'estimation d'un autre paramètre x_k .

3.6. Implémentation numérique

L'utilisation d'un code de calcul est nécessaire à la mise en œuvre de la procédure présentée dans ce chapitre.

Habituellement, les codes de calculs sont programmés à l'aide des langages procéduraux (comme le Fortran, C/C++, Matlab, etc.), dans lesquels les algorithmes sont décomposés en procédures qui manipulent des données. L'évolutivité et la validation du code deviennent rapidement problématiques avec l'augmentation de la complexité des structures de données. L'introduction de la programmation orientée objet apporte une solution adéquate, en modélisant les problèmes sous forme d'interactions et liaisons entre des sous-programmes (procédures, fonctions et modules), où chacun d'eux a ses propres données et méthodes.

La procédure élaborée est programmée en Fortran 90. Le choix de ce langage se justifie par sa rapidité d'exécution et son adaptation aux calculs de gros volume. De plus, l'*évolutivité du programme* a également été déterminante dans le choix de ce langage. En effet, l'ajout de nouveaux sous-programmes ne doit pas remettre la totalité du programme en question. La programmation en fortran 90 rend l'opération simple.

Le programme élaboré **optAGLM** (qui signifie : **optimisation** par **Algorithme Génétique** multi-objectifs adaptatif et **Levenberg-Marquardt**) a été développé pendant 3 années et a été modifié et amélioré plusieurs fois pour répondre aux objectifs fixés dans cette thèse et apporter les solutions adéquates aux différents problèmes traités lors de sa mise en œuvre. Il est décomposé en trois parties :

- la première partie est consacrée à la déclaration des variables globales, regroupées dans un module, puis à la lecture des données nécessaires aux applications. Ces données seront contenues dans un fichier texte organisées dans un ordre spécifique.
- la deuxième partie est consacrée à l'optimisation par l'algorithme génétique multi-objectif adaptatif,
- la troisième partie est consacrée à l'optimisation par la méthode de Levenberg-Marquardt.

L'organigramme général de la procédure élaborée a été présenté dans la **figure 3.1**.

Le code de calcul développé est constitué d'un programme principal, un module, dix-sept procédures et quatre fonctions externes. Cette composition nous a permis de valider chaque sous-programme à part et ne pas mettre, chaque fois, la totalité du programme en question lorsqu'on ajoute de nouveaux sous-programmes. Il comprend environ 2500 lignes.

3.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la procédure d'optimisation pour l'identification numérique des caractéristiques d'un site à partir d'enregistrements sismiques. Cette procédure repose sur un couplage d'une méthode d'optimisation stochastique, représentée par l'algorithme génétique adaptatif (AGA) avec une méthode d'optimisation déterministe, représentée par la méthode de Levenberg-Marquardt (LM).

La mise en place de la procédure nécessite différentes fonctions objectifs en relation ici avec la fonction d'amplification du mouvement sismique. Dans la première phase de recherche, l'optimisation est multi-objectif, et consiste à minimiser plusieurs critères traduisant : (i) la somme quadratique des différences entre le module de la fonction de transfert et la fonction d'amplification expérimentale, (ii) la somme quadratique des écarts entre pulsations naturelles théoriques et expérimentale, et (iii) la somme quadratique des écarts entre les pics d'amplification calculés et mesurés. Dans la seconde phase, l'optimisation est mono-objectif et consiste à minimiser, au sens des moindres carrés, la somme des différences le module de la fonction de transfert et la fonction d'amplification expérimentale

Cette procédure est programmée en Fortran 90. Le choix de ce langage se justifie par sa rapidité d'exécution et son adaptation aux calculs de gros volume.

Enfin, les expressions traduisant, respectivement, la fonction de transfert théorique et la fonction d'amplification expérimentale font objet du chapitre suivant.

Chapitre 4

Méthodes et modèles d'évaluation de l'amplification de site à partir de deux enregistrements sismiques

4.1. Introduction

Un des problèmes les plus importants du génie parasismique est l'évaluation de l'amplification de site. L'amplification locale du mouvement sismique dans les bassins sédimentaires peut parfois être très importante.

En effet, la propagation des ondes sismiques dans les formations géologiques de la surface de la terre peut conduire à une grande amplification du mouvement due aux différences dans les propriétés physiques et mécaniques entre le bassin sédimentaire et le substratum rocheux [Renalier, 2010].

Dans la pratique, les méthodes expérimentales, basées sur les caractéristiques des enregistrements sismiques, sont très utilisées pour évaluer les fonctions d'amplifications. Récemment, avec l'apparition de l'outil informatique, les méthodes analytiques et la résolution numérique se sont avérées comme un moyen incontournable pour l'analyse sismique. Elles constituent, également, un outil intéressant de simulation en vue de la prédiction de la réponse de dépôts de sol et l'évaluation des fonctions d'amplifications.

En général, trois grandes catégories d'approches sont proposées afin d'analyser la réponse sismique de sites et extraire plusieurs caractéristiques dont la fonction d'amplification [Harichane, 2005] :

- analyse expérimentale,
- analyse linéaire équivalente unidimensionnelle,
- analyse non-linéaire unidimensionnelle bi- ou tridimensionnelle.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons, uniquement, au développement des méthodes permettant l'évaluation de la fonction d'amplification à l'aide des méthodes appartenant aux deux premières catégories d'approches. En premier, nous passons, brièvement, en revue les différentes méthodes expérimentales et théoriques proposées, dans la littérature, pour les deux premières catégories d'approches. Ensuite, nous exposons les différentes méthodes expérimentales et théoriques qui seront utilisées dans la suite de ce travail. Enfin, nous proposons des formulations qui permettront, ultérieurement, l'identification simultanée des profils de sols de deux sites à partir de deux enregistrements sismiques en surface libre seulement.

4.2. Analyse de l'amplification de site

Deux grandeurs sont utilisées pour représenter l'amplification de site :

- le coefficient d'amplification de site : basé sur différentes classes de sites. Cependant, dans la pratique, il est, généralement, calculé itérativement à partir du profil des vitesses des ondes S et des types de sols plutôt que d'utiliser directement les coefficients définis dans les codes [[Masahiko et al., 2006](#)],
- La fonction d'amplification de site : largement employé dans la pratique, elle est évaluée soit à partir d'enregistrements sismiques, soit par des modèles impliquant des paramètres caractérisant le sol.

Cette fonction sera utilisée dans la procédure d'identification qui est élaborée dans cette thèse. Comme mentionné plus haut, deux catégories d'approches sont traitées brièvement dans ce qui suit.

4.2.1. Approches expérimentales

Actuellement, trois approches sont proposées dans la littérature pour caractériser

l'amplification de site à partir des enregistrements sismiques :

1. La première approche implique une comparaison entre deux enregistrements sismiques fournis par deux stations supposées proches, l'une représente le site étudié, et l'autre représente un site de référence (de préférence un rocher). Cette approche permet de s'affranchir des effets de source et de trajet. En effet, quand la distance entre les deux stations est très inférieure à la distance les séparant de la source, les effets de source et de trajet peuvent être considérés comme identiques pour chacune des deux stations [Şafak, 1997].

Diverses méthodes sont utilisées dans ce sens. Parmi elles, la méthode des rapports spectraux initiée par Borchardt [Borchardt, 1970] est la plus populaire et la plus utilisée. D'autres méthodes sont utilisées telles que les méthodes : du rapport inter-spectral (cross-spectral ratios) [Şafak, 1997], du rapport des réponses spectrales [Kitagawa et al., 1992], rapports des pics d'accélération [Borchardt et al., 1995] et les techniques de déconvolution aveugle [Zevra et al., 1995].

2. La deuxième approche utilise les techniques d'inversions où la source, le trajet, et les caractéristiques de site sont identifiés en analysant des enregistrements sismiques de plusieurs stations simultanément [Andrews, 1986 ; Boatwright et al., 1991 ; Field et al., 1995].
3. La troisième approche est, de plus en plus, utilisée dans la pratique. Elle est basée sur le calcul du rapport spectral entre les composantes horizontale et verticale des enregistrements au site étudié, récoltés par une seule station. Cette approche a été introduite par Nakamura [Nakamura, 1989] pour déterminer l'amplification de site à partir de l'enregistrement du bruit de fond ambiant.

Dans ce chapitre, nous nous limitons, seulement, à l'utilisation des méthodes du rapport spectral standard et du rapport inter-spectral. Ces deux méthodes sont discutées en détail, dans ce chapitre.

4.2.2. Approche linéaire équivalente unidimensionnelle

L'analyse sismique unidimensionnelle des sols est basée sur l'hypothèse que toutes les

couches sont horizontales et que la réponse d'un profil de sol est provoquée, principalement, par la propagation verticale des ondes de cisaillement (ondes SH) à partir du substratum rocheux sous-jacent. En effet, les surfaces du sol et du substratum rocheux sont supposées infinies dans le sens horizontal. Les procédures fondées sur cette hypothèse ont été utilisées pour prédire la réponse du sol qui est en accord raisonnable avec la réponse mesurée dans de nombreux cas [Towhata, 2008].

Dans ce cas, les analyses sismiques des sols sont basées sur l'utilisation d'une *fonction de transfert*. Pour analyser les systèmes linéaires, les fonctions de transferts peuvent être utilisées pour exprimer un *signal de sortie* (associé à un paramètre variant en fonction du temps tels que le déplacement, l'accélération ou autre) correspondant à un *signal d'entrée* (associé à un paramètre de mouvement d'entrée telle que l'accélération du substratum rocheux). Pour l'analyse des systèmes non-linéaires, le comportement non-linéaire peut être approché en utilisant des méthodes itératives avec des propriétés équivalentes linéaires du sol étudié [Kramer, 1996].

Cette approche est très simple et implique la manipulation des nombres complexes. Soit $r(t)$ un signal d'entrée provenant du rocher (Fig. 4.1).

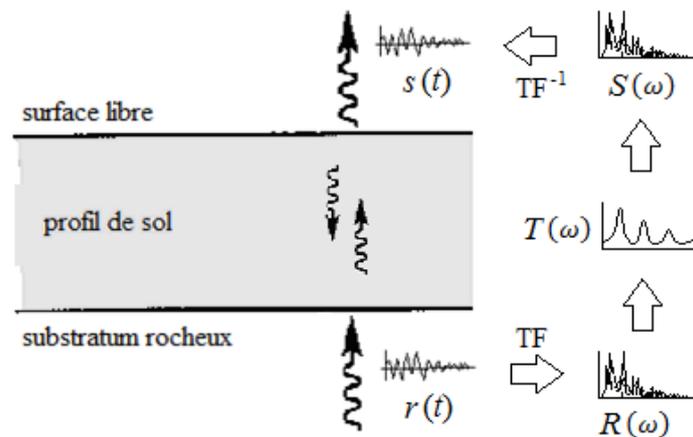


Fig. 4.1. Principe de convolution et déconvolution dans un profil de sol.

Au cours de son passage dans le profil de sol, le signal $r(t)$ subit un filtrage pour donner naissance à la surface du profil de sol à un signal $s(t)$, qui peut être déterminé comme suit (Fig. 4.1) :

- calculer la Transformée de Fourier (*TF*) du signal d'entrée : $R(\omega) = TF[r(t)]$,
- multiplier $R(\omega)$ par la fonction de transfert $T(\omega)$ pour obtenir la transformée de Fourier du signal de sortie : $S(\omega) = T(\omega) \cdot R(\omega)$,
- calculer la transformée de Fourier inverse du signal de sortie : $s(t) = TF^{-1}[S(\omega)]$,

La fonction de transfert du profil de sol est obtenue par un calcul numérique du rapport de la transformée de Fourier du signal de sortie et la transformée de Fourier du signal d'entrée. Cette fonction est exprimée dans le domaine fréquentiel et peut déterminer la façon dont le mouvement du substratum rocheux est amplifié ou désamplifié, à chaque fréquence, par le profil de sol.

Dans la pratique, la plupart des dépôts de sol ont des propriétés mécaniques et physiques qui varient avec la profondeur, et l'analyse sismique des sols doit tenir compte de cet aspect. Pour cela, plusieurs modèles sont proposés dans la littérature pour modéliser le comportement des sols.

Dans la suite de ce chapitre, plusieurs fonctions de transferts issues de différents modèles sont développées. Ces fonctions sont établies en considérant la théorie de propagation verticale des ondes SH en supposant un comportement viscoélastique linéaire pour modéliser la réponse dynamique des sols.

4.3. Méthodes d'évaluation de la fonction d'amplification

Avant de décrire ces méthodes, il est nécessaire de définir quelques termes utilisés dans la littérature pour décrire les mouvements du sol. En référence à la **Fig. 4.2**, le mouvement à la surface du sédiment est appelé *mouvement à la surface libre*.

Le mouvement à la base du sédiment est appelé *mouvement au substratum rocheux*. Le mouvement où le rocher est exposé à la surface du sol, c'est à dire en l'absence de sédiments, est appelé *mouvement à l'affleurement rocheux*.

En Général, il existe deux systèmes différents de réseaux sismiques pour évaluer la fonction d'amplification d'un site, entre la surface du sol et le rocher :

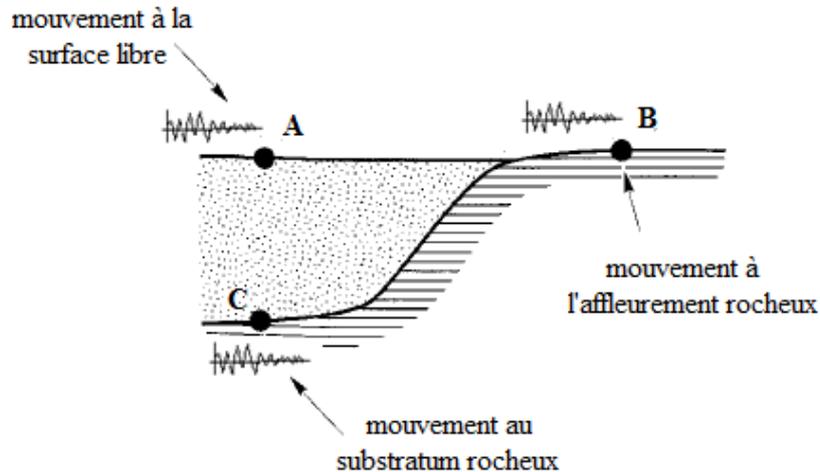


Fig. 4.2. Nomenclature de description des mouvements du sol [Kramer, 1996].

- le premier est un système surfacique ou horizontal constitué de deux sismomètres, l'un en surface libre du sol (point A de la **Fig. 4.2**) et l'autre sur un affleurement rocheux (point B de la **Fig. 4.2**). Avec les résultats obtenus en ces deux points, on peut évaluer la fonction d'amplification sol/affleurement rocheux du site. Cependant, ces points doivent être situés dans une surface, relativement, faible avec une base rocheuse commune.
- Le second est un système vertical constitué de deux sismomètres, l'un en surface libre du sol et l'autre à l'interface entre le profil de sol et le substratum rocheux (point C de la **Fig. 4.2**). Ces deux points permettent d'évaluer la fonction d'amplification sol/substratum rocheux du site.

On rappelle que la fonction d'amplification est définie comme étant le module de la fonction de transfert. Dans ce sens, plusieurs méthodes sont utilisées pour évaluer ces fonctions d'amplifications, expérimentalement et théoriquement. Ces méthodes sont exposées ci-dessous.

4.3.1. Méthodes expérimentales

Comme mentionné, plus haut, seules les méthodes du Rapport Spectral Standard (RSS) et du Rapport Inter-Spectral (RIS) sont développées ici.

4.3.1.1. Méthode du rapport spectral standard

Cette méthode consiste à estimer la fonction de transfert expérimentale $T_e(\omega)$, en calculant le rapport des transformées de Fourier des composantes horizontales des accélérations enregistrées en surface libre $s(t)$ (point A dans la [Fig. 4.2](#)), et au rocher de référence $r(t)$ (point B ou C dans la [Fig. 4.2](#)) :

$$T_e(\omega) = \frac{TF[s(t)]}{TF[r(t)]} = \frac{S(\omega)}{R(\omega)} \quad (4.1)$$

où $S(\omega)$ et $R(\omega)$ sont les transformées de Fourier des accélérations enregistrées en surface libre du sol et au rocher de référence.

Cependant, le calcul direct de la fonction d'amplification à partir du rapport spectral donne des courbes très parasitées à cause du bruit additif aux mesures, et du calcul numérique discret de la transformée de Fourier. A cet effet, il est nécessaire de lisser le module du rapport spectral ou de la fonction d'amplification afin d'éviter les fortes variations d'une fréquence à l'autre et qui ne contribuent pas de façon significative à l'atteinte des objectifs fixés dans cette thèse.

Le lissage consiste à recalculer la valeur d'un point d'une courbe à partir d'une moyenne pondérée de plusieurs points situés de part et d'autre du point considéré. Plusieurs techniques sont proposées dans la littérature. Dans notre cas, nous avons retenu la fenêtre triangulaire qui pondère les valeurs de la courbe par une fonction triangle, définie par [\[Nie, 2007\]](#) :

$$T_e(\omega_k) = \sum_{j=-N_m}^{N_m} \varpi_j T_e(\omega_{k+j}) \quad (4.2)$$

où ϖ_j sont les poids de pondération, tel que :

$$\varpi_j = \begin{cases} \frac{N_m + j + 1}{(N_m + 1)^2} & \text{pour } j = -N_m, -N_m + 1, \dots, 0 \\ \varpi_{-j} & \text{pour } j = 1, 2, \dots, N_m \end{cases} \quad (4.3)$$

et

$$N_m = \text{INT} \left(\frac{\omega_{fr}}{2\delta_\omega} \right) \quad (4.4)$$

où N_m est la partie entière de la demi-largeur de la fenêtre, ω_{f_r} est la fréquence de la fenêtre et δ_ω est l'incrément de fréquence.

4.3.1.2. Méthode du rapport inter-spectral

Une alternative à la méthode du rapport spectral, est la méthode du rapport inter-spectral (cross-spectral ratio). Cette technique calcule la fonction d'amplification comme étant le rapport des densités spectrales des composantes horizontales des accélérations enregistrées en surface libre et au rocher de référence, soit [Şafak, 1997] :

$$T_e(\omega) = \frac{\psi_{rs}(\omega)}{\psi_r(\omega)} \quad (4.5)$$

où $\psi_r(\omega)$ est la densité spectrale de puissance des accélérations enregistrées au rocher de référence et $\psi_{rs}(\omega)$ est la densité inter-spectrale de puissance entre les accélérations enregistrées en surface libre et au rocher de référence.

4.3.2. Modèles théoriques

Dans cette thèse, quatre modèles de profils de sols sont utilisés pour évaluer la fonction de transfert théorique :

- une couche homogène équivalente,
- plusieurs couches homogènes stratifiées horizontalement,
- une couche non-homogène dont le module de cisaillement augmente avec la profondeur,
- une couche non-homogène à paramètres aléatoires.

4.3.2.1. Une couche homogène équivalente

Ce modèle, initié par Şafak, permet d'exprimer la fonction de transfert en fonction des caractéristiques d'une couche homogène d'épaisseur h et de comportement viscoélastique

linéaire, surmontant un semi-espace représentant le substratum rocheux (**Fig. 4.3**). Cette couche est supposée équivalente au profil de sol du site considéré.

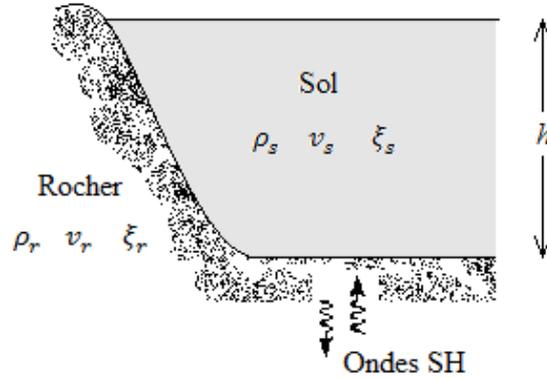


Fig. 4.3. Une couche de sol surmontant un substratum rocheux soumise à la propagation verticale des ondes de cisaillement.

En se référant aux résultats contenus dans l'article de Şafak [[Şafak, 1995](#)], les fonctions de transferts sol/substratum rocheux, $T_m^{ss}(\omega)$, et sol/affleurement rocheux, $T_m^{sa}(\omega)$, sont données par les équations suivantes :

$$T_m^{ss}(\omega) = \frac{(1 + r - i\xi_s)e^{-i\omega\tau_s(1-2i\xi_s)}}{1 + (r - i\xi_s)e^{-2i\omega\tau_s(1-2i\xi_s)}} \quad (4.6)$$

et

$$T_m^{sa}(\omega) = \frac{(1 + r - i\xi_s)[1 - i\xi_r e^{-2i\omega\tau_r(1-2i\xi_r)}]e^{-i\omega(\tau_s - 2i\tau_s\xi_s - \tau_r + 2i\tau_r\xi_r)}}{(1 - i\xi_r)[1 + (r - i\xi_s)e^{-2i\omega\tau_s(1-2i\xi_s)}} \quad (4.7)$$

avec

$$r = \frac{\rho_r v_r - \rho_s v_s}{\rho_r v_r + \rho_s v_s} \quad (4.8)$$

$$\tau_s = \frac{h}{v_s} \quad (4.9)$$

$$\tau_r = \frac{h}{v_r} \quad (4.10)$$

et inversement

$$h = \tau_r v_r \quad (4.11)$$

$$v_s = \frac{\tau_r v_r}{\tau_s} \quad (4.12)$$

$$\rho_s = \rho_r \frac{(1-r)\tau_s}{(1+r)\tau_r} \quad (4.13)$$

où ρ_s est la masse volumique du sol, ρ_r est la masse volumique de la roche, v_s est la vitesse des ondes de cisaillement dans le sol, v_r est la vitesse des ondes de cisaillement dans la roche, ξ_s est le coefficient d'amortissement du sol et ξ_r est le coefficient d'amortissement de la roche.

4.3.2.2. Sols stratifiés horizontalement

Cette approche a fourni la plupart des concepts utilisés pour l'évaluation théorique de l'amplification des sols sous l'hypothèse d'une propagation unidimensionnelle des ondes SH. Elle permet d'exprimer la fonction de transfert en fonction des caractéristiques d'un profil composé de n_l couches homogènes stratifiées horizontalement, et surmontant un semi-espace représentant le substratum rocheux (**Fig. 4.4**).

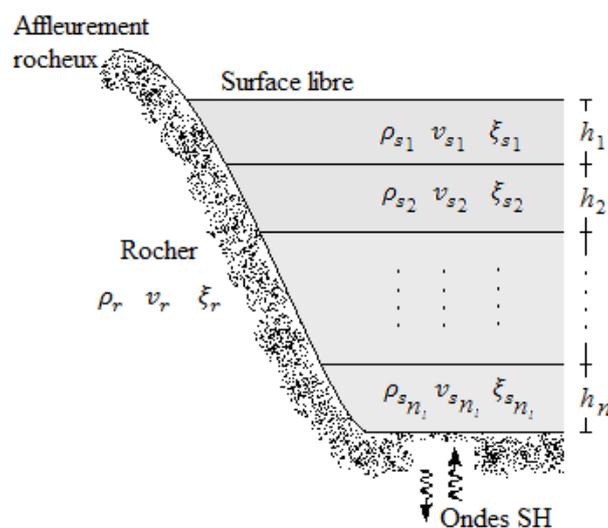


Fig. 4.4. Profil de sol stratifié horizontalement soumis à la propagation verticale des ondes de cisaillement.

Pour un comportement viscoélastique linéaire, chaque couche est caractérisée par son épaisseur h_j , sa masse volumique ρ_{sj} , son coefficient d'amortissement ξ_{sj} et la vitesse de propagation des ondes de cisaillement v_{sj} . Ces caractéristiques sont constantes dans chaque couche mais varient d'une couche à l'autre.

En se référant aux résultats contenus dans l'article de Harichane et al. [Harichane et al., 2005], les fonctions de transferts sol/substratum rocheux, $T_m^{ss}(\omega)$, et sol/affleurement rocheux, $T_m^{sa}(\omega)$, sont données par les équations suivantes :

$$T_m^{ss}(\omega) = \frac{2^{n_l+1}}{\sum A_{jk}} \quad j, k = 1, 2 \quad (4.14)$$

et

$$T_m^{sa}(\omega) = \frac{2^{n_l}}{\sum A_{1j}} \quad j = 1, 2 \quad (4.15)$$

où A_{jk} sont les composantes de la matrice carrée Λ :

$$\Lambda = \prod_{j=n_l}^1 \begin{bmatrix} (1 + q_j)e^{i\lambda_j h_j} & (1 - q_j)e^{-i\lambda_j h_j} \\ (1 - q_j)e^{i\lambda_j h_j} & (1 + q_j)e^{-i\lambda_j h_j} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

tel que $\lambda_j = \omega/v_{sj}^*$ est le nombre d'onde complexe de la couche j , $q_j = \rho_j v_{sj}^*/\rho_{j+1} v_{sj+1}^*$ est le rapport d'impédance complexe à l'interface entre les couches j et $j+1$, $v_{sj}^* = v_{sj} \sqrt{1 + 2i\xi_j}$ est la vitesse de cisaillement complexe de la couche j et i est le nombre complexe ($i^2 = -1$).

Il est noté que, dans les équations précédentes, les caractéristiques correspondantes à la $(n_l + 1)^{\text{ème}}$ couche représente celles du substratum rocheux, soit : $\rho_{sn_l+1} = \rho_r$, $v_{sn_l+1} = v_r$,

$\xi_{sn_l+1} = \xi_r$ et $h_{n_l+1} = \infty$.

4.3.2.3. Une couche non-homogène avec un module de cisaillement variable

Plusieurs chercheurs ont étudié les sols non-homogènes avec un module de cisaillement variable avec la profondeur. Les expériences ont montré que cette variation est une puissance

de la profondeur. Les principales formules développées dans la littérature ont été récapitulées par Travararou et Gazetas [Travararou et al., 2004] dans le **tableau 4.1**, dans lesquelles G' et v' ($v' = \sqrt{G'/\rho_s}$) caractérisent les ampleurs, respectivement, du module de cisaillement et de la vitesse des ondes de cisaillement et p représente l'effet de la profondeur sur ces fonctions.

Tab. 4.1. Expressions du module de cisaillement et de la vitesse des ondes de cisaillement d'après plusieurs chercheurs.

Référence	Module du cisaillement	Vitesses des ondes de cisaillement
Dobry (1971)	$G(z) = G'z^p$	$v_s(z) = v'z^{p/2}$
Gazetas(1982)	$G(z) = G'(1 + \mu z)^p$	$v_s(z) = v'(1 + \mu z)^{p/2}$
Towhata (1996)	$G(z) = G'(z + z_0)^p$	$v_s(z) = v'(z + z_0)^{p/2}$

Dans ce cas, il est noté que la masse volumique de la couche de sol peut être supposée constante puisque sa plage de variation est faible par rapport à la plage de variation du module de cisaillement (ou éventuellement la vitesse des ondes de cisaillement).

Dobry et al. [Dobry et al., 1971] ont montré que dans certaines conditions le module de cisaillement peut être nul à la surface libre ($z = 0$) avec une puissance variable qui prend des valeurs dans l'intervalle $[0,1]$. Cette formulation a été utilisé par plusieurs chercheurs dans l'évaluation de la réponse sismique de sites [Hadid et al., 2000 ; Afra et al., 2002].

Ultérieurement, Gazetas [Gazetas, 1982] a proposé une formule avec un module de cisaillement non nul à la surface libre. Ce dernier, a étudié l'effet des paramètres d'hétérogénéités (μ et p) sur la réponse dynamique d'un profil de sol avec une vitesse $v_s(z)$ augmentant d'une valeur non-nulle à la surface libre ($v_s(z = 0) = v'$) et une puissance prenant les valeurs 2, 4/3, 1 et 1/2.

Plus tard, Towhata [Towhata, 1996] a généralisé les études précédentes en proposant une formule avec un module de cisaillement non nul à la surface libre et une puissance non-limité en valeurs.

Dans cette thèse, nous nous intéressons, uniquement, à la formulation de Towhata. Donc, pour une couche non-homogène d'épaisseur h et surmontant un semi-espace représentant le substratum rocheux (Fig. 4.5), la fonction de transfert prendra trois expressions selon la valeur de $(p - 2)$, telle que présenté dans l'article original de Towhata [Towhata, 1996].

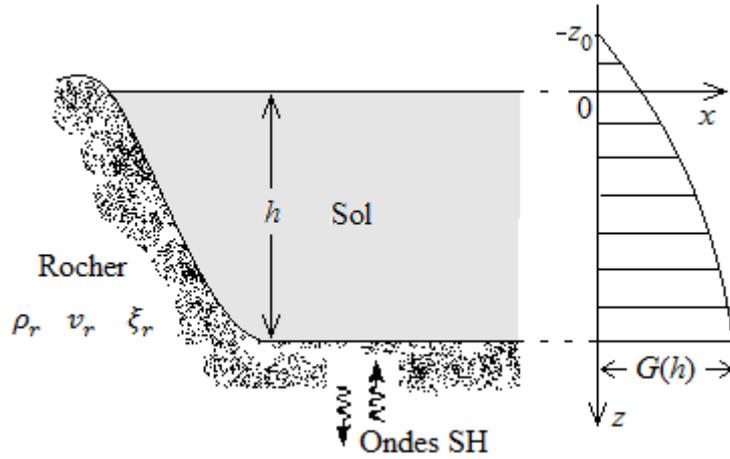


Fig. 4.5. Une couche de sol non-homogène soumise à la propagation verticale des ondes de cisaillement et la distribution du module de cisaillement avec la profondeur.

Les fonctions de transferts sol/substratum rocheux, $T_m^{ss}(\omega)$, et sol/affleurement rocheux, $T_m^{sa}(\omega)$, sont données par les équations suivantes :

1. Si $(p - 2) < 0$:

$$T_m^{ss}(\omega) = \frac{\frac{p-2}{\pi} \cdot \sqrt{1 + \frac{h}{z_0}}}{\left[Y_\eta(\beta_0) J_\eta(\beta_h) - J_\eta(\beta_0) Y_\eta(\beta_h) \right] - \frac{2-p}{2} \beta_h \left[Y_\eta(\beta_0) J_{\eta+1}(\beta_h) - J_\eta(\beta_0) Y_{\eta+1}(\beta_h) \right]} \quad (4.17)$$

et

$$T_m^{sa}(\omega) = \frac{\frac{p-2}{\pi} \cdot \sqrt{1 + \frac{h}{z_0}}}{\left[1 + iq' \frac{\omega}{v'} (h + z_0)\right] \left[Y_\eta(\beta_0)J_\eta(\beta_h) - J_\eta(\beta_0)Y_\eta(\beta_h)\right]} \quad (4.18)$$

$$-\frac{2-p}{2} \beta_h \left[Y_\eta(\beta_0)J_{\eta+1}(\beta_h) - J_\eta(\beta_0)Y_{\eta+1}(\beta_h)\right]$$

où $\beta_0 = \beta(z = 0)$ et $\beta_h = \beta(z = h)$, sachant que $\beta(z)$ est déterminée à l'aide de l'expression suivante :

$$\beta(z) = \frac{2}{2-p} \frac{\omega}{v'} (z + z_0)^{(2-p)/2} \quad (4.19)$$

et

$$\eta = \frac{1}{2-p} \quad (4.20)$$

$$q' = \frac{\rho_s v'}{\rho_r v_r} \quad (4.21)$$

2. Si $(p-2) = 0$:

$$T_m^{ss}(\omega) = \begin{cases} \frac{2\sqrt{\frac{D}{z_0}}}{\left(\frac{1}{2} + \sqrt{D}\right) z_0^{-\sqrt{D}} (h + z_0)^{-1/2 + \sqrt{D}}} & \text{pour } \omega < \frac{v'}{2} \\ -\frac{2\sqrt{1 + \frac{h}{z_0}}}{\left(\frac{1}{2} - \sqrt{D}\right) z_0^{\sqrt{D}} (h + z_0)^{-1/2 - \sqrt{D}}} & \text{pour } \omega = \frac{v'}{2} \\ \frac{\sqrt{-D} \sqrt{1 + \frac{h}{z_0}}}{\frac{1}{2} \sin \left[\sqrt{-D} \cdot \ln \left(1 + \frac{h}{z_0} \right) \right]} & \text{pour } \omega > \frac{v'}{2} \\ \frac{2\sqrt{1 + \frac{h}{z_0}}}{\ln \left(1 + \frac{h}{z_0} \right) + 2} & \text{pour } \omega > \frac{v'}{2} \\ \frac{+\sqrt{-D} \cdot \cos \left[\sqrt{-D} \cdot \ln \left(1 + \frac{h}{z_0} \right) \right]}{\frac{1}{2} \sin \left[\sqrt{-D} \cdot \ln \left(1 + \frac{h}{z_0} \right) \right]} & \text{pour } \omega > \frac{v'}{2} \end{cases} \quad (4.22)$$

et

$$T_m^{sa}(\omega) = \begin{cases} \frac{2\sqrt{\frac{D}{z_0}}}{\left(\frac{1}{2} + \sqrt{D}\right) z_0^{-\sqrt{D}} \cdot (h + z_0)^{-1/2 + \sqrt{D}} - \left(\frac{1}{2} - \sqrt{D}\right) z_0^{\sqrt{D}}} & \text{pour } \omega < \frac{v'}{2} \\ \frac{-z_0^{\sqrt{D}} (h + z_0)^{1/2 - \sqrt{D}}}{(h + z_0)^{-1/2 - \sqrt{D}} + iq' \frac{\omega}{v'} \left[z_0^{-\sqrt{D}} (h + z_0)^{1/2 + \sqrt{D}} \right]} & \text{pour } \omega = \frac{v'}{2} \\ \frac{2\sqrt{1 + \frac{h}{z_0}}}{\ln\left(1 + \frac{h}{z_0}\right) + 2iq' \frac{\omega}{v'} (h + z_0) \ln\left(1 + \frac{h}{z_0}\right)} & \text{pour } \omega > \frac{v'}{2} \\ \frac{\frac{1}{2} \sin\left[\sqrt{-D} \cdot \ln\left(1 + \frac{h}{z_0}\right)\right] + \sqrt{-D} \cdot \cos\left[\sqrt{-D} \cdot \ln\left(1 + \frac{h}{z_0}\right)\right]}{\ln\left(1 + \frac{h}{z_0}\right) + iq' \frac{\omega}{v'} (h + z_0) \sin\left[\sqrt{-D} \cdot \ln\left(1 + \frac{h}{z_0}\right)\right]} & \text{pour } \omega > \frac{v'}{2} \end{cases} \quad (4.23)$$

avec

$$D = (1 - 4\omega^2/v'^2)/4 \quad (4.24)$$

3. Si $(p - 2) > 0$:

$$T_m^{ss}(\omega) = \frac{\frac{p-2}{\pi} \cdot \frac{v'}{\omega} \cdot \frac{(h+z_0)^{(p-1)/2}}{z_0^{1/2}}}{Y_{-\eta}(-\beta_0) J_{1-\eta}(-\beta_h) - J_{-\eta}(-\beta_0) Y_{1-\eta}(-\beta_h)} \quad (4.25)$$

et

$$T_m^{sa}(\omega) = \frac{\frac{p-2}{\pi} \cdot \frac{v'}{\omega} \cdot \frac{(h+z_0)^{(p-1)/2}}{z_0^{1/2}}}{Y_{-\eta}(-\beta_0) \cdot J_{1-\eta}(-\beta_h) - J_{-\eta}(-\beta_0) \cdot Y_{1-\eta}(-\beta_h)} \quad (4.26)$$

$$+ iq' \sqrt{h + z_0} \left[Y_{-\eta}(-\beta_0) J_{-\eta}(-\beta_h) - J_{-\eta}(-\beta_0) Y_{-\eta}(-\beta_h) \right]$$

4.3.2.4. Une couche non-homogène à paramètres aléatoires

Ces dernières décennies, la recherche concernant la réponse des dépôts de sol à des excitations sismiques s'est orientée vers les techniques probabilistes, qui peuvent tenir compte de l'aspect aléatoire des caractéristiques du sol. En effet, négliger cet aspect aléatoire des propriétés du sol peut conduire à une sous-estimation de la sécurité des structures qui y sont implantées [Manolis, 2002].

Pour prendre en compte l'aspect aléatoire des paramètres du sol sur l'amplification du mouvement sismique, plusieurs approches sont proposées. Dans cette thèse, nous proposons d'utiliser une fonction de transfert qui s'exprime, analytiquement, à l'aide des valeurs moyennes des paramètres et de leurs incertitudes. Les variables considérées ici comme aléatoires sont : le module de cisaillement et la masse volumique.

En considérant une couche non-homogène d'épaisseur h , de comportement viscoélastique linéaire et surmontant un semi-espace représentant le substratum rocheux (Fig. 4.3), et en se référant aux résultats contenus dans l'article de Sadouki [Sadouki et al., 2012], la fonction de transfert sol/substratum rocheux, $T_m^{ss}(\omega)$, est donnée par l'équation suivante :

$$T_m^{ss}(\omega) = \sum_{j=1}^4 \frac{V(y_j)}{W'(y_j)} e^{y_j h} \quad (4.27)$$

où y_j ($j = 1, 2, 3, 4$) sont les racines du polynôme $D(y)$, tel que :

$$\begin{aligned} W(y) = & \left[1 - \frac{1}{(1 + 2i\xi_s)^2} \sigma_{22}^2 \right] y^4 + 2\zeta \left[1 - \frac{1}{(1 + 2i\xi_s)^2} \sigma_{22}^2 \right] y^3 \\ & + \left\{ \zeta^2 \left[1 - \frac{1}{(1 + 2i\xi_s)^2} \sigma_{22}^2 \right] + 2\lambda^2 \left[1 - \frac{1}{1 + 2i\xi_s} \sigma_{12}^2 \right] \right\} y^2 \\ & + 2\lambda^2 \zeta \left[1 - \frac{1}{1 + 2i\xi_s} \sigma_{12}^2 \right] y + \lambda^2 \zeta^2 + \lambda^4 (1 - \sigma_{11}^2) \end{aligned} \quad (4.28)$$

et $W'(y)$ est la dérivée de $W(y)$, et

$$\begin{aligned} V(y) = & \left[1 - \frac{1}{(1 + 2i\xi_s)^2} \sigma_{22}^2 \right] y^3 + 2\zeta \left[1 - \frac{1}{(1 + 2i\xi_s)^2} \sigma_{22}^2 \right] y^2 \\ & + \left\{ \zeta^2 \left[1 - \frac{1}{(1 + 2i\xi_s)^2} \sigma_{22}^2 \right] + \lambda^2 \left[1 - \frac{1}{1 + 2i\xi_s} \sigma_{12}^2 \right] \right\} y - \lambda^2 \zeta \frac{1}{1 + 2i\xi_s} \sigma_{11}^2 \end{aligned} \quad (4.29)$$

où ζ est la longueur de corrélation, ξ_s est le coefficient d'amortissement de la couche de sol, λ est le nombre d'ondes et σ_{11} , σ_{12} , σ_{22} représentent les coefficients de variance.

4.4. Formulation pour une identification simultanée de deux sites

Dans les précédents paragraphes, nous avons présenté différentes expressions permettant l'évaluation de la fonction d'amplification d'un site donné. Ces fonctions sont déterminées à partir de deux enregistrements sismiques, l'un enregistré en surface libre du site considéré et l'autre au rocher de référence (le substratum rocheux ou l'affleurement rocheux).

Dans ce paragraphe, nous proposons d'autres formulations qui permettront, dans cette thèse, l'identification simultanée des profils de sols de deux sites à partir de deux enregistrements sismiques en surface libre seulement. Ces formules sont obtenues en exprimant le rapport des fonctions d'amplifications, expérimentales ou théoriques, des deux sites.

La fonction obtenue est notée Γ_e lorsqu'elle est estimée expérimentalement et Γ_m lorsqu'elle est estimée théoriquement.

4.4.1. Formulation expérimentale

Considérons deux sites A et A' constitués de profils de sols reposant sur une base rocheuse commune (**Fig. 4.6**). Ces profils de sols peuvent différer pour chaque site.

Dans ce cas uniquement, la méthode du rapport spectral standard peut être utilisée, parce qu'elle permet de calculer la fonction d'amplification expérimentale en transformant les enregistrements accélérométriques, indépendamment, l'un de l'autre (ce qui n'est pas le cas avec la méthode du rapport inter-spectral).

En considérant que la distance entre les deux sites est très inférieure à la distance les séparant de la source, on peut supposer que les contenus fréquentiels des enregistrements sismiques aux bases rocheuses C et C' sont identiques, et que :

$$R'(\omega) = \alpha \cdot R(\omega) \quad (4.30)$$

où α est un coefficient de répartition qui se détermine expérimentalement, ou à partir des lois d'atténuation [Harichane, 2005].

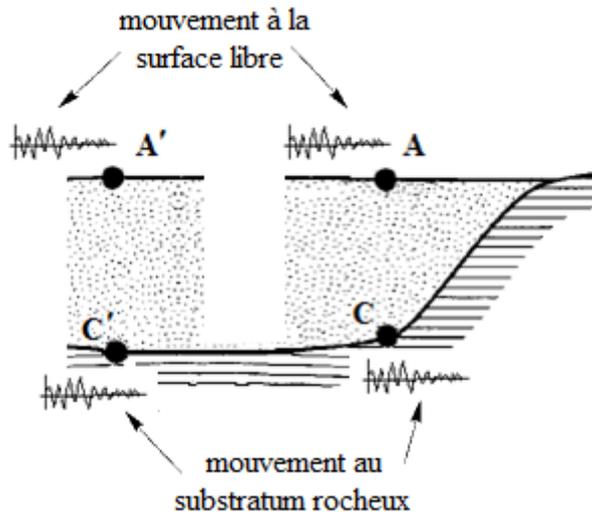


Fig. 4.6. Deux sites A et A' constitués de sols reposant sur un substratum rocheux commun.

Par conséquent, la fonction Γ_e peut être évaluée par :

$$\Gamma_e(\omega) = \alpha \frac{S(\omega)}{S'(\omega)} \quad (4.31)$$

Dans ce cas, aucun enregistrement accélérométrique, soit au niveau du substratum rocheux ou en affleurement rocheux, n'est nécessaire pour la procédure d'identification.

4.4.2. Formulation théorique

En considérant le rapport des fonctions de transfert des profils de sols des deux sites, la fonction Γ_m est évaluée par l'expression :

$$\Gamma_m(\omega) = \frac{T_m(\omega)}{T'_m(\omega)} \quad (4.32)$$

où $T_m(\omega)$ et $T'_m(\omega)$ sont les fonctions de transfert des profils de sols des deux sites et sont déterminées, selon le modèle choisi, par les équations présentées précédemment. Il est donc évident que Γ_m est fonction des caractéristiques des profils de sols des deux sites.

4.5. Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les différentes équations expérimentales et théoriques qui seront utilisées, par la suite, dans la procédure élaborée pour la caractérisation numérique de sites. Ces formules permettront, selon la technique et le modèle choisi, d'estimer la fonction d'amplification à partir de deux enregistrements sismiques.

Les méthodes expérimentales choisies consistent à estimer la fonction d'amplification en calculant le rapport des transformées de Fourier usuelles des composantes horizontales des accélérations enregistrées en surface libre et au site de référence. D'autre part, les méthodes théoriques proposées sont basées sur l'utilisation des fonctions de transferts. Quatre modèles sont traités dans ce travail.

Enfin, d'autres formules ont été proposées pour permettre, aussi, une identification simultanée des profils de sols de deux sites à partir de deux enregistrements sismiques en surface libre seulement.

On rappelle que les fonctions objectives utilisées dans la procédure élaborée dans cette thèse, sont exprimées par les différences entre plusieurs critères caractérisant les fonctions théorique et expérimentale choisies selon le cas étudié.

Applications et validations expérimentales

5.1. Introduction

L'objet de ce chapitre est de présenter des validations et des applications de la procédure d'identification décrite précédemment. Pour cela deux types d'exemples sont traités : l'un numérique et l'autre expérimental.

Le premier exemple est consacré à la validation numérique. Après une description du problème, la validité et l'efficacité numérique de la procédure élaborée sont testées et discutées. Dans cet exemple, le modèle d'une couche homogène équivalente est considéré.

Dans le second exemple, une validation expérimentale est présentée. Cet exemple, nécessite une coupe stratigraphique d'un sondage profond qui descend jusqu'au substratum rocheux et deux accélérogrammes enregistrés en surface libre et à l'interface entre le sol et le rocher. Cependant, à notre connaissance, aucun sondage descendant jusqu'au rocher accompagné d'enregistrements accélérométriques n'a été réalisé en Algérie auparavant. Pour cela, les données expérimentales enregistrées sur le site de Garner Valley (Etats-Unis) pendant la période 1989-1991 sont utilisées. Dans cet exemple, toutes les techniques et modèles discutés précédemment dans cette thèse sont utilisés afin de discuter des performances et limites de la procédure avec les spécificités de chaque cas.

En outre, il est rappelé que, dans tous les cas traités dans ce chapitre et le chapitre suivant, les calculs sont effectués sur un PC équipé d'un processeur Intel Core i3 à 2,10 GHz et 4 Go de mémoire vive (RAM) sous Windows.

5.2. Validation numérique

L'exemple proposé consiste à identifier les propriétés d'une couche homogène équivalente reposant sur un substratum rocheux. Dans ce cas, deux enregistrements sont considérés, l'un en surface libre et l'autre à l'interface entre la couche et le rocher. Ce modèle est choisi parce qu'il implique moins de paramètres inconnus dans le processus d'indentification que les autres modèles.

La première étape de cette application consiste à utiliser, successivement, les méthodes AG et LM afin de justifier l'utilisation de la méthode AGA ultérieurement. Ensuite, l'efficacité et les performances de la procédure élaborée avec les méthodes AGA et LM, sont examinées sous différents angles.

5.2.1. Description du problème

Dans cette application, l'optimisation est réalisée en minimisant les différences entre le module de la fonction de transfert théorique entre la surface libre et la base de la couche considérée et celle donnée par le modèle.

Pour ce faire, considérons une couche de sol reposant sur un substratum rocheux. Les caractéristiques de la couche de sol et celles de la roche sont données dans le [tableau 5.1](#).

Tab. 5.1. Propriétés d'une couche de sol homogène et du substratum rocheux.

Paramètre	h (m)	v_s (m/s)	ρ_s (kg/m ³)	ξ_s (%)
Sol	10	400	1600	4
Roche	-	1000	2200	0

Comme défini par l'Eq. (4.6), le nombre de paramètres identifiés est égal à trois et sont r , τ et ξ . Leurs valeurs exactes, seront recherchées par la procédure d'optimisation, sont calculées avec les Eqs. (4.8-10) et sont rassemblées dans le [tableau 5.2](#).

Tab. 5.2. Propriétés d'une couche de sol homogène équivalente.

Paramètre	r	$\tau_s (s)$	$\xi_s (\%)$
Valeur exacte	0,549	0,025	4,000

L'identification est exécutée avec le programme numérique "OptAGML" élaboré pour ce travail. Il fournit à la fois des résultats numériques et graphiques. En raison du caractère stochastique de la procédure, ce programme sera lancé plusieurs fois pour tester ses performances et la précision des résultats.

L'optimisation des paramètres est effectuée dans un espace de recherche comprenant, pour chaque paramètre, toutes les valeurs possibles, soit :

- 0 – 1 pour r ,
- 0 – 1 s pour τ_s ,
- 0 – 10 % pour ξ_s .

5.2.2. Sensibilité de l'optimisation aux opérateurs génétiques

Dans cette application, la procédure est appliquée au problème défini ci-dessus en se limitant à l'utilisation successive de la méthode AG et la méthode LM.

Ainsi, plusieurs tailles de population, nombre de générations et probabilités de croisement et de mutation sont testés. Dans chaque essai, la population initiale de la méthode AG est sélectionnée de manière aléatoire [Khellafi et al., 2015a].

Dans la méthode AG, les poids de pondération sont déterminés afin d'obtenir les meilleurs résultats. Les paramètres w_1 et w_2 sont indépendant et varient de 0 à 1, tandis que le troisième

pois est dépendant des deux précédents et est évalué avec la formule :

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1 \quad (5.1)$$

5.2.2.1. Analyse des résultats

La **figure 5.1** illustre les formes de la surface de la fitness en fonction de deux paramètres génétiques (tandis qu'à chaque cas, les autres paramètres sont considérés fixes), ce qui signifie que la surface de la fitness est représentée dans un espace 3D, étant donné que si plus de deux paramètres d'optimisation sont nécessaires, il est évidemment difficile de représenter la fonction graphiquement.

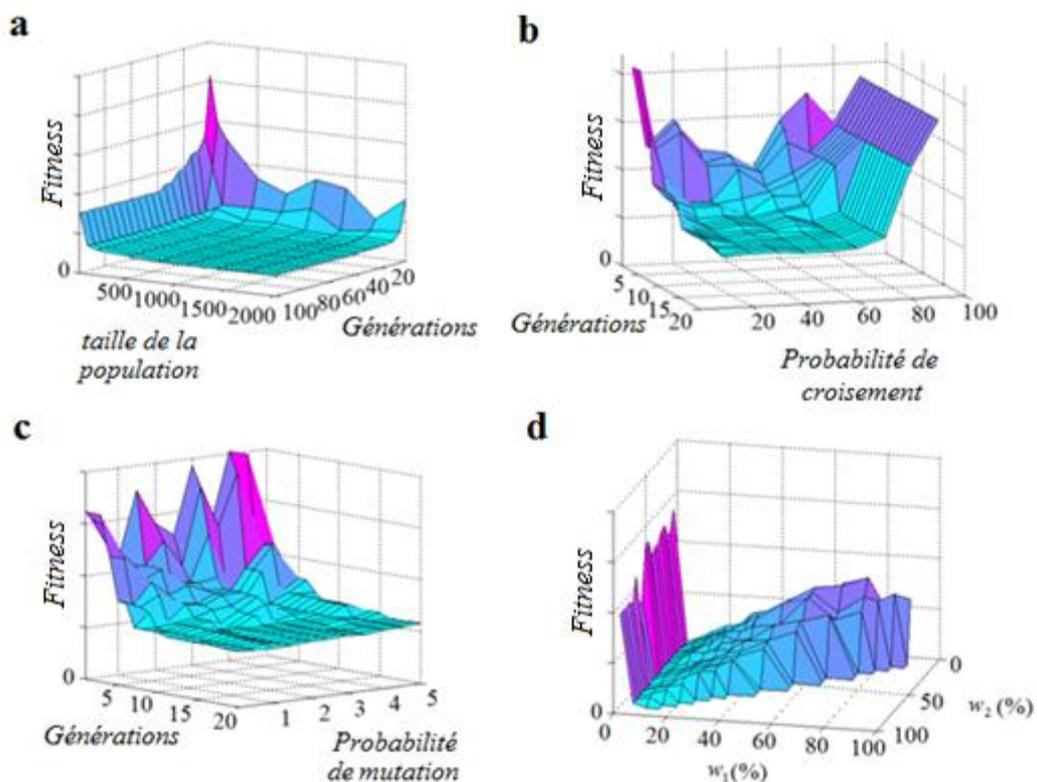


Fig. 5.1. Topologie de la fitness sur l'espace de recherche : (a) par rapport à la taille de la population et le nombre de générations, (b) par rapport à la probabilité de croisement et le nombre de générations, (c) par rapport à la probabilité de mutation et le nombre de générations, (d) par rapport aux poids de pondération w_1 et w_2 .

La **figure 5.1a** montre qu'une augmentation simultanée de la taille de la population et du nombre de générations améliorent, considérablement, les performances de la méthode AG. Ainsi, une population de 800 individus retrouve la solution optimale après 58 générations, tandis qu'une population de 1400 individus retrouve la solution optimale après seulement 16 générations.

La **figure 5.1b** montre que la procédure d'identification est très sensible à l'opération de croisement. Ainsi, lorsque la probabilité de croisement varie entre 20 à 60 %, la solution optimale peut être obtenue après 16 générations seulement. En dehors de cet intervalle, les valeurs optimales augmentent considérablement et perturbent fortement le processus d'identification et peut conduire à des résultats erronés.

Pareillement, la **figure 5.1c** montre que l'opération de mutation est très perturbatrice, surtout lorsque le nombre de générations est inférieur à 16. Au-delà, les valeurs optimales résultantes de l'optimisation sont plutôt stables.

Enfin, la **figure 5.1d** montre que la procédure d'identification est très sensible aux valeurs des poids de pondération. La figure montre une augmentation marquante dans le sens de l'augmentation de w_1 , avec des valeurs minimales observées pour $w_1 = 5\%$, tandis que la variation est plutôt constante vis-à-vis de la variation de w_2 .

Par conséquent, la méthode AG est très sensible aux valeurs des probabilités de croisement et mutation, et des poids de pondération, et seule une augmentation simultanée de la taille de la population et du nombre de générations pourrait améliorer la convergence vers la solution voulue. Cependant, il est clair que ces augmentations augmentent, considérablement, le temps de calcul. En effet, la procédure nécessite quelques minutes à plusieurs heures pour atteindre son objectif.

Ces constatations justifient donc le recours à l'utilisation d'un algorithme génétique adaptatif (AGA) qui stabilisera la procédure d'optimisation plus efficacement, en un moins de temps de calcul.

5.2.3. Efficacité de l'algorithme génétique adaptatif

Ici, la procédure est lancée en utilisant les méthodes AGA et LM successivement. Les valeurs

des différents opérateurs d'AGA sont regroupées dans le [tableau 5.3](#). Les poids de pondération w_j sont déterminés et ajustés en fonction des valeurs extrêmes de la fonction objectif de chaque génération, comme expliqué précédemment (voir [paragraphe 3.4.2.5](#)).

Tab. 5.3. Valeurs des différents opérateurs de l'algorithme génétique adaptatif.

Taille de la population initiale	500	Taux de croissance initial de la population	0,1
Taille minimale de la population	20	probabilité de sélection initiale	0,5
Taille maximale de la population	2000	probabilité de croisement initiale	0,7
Nombre de génération maximal	500	probabilité de la mutation initiale	0,01

En raison du caractère stochastique de la procédure, trois essais indépendants sont réalisés et analysés afin de vérifier la convergence et la précision des résultats. La phase d'optimisation par AGA se termine lorsque le nombre de générations, sans amélioration de la solution, dépasse la valeur $n_e = 10$ générations. La phase d'optimisation par LM s'achève lorsque :

$$|f_1(\mathbf{x}^{(j+1)}, \omega) - f_1(\mathbf{x}^{(j)}, \omega)| \leq 10^{-4} \quad (5.2)$$

5.2.3.1. Analyse des résultats

En général, les exécutions multiples du programme "OptAGML" ont montré que le processus d'optimisation fonctionne de façon satisfaisante, et conduit à la même solution optimale au bout de 40 à 50 minutes. Les résultats de l'identification sont donnés dans le [tableau 5.4](#). La comparaison de ces valeurs avec ceux du [tableau 5.2](#) montre que les valeurs exactes et identifiées sont quasiment identiques.

Tab. 5.4. Propriétés d'une couche de sol homogène équivalente.

Paramètre	r	τ_s (s)	ξ_s (%)
Valeur identifiées	0,551	0,025	3,910

Les valeurs des caractéristiques de la couche équivalente, correspondant aux valeurs des paramètres identifiés sont déterminées avec les [Eqs. \(4.11-13\)](#) et sont données dans le [tableau 5.5](#).

Tab. 5.5. Valeurs identifiées des propriétés de la couche de sol homogène équivalente.

Paramètre	h (m)	v_s (m/s)	ρ_s (kg/m ³)	ξ_s (%)
Sol	10	400	1592	3,91

La [figure 5.2](#) présente l'évolution de la fitness dans les trois essais en fonction du nombre d'itérations lors du processus d'optimisation. Elle montre que la procédure nécessite pratiquement 35 à 45 générations AGA et 4 à 11 itérations LM pour affiner la solution.

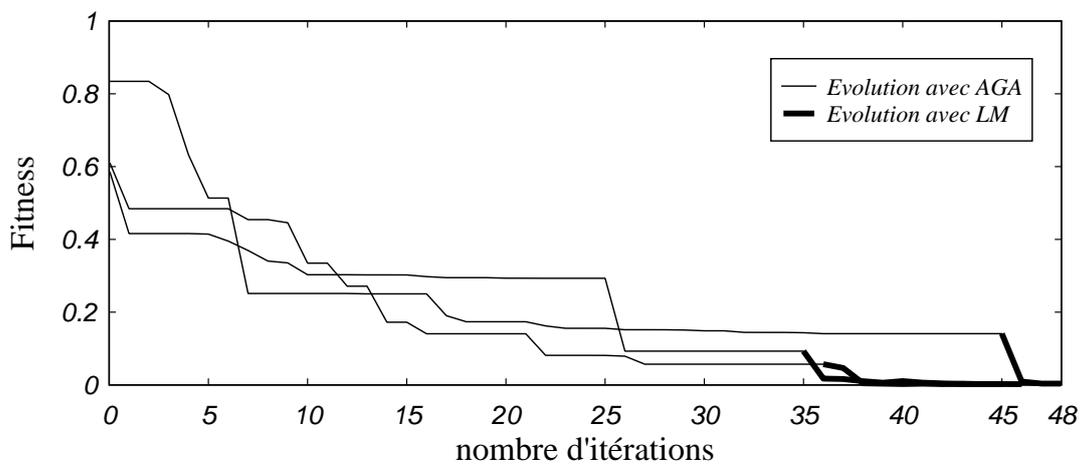


Fig. 5.2. Courbes de convergence de trois essais indépendants.

La [figure 5.3](#) montre l'évolution de la population des générations successives au cours du premier essai lors de l'identification des paramètres du modèle. Au cours des générations, les individus de la population se rapprochent sans cesse vers la solution optimale.

Les fonctions d'amplifications correspondantes aux courbes calculées avec l'[Eq. \(4.6\)](#) et les

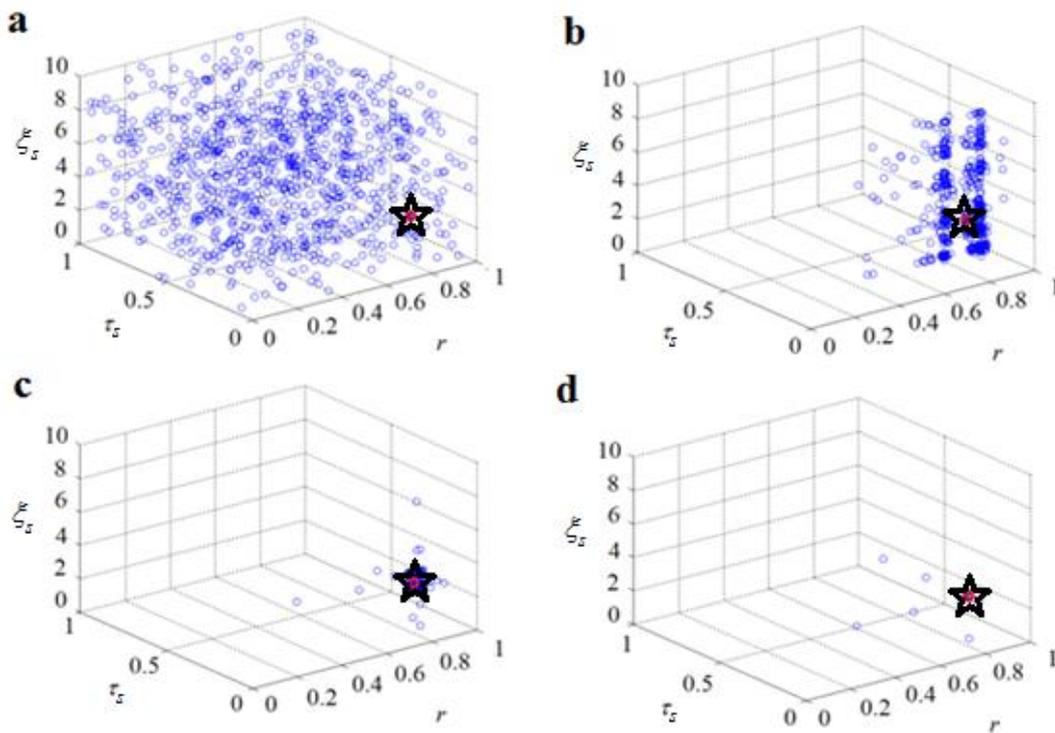


Fig. 5.3. Evolution de la population dans la phase d'optimisation par la méthode d'algorithme génétique adaptatif : chaque point désigné par \circ représente un individu dans l'espace des paramètres; le point désigné par \star représente la solution finale: (a) distribution de la population initiale, (b) distribution de la 10^{ème} génération de population, (c) distribution de la 17^{ème} génération, (d) distribution de la 30^{ème} génération.

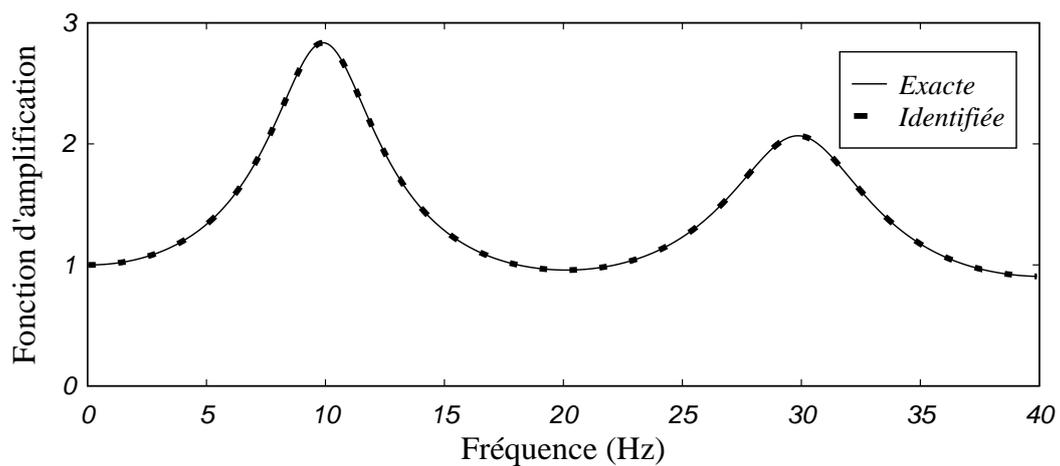


Fig. 5.4. Comparaison des fonctions d'amplification exacte et identifiée de la couche homogène équivalente.

paramètres exactes ([tableau 5.1](#)) et les paramètres identifiés ([tableau 5.5](#)), sont comparées dans la [figure 5.4](#). Cette dernière montre une très bonne concordance entre les fonctions d'amplification identifiée et exacte.

Par conséquent, pour le simple cas traité ici, cette procédure fonctionne bien avec AGA et permet d'atteindre la solution espérée en toute garantie, et en moins de temps de calcul.

5.2.4. Sensibilité par rapport aux paramètres optimisés

Dans ce paragraphe, une analyse de sensibilité de la fonction objectif $f_1(\mathbf{x})$ par rapport aux variations des valeurs des paramètres optimisés autour de leurs valeurs optimales, comme expliqué dans le [paragraphe 3.5](#), est présentée.

5.2.4.1. Analyse des résultats

Les valeurs des coefficients de variation sont indiquées dans le [tableau 5.6](#) tandis que les coefficients d'interaction entre les divers paramètres sont donnés dans le [tableau 5.7](#).

Il est noté, que les coefficients de variation sont obtenus après normalisation des termes diagonaux de la matrice \mathbf{C} , en les multipliant par le carré de la valeur optimale du paramètre correspondant. Ainsi, la sensibilité de la fonction $\Delta f_1(\mathbf{x})$ par rapport à chaque paramètre peut être lue directement sans avoir besoin des valeurs de ces paramètres.

Tab. 5.6. Valeurs des coefficients de variation et la sensibilité de la fonction optimisée.

Paramètre	Valeur identifiée	Coefficient de variation	$\Delta f_1(\mathbf{x})$
h (m)	10	$\pm 0,0056$	38,21
v_s (m/s)	400	$\pm 0,0172$	36,95
ρ_s (kg/m ³)	1592	$\pm 0,0491$	27,49
ξ_s (%)	3,91	$\pm 0,0082$	3,26

Tab. 5.7. Valeurs des coefficients d'interaction entre les différents paramètres optimisés.

Paramètre	h	v_s	ρ_s	ξ_s
h	-1	0,257	-0,112	0,071
v_s		-1	0,306	-0,059
ρ_s			-1	0,054
ξ_s				-1

D'après le **tableau 5.6**, on remarque qu'une variation relative de $\varepsilon \%$ dans la valeur de ξ_s produit une variation de $\Delta f_1(\mathbf{x})$ égale à $3,26\varepsilon^2$, tandis que la même variation $\varepsilon \%$ dans les valeurs des autres paramètres produit une variation de $\Delta f_1(\mathbf{x})$ allant de 27,49 à $38,21\varepsilon^2$.

Cette grande différence s'explique par le fait que la fonction $\Delta f_1(\mathbf{x})$ est moins sensible aux valeurs de ξ_s qu'aux valeurs des autres paramètres. Par conséquent, les paramètres h , v_s et ρ_s sont mieux estimés que ξ_s .

D'après le **tableau 5.7**, on remarque que l'interaction entre ξ_s et les autres paramètres n'est pas très importante. Donc, une erreur d'estimation commise sur ξ_s induira une faible erreur d'estimation sur les autres paramètres.

Par contre, l'interaction entre h , v_s et ρ_s (surtout entre les deux derniers) est importante. Donc, une erreur d'estimation commise sur l'un d'eux produira des erreurs d'estimation significative sur les autres.

5.3. Validation expérimentale

Ici, la procédure d'identification est validée sur un cas réel. Les données expérimentales enregistrées sur le site de Garner Valley en Californie (Etats-Unis) pendant la période 1989-1991 sont utilisées [Steidl et al., 1998 ; Pecker et al., 1991 ; Harichane et al., 2005].

5.3.1. Présentation du site de Garner Valley

Le site de Garner Valley Downhole Array (GVDA) se trouve dans une zone de forte sismicité environ 7 km à l'est de la faille de San Jacinto, au sud de la Californie (Fig 5.5). Le GVDA est composé de cinq stations accélérométriques à trois composants, avec une à la surface libre (0 m) et quatre en profondeurs : 6, 15, 22 et 220 m sous le niveau de la surface.

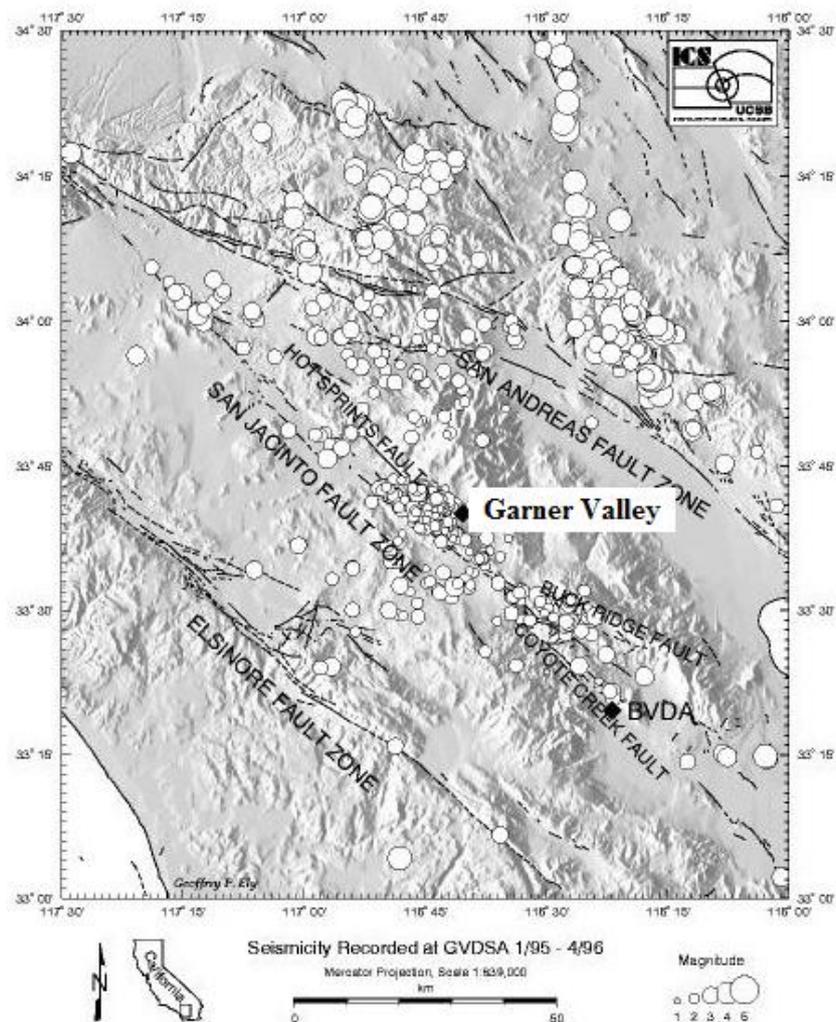


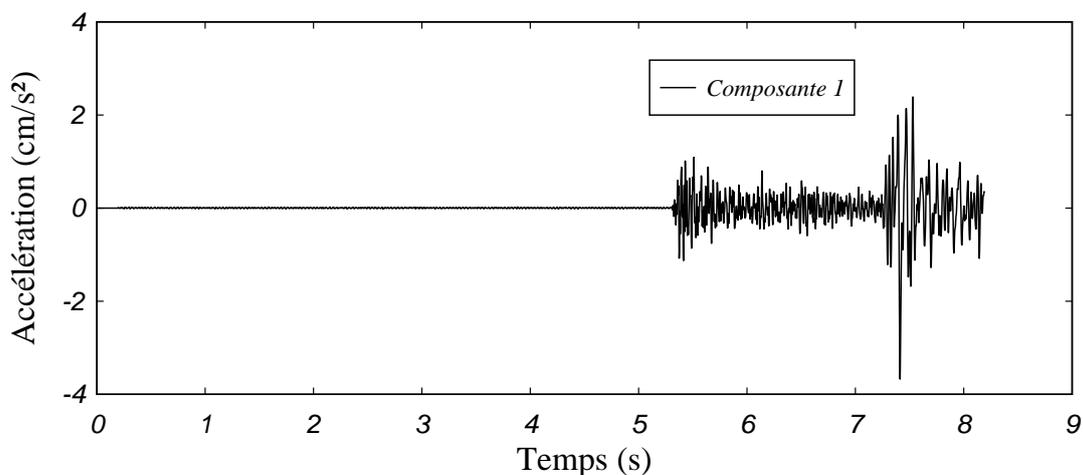
Fig. 5.5. Situation du site de Garner Valley et l'activité sismique de la région [Bonilla et al., 2002].

Le sous-sol du site est formé d'alluvions d'épaisseur 22 m d'épaisseur surmontant un substratum rocheux. Les caractéristiques des différentes couches constituant ce profil sont données dans le [tableau 5.8](#).

Tab. 5.8. Propriétés du profil de sol du site de Garner Valley [Pecker et al., 1991 ; Harichane et al., 2005].

N° de la couche	h (m)	v_s (m/s)	ρ_s (kg/m ³)	ξ_s (%)
1	1	90	1950	2
2	1	130	1950	2
3	2	165	2000	2
4	2	190	2000	2
5	2	215	2000	4
6	3,5	240	2000	1
7	3,5	260	2000	1
8	3	280	2050	1
9	4	600	2200	1
Rocher	-	2000	2400	0

Les accélérogrammes correspondants à un séisme de faible magnitude ($M_L=2,5$) sont choisis pour le processus d'identification. Ces grandeurs correspondent, en génie parasismique, à des mouvements faibles ce qui nous permet d'effectuer une analyse significative et convainquante de ce problème en considérant un modèle de sol linéaire élastique. Les accélérations enregistrées à la surface libre (0 m) et à 22 m de profondeur sont présentées dans les **figures 5.6** et **5.7**, respectivement.

**Fig. 5.6.** Accélérations enregistrées à la surface libre du site de Garner Valley [Harichane et al., 2005].

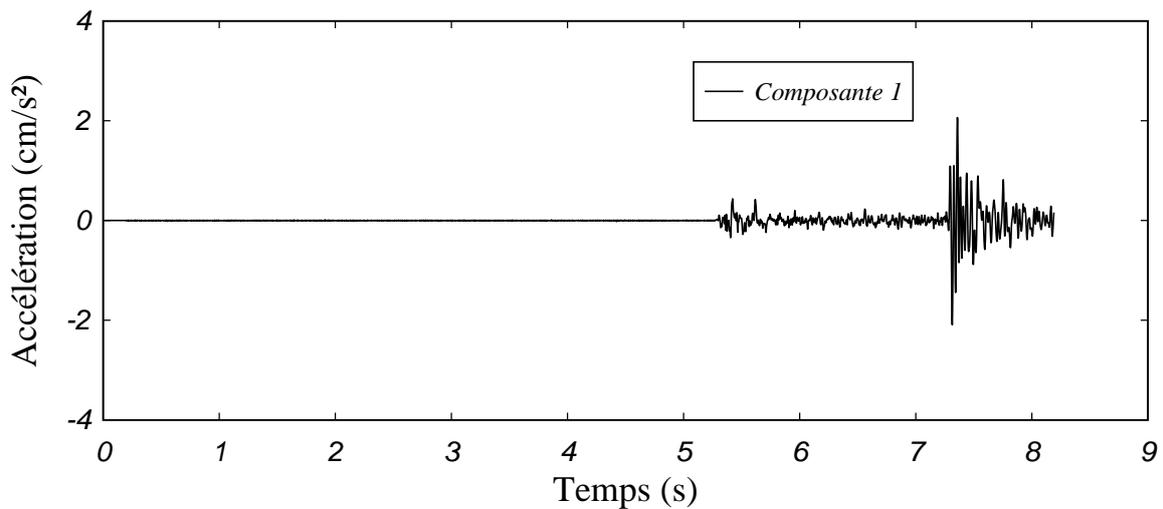


Fig. 5.7. Accélérations enregistrées à 22 m de profondeur du site de Garner Valley [Harichane et al., 2005].

La fonction d'amplification expérimentale entre la surface libre et le rocher est obtenue en appliquant sur les deux accélérogrammes précédents les deux méthodes :

- rapport spectrale standard (RSS) lissé avec une fenêtre triangulaire de 0,5 Hz de largeur [Nie et al., 2007],
- rapport inter-spectrale (RIS),

Les transformées de Fourier sont calculées avec les fonctions FFT et IFFT, en découpant l'enregistrement en morceaux de 4096 échantillons.

La **figure 5.8** montre les courbes résultantes pour des fréquences variant entre 0 et 20 Hz. La comparaison des courbes présentent des fréquences naturelles très proches et des pics d'amplification différents, notamment ceux correspondant à la troisième et la quatrième fréquence naturelle.

5.3.2. Description du problème

Le processus d'identification est effectué comme précédemment dans la validation numérique. A cause du caractère stochastique de la procédure testée, le processus sera lancé plusieurs fois dans le même espace de recherche qui sera défini, ultérieurement, pour chaque cas. La seule différence concerne la population initiale qui est générée, chaque test, de façon

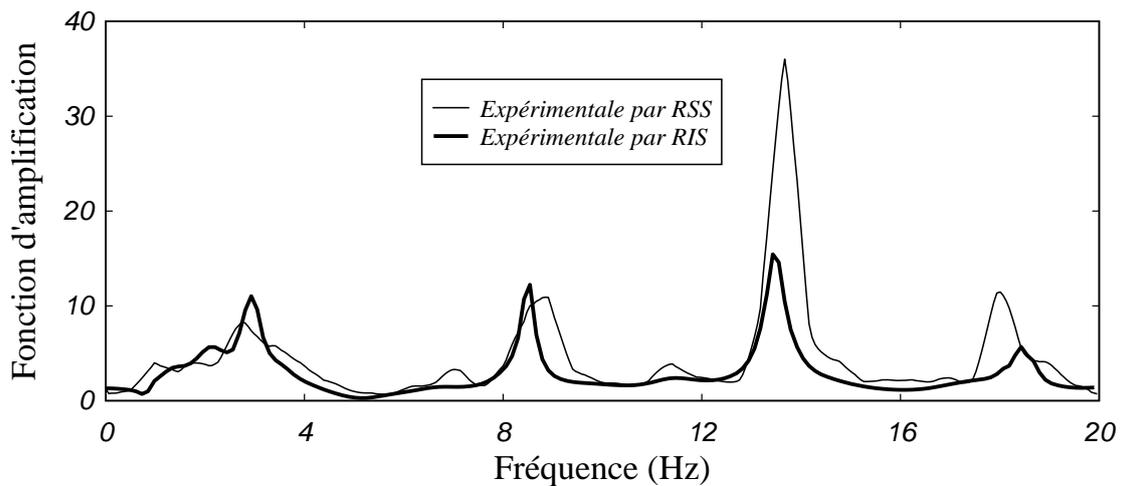


Fig. 5.8. Comparaison entre les fonctions d'amplification expérimentales du profil de sols du site de Garner Valley, calculées avec les méthodes du rapport spectral standard et du rapport inter-spectral.

aléatoire et indépendamment des autres tests.

Dans chaque test, un modèle est choisi. Les fonctions d'amplifications théoriques (FAT) sont calculées comme décrit dans le chapitre précédent. La fonction d'amplification expérimentale (FAE) est calculée par les méthodes RSS et RIS.

Les paramètres caractérisant les différents opérateurs d'AGA, les poids w_j et le critère d'arrêt sont identiques à ceux utilisés dans le [paragraphe 5.2.3](#).

5.3.3. Identification des propriétés d'une couche homogène équivalente

La procédure est appliquée pour identifier les paramètres d'une couche homogène équivalente (modèle 1) correspondant à la meilleure concordance entre les données théorique et expérimentale. Dans ce cas, la FAT est calculée avec l'[Eq. \(4.6\)](#). Les paramètres optimisées sont : r , τ_s et ξ_s .

L'optimisation est effectuée dans l'espace défini par les intervalles:

- 0 – 1 pour r ,

- 0 – 1 s pour τ_s ,
- 0 – 10 % pour ξ_s .

Les valeurs des paramètres physiques de la couche équivalente, correspondant aux valeurs des paramètres identifiés sont déduites avec les [Eqs. \(4.12-13\)](#), en considérant h comme connu et égal à 22 m.

5.3.3.1. Analyse des résultats

Globalement, la procédure fonctionne bien, et un nombre modéré de générations avec AGA (41 à 56) et quelques itérations avec LM (6 à 13) sont nécessaires pour converger vers la solution optimale.

Les valeurs obtenues sont reportées dans le [tableau 5.9](#) et sont comparées aux valeurs moyennes pondérées par les épaisseurs des couches (calculées à partir des valeurs expérimentales données dans le [tableau 5.8](#)).

Tab. 5.9. Comparaison entre les valeurs moyennes pondérées et les valeurs identifiées d'une couche homogène équivalente du site de Garner Valley.

Paramètres	Valeurs moyennes pondérées expérimentales	Valeurs identifiées avec la RSS	Valeurs identifiées avec la RIS
r	0,782	0,791	0,802
τ_s (s)	0,076	0,078	0,081
ξ_s (%)	1,545	1,323	1,117
v_s (m/s)	289	282	272
ρ_s (kg/m ³)	2039	1986	1942

Une bonne concordance est observée entre les valeurs moyennes pondérées et les valeurs identifiées de r , τ_s et v_s tandis que les valeurs de ξ_s et ρ_s sont peu différentes.

Dans les [figures 5.9](#) et [5.10](#), on compare la FAT calculée avec les valeurs moyennes pondérées, la FAT issue de l'identification et les FAE calculées par RSS et RIS,

respectivement, pour un intervalle de fréquences compris entre 0 et 20 Hz.

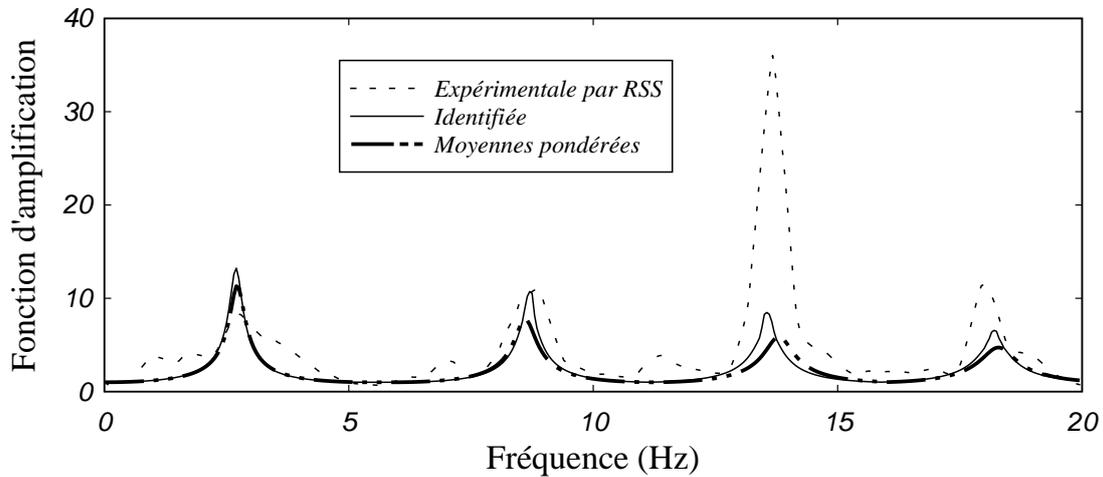


Fig. 5.9. Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport spectral standard, la fonction d'amplification théorique calculée avec les valeurs moyennes pondérées et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification du modèle 1 du profil du site de Garner Valley.

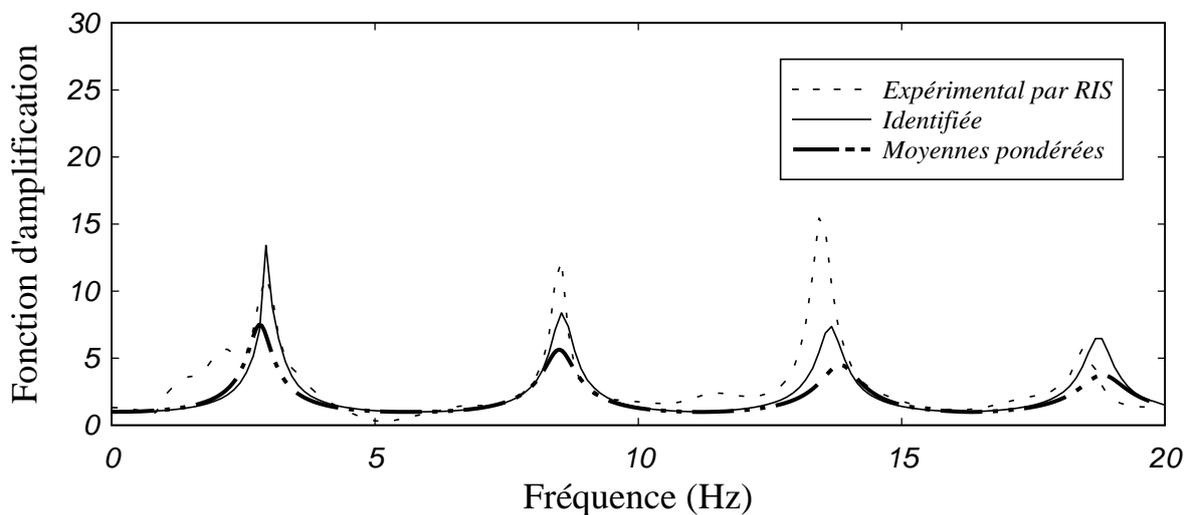


Fig. 5.10. Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport inter-spectral, la fonction d'amplification théorique calculée avec les valeurs moyennes pondérées et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification, du modèle 1 du profil du site de Garner Valley.

L'examen des **figures 5.9** et **5.10** montre une bonne concordance entre les fréquences naturelles mesurées et calculées, mais pas pour tous les pics d'amplifications correspondants. Ailleurs, les courbes obtenues sont proches les unes des autres. Ceci peut être expliqué par le fait que, théoriquement, et pour une seule couche, les pics d'amplifications doivent diminuer avec la fréquence [**Şafak, 1991**], au moment où les courbes obtenues par les méthodes RSS et RIS ne le sont pas. Malgré cela, notre procédure fournit de bonnes estimations des valeurs moyennes.

5.3.4. Identification des propriétés d'un profil de sol stratifié horizontalement

La procédure est appliquée pour identifier les paramètres d'un profil de sol composé de n_l couches homogènes stratifiées horizontalement (modèle 2). Chaque couche est caractérisée par quatre paramètres, soit h_j , ρ_{sj} , v_{sj} et ξ_{sj} ($j = 1, 2, \dots, n_l$). La FAT est calculée avec l'**Eq. (4.14)**.

L'optimisation est effectuée dans l'espace de recherche comprenant, pour chaque paramètre, toutes les valeurs possibles, soit :

- 0 – 50 m pour h_j ,
- 1000 – 2500 kg/m^3 pour ρ_{sj} ,
- 200 – 800 m/s pour v_{sj} ,
- 0 – 10 % pour ξ_{sj} .

Dans cette application, on supposera aussi que le nombre de couches est inconnu.

5.3.4.1. Analyse des résultats

Dans tous les tests, la procédure fonctionne bien, sans être perturbée par l'expansion de la taille de l'espace de recherche. En effet, un nombre modéré de générations AGA (69 à 87) et quelques d'itérations LM (5 à 12) ont suffi pour atteindre la solution.

Lorsque n_l est inconnu, le nombre total de paramètres optimisés est variable et est égale à $4n_l+1$. Dans ce cas, l'optimisation est réalisée en plusieurs étapes successives où, à chaque

étape (k), la procédure est exécutée avec une valeur fixe de $n_l = k$. (k varie de 1 à 12).

Afin d'apporter une meilleure convergence vers la solution optimale, le passage d'une étape (k) à la suivante ($k+1$) est contrôlé par une condition de transition qui minimise la différence entre les moyennes pondérées des vitesses v_{sj} du profil déjà identifié (k), et le profil en cours d'identification ($k+1$), soit :

$$\min \left| \bar{v}_s^{(k+1)} - \bar{v}_s^{(k)} \right| \quad (5.3)$$

avec

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{j=1}^k h_j}{\sum_{j=1}^k \frac{h_j}{v_{sj}}} \quad (5.4)$$

Ce processus se justifie par le fait, que cette procédure a montré, avec le modèle 1, qu'elle fournit de bonnes estimations des valeurs moyennes. Ainsi, lorsqu'on commence le processus par l'identification des paramètres d'une seule couche ($k = 1$), on obtient de bonnes estimations initiales. Ensuite, le processus est guidé par cette vitesse moyenne, actualisée après chaque étape (k), afin d'éviter à la procédure de s'éloigner après chaque étape de la valeur moyenne obtenue dans la première étape ($k = 1$).

La **figure 5.11** présente la variation de la valeur finale de la fitness en fonction du nombre de couches considéré. On constate qu'à partir d'un certain nombre de couches ($n_l = 4$), la valeur des fitness finales se stabilise.

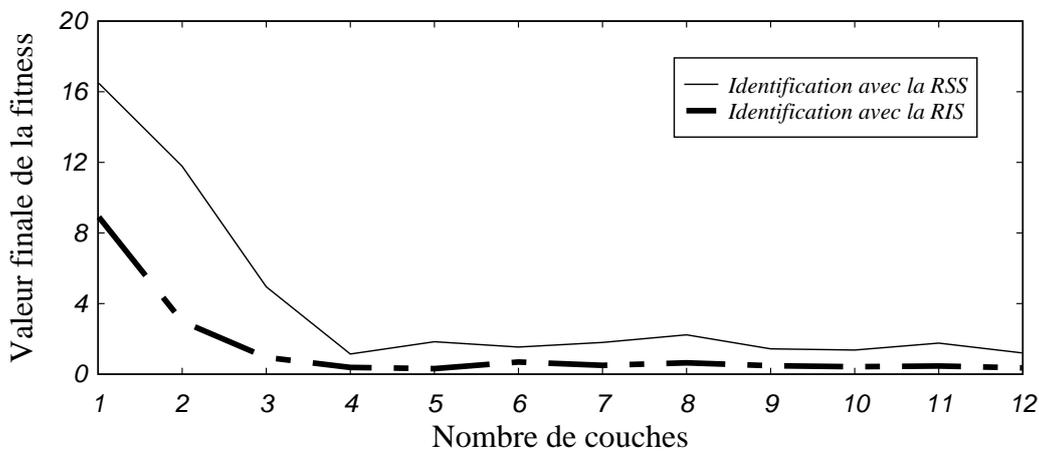


Fig. 5.11. Evolution de la valeur minimale de la fitness en fonction du nombre de couches considéré en chaque étape d'optimisation.

La comparaison entre les FAE calculées par la RSS et la RIS, la FAT calculée avec les valeurs moyennes pondérées et les différentes FAT issues de l'identification pour plusieurs couches sont représentées dans les [figures 5.12](#) et [5.13](#).

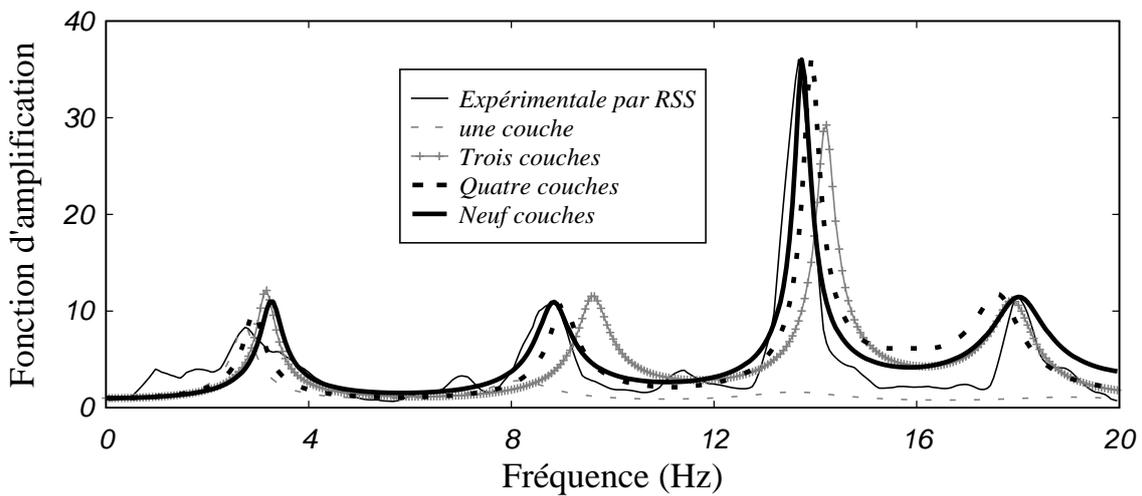


Fig. 5.12. Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport spectral standard, la fonction d'amplification théorique calculée avec les valeurs moyennes pondérées et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification du modèle 2 du profil du site de Garner Valley.

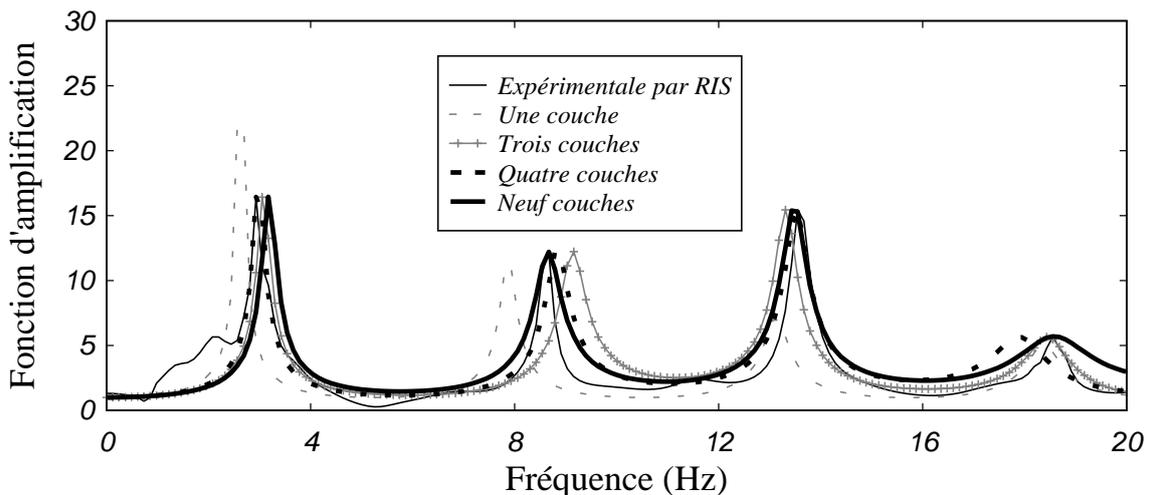


Fig. 5.13. Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport interspectral, la fonction d'amplification théorique calculée avec les valeurs moyennes pondérées et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification du modèle 2 du profil du site de Garner Valley.

Ces figures montrent que la solution n'est pas unique, et la procédure d'identification conduit à une large gamme de valeurs possibles pour chaque paramètre. Cela justifie encore plus l'utilisation de la méthode AGA au lieu des méthodes de gradient, qui exigent l'unicité de la solution pour y être applicables [Bonnans et al., 2006]. Néanmoins, la procédure proposée fonctionne bien et converge toujours vers une solution, malgré les difficultés rencontrées dans ce genre de problèmes d'optimisation.

Autrement dit, cette procédure peut être utilisée pour corriger les valeurs des propriétés du profil du site de Garner Valley pour avoir une meilleure concordance entre les FAT et les FAE [Khellafi et al., 2015b]. Pour ce faire, nous proposons de commencer avec une population initiale composée d'individus choisis au sein d'intervalles définis, pour chaque paramètre, par sa valeur expérimentale définie comme étant le milieu de l'intervalle et un écart type égal à 20 %. Les valeurs corrigées par la procédure d'identification ainsi que les valeurs expérimentales sont regroupées dans le **tableau 5.10**.

Tab. 5.10. Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs ajustées par une identification orientée du profil du site de Garner Valley.

Couche	h (m)			v_s (m/s)			ρ_s (kg/m ³)			ξ_s (%)		
	Exp.	Corrigée		Exp.	Corrigée		Exp.	Corrigée		Exp.	Corrigée	
		avec RSS	avec RIS		avec RSS	avec RIS		avec RSS	avec RIS		avec RSS	avec RIS
1	1	1,0	0,9	90	80	95	1950	1880	2010	2	0,5	4,8
2	1	0,9	1,0	130	135	125	1950	1910	2020	2	0,5	0,1
3	2	1,9	1,9	165	180	175	2000	2090	1970	2	0,5	0,1
4	2	2,2	2,1	190	180	205	2000	2080	2050	2	8,0	7,4
5	2	2,1	1,9	215	230	200	2000	2010	2000	4	1,0	4,1
6	3,5	3,4	3,6	240	250	225	2000	2040	1960	1	1,1	1,1
7	3,5	3,7	3,6	260	245	245	2000	1960	2020	1	8,0	9,8
8	3	2,8	3,2	280	295	280	2050	2090	2060	1	1,0	1,1
9	4	4,1	3,9	600	595	585	2200	2250	2150	1	1,0	1,0

Les comparaisons montrent de petites différences entre les valeurs expérimentales et les valeurs corrigées des épaisseurs, des vitesses des ondes de cisaillement et des masses volumiques, ne dépassant pas 11%. Cependant, de grands écarts sont observés entre les valeurs expérimentales et corrigées des coefficients d'amortissements.

D'autre part, il a été largement reconnu qu'il y a des désaccords significatifs entre les résultats de laboratoire et les observations in-situ, notamment pour les atténuations ou amortissements, qui sont des paramètres importants de la réponse de site [Dimitriu, 2001].

En retour, les valeurs corrigées ont nettement rétabli les fréquences naturelles et les pics d'amplification de la FAT identifiées pour bien correspondre avec celles de la FAE, comme indiqué dans les figures 5.14 et 5.15.

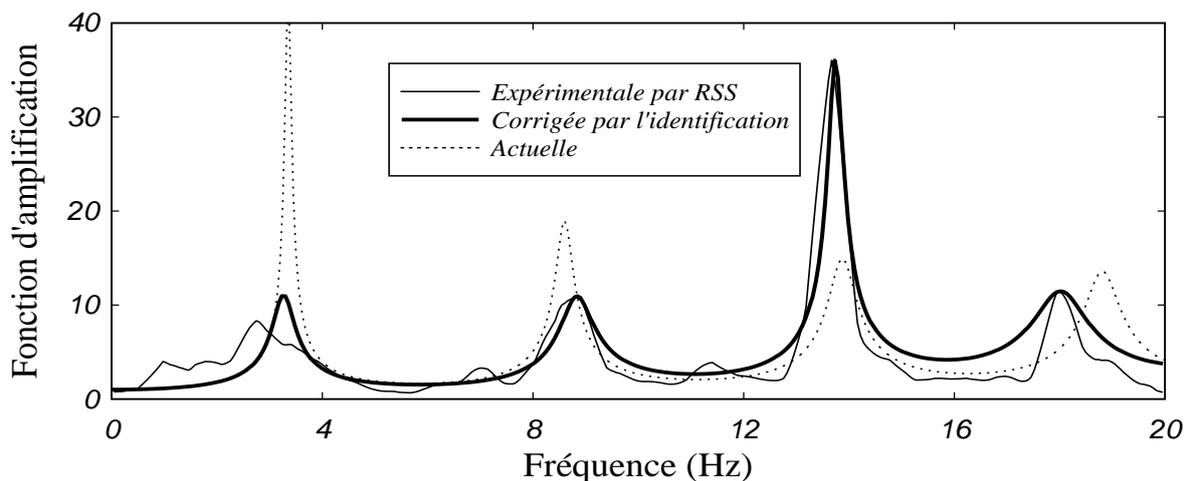


Fig. 5.14. Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport spectral standard, la fonction d'amplification théorique calculée avec les valeurs expérimentales actuelles et la fonction d'amplification théorique calculée avec les valeurs expérimentales ajustées, du profil du site de Garner Valley.

5.3.5. Identification des propriétés d'une couche de sol non-homogène avec un module de cisaillement variable

Dans ce cas, la procédure est appliquée pour identifier les paramètres d'une couche de sol non-homogène avec un module de cisaillement variable (modèle 3). La FAT est calculée avec

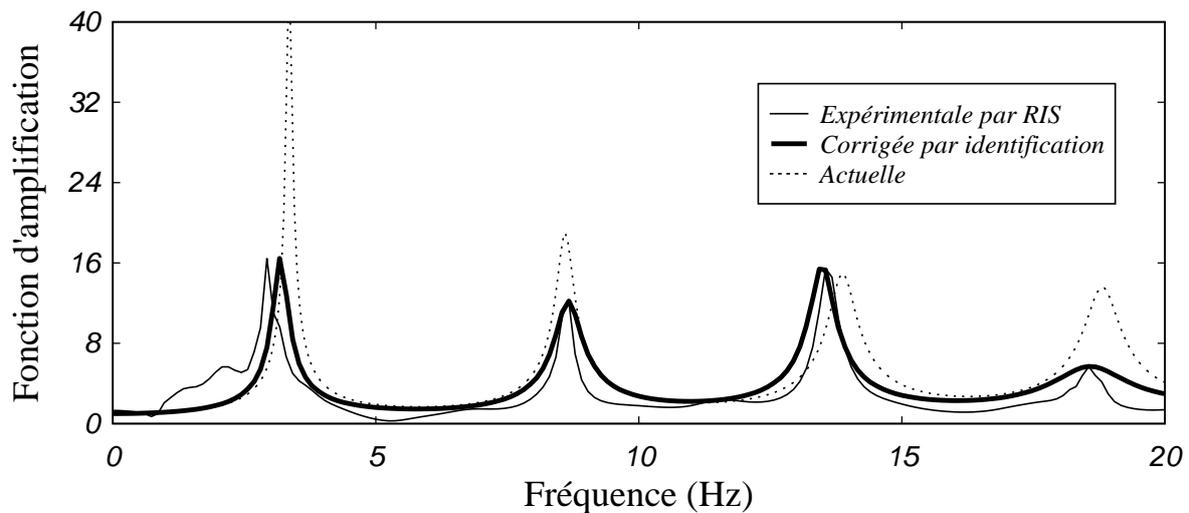


Fig. 5.15. Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport inter-spectral, la fonction d'amplification théorique calculée avec les valeurs expérimentales actuelles et la fonction d'amplification théorique calculée avec les valeurs expérimentales ajustées, du profil du site de Garner Valley.

les [Eqs. \(4.17, 4.22, 4.25\)](#).

Ce modèle est caractérisé par cinq paramètres qui sont : p , h , z_0 , v' et ξ_s . L'optimisation est effectuée dans l'espace de recherche comprenant, pour chaque paramètre, toutes les valeurs possibles, soit :

- 0 – 10 pour p ,
- 0 – 50 m pour z_0 ,
- 0 – 10 m/s pour v' ,
- 0 – 10 % pour ξ_s ,
- alors que h est considéré comme connu et égal à 22 m.

5.3.5.1. Analyse des résultats

En général, la procédure fonctionne bien et un nombre modéré de générations AGA (39 à 58) et quelques itérations LM (4 à 12) ont suffi pour atteindre une solution. Cependant, la solution n'est pas unique et la procédure d'identification conduit à une large gamme de valeurs

possibles pour chaque paramètre.

Les comparaisons entre les FAE et les FAT issues de l'identification sont illustrées dans les **figures 5.16** et **5.17**. L'examen des ces figures montre que les fréquences naturelles identifiées sont proches de leurs homologues mesurées expérimentales, tandis que les pics d'amplifications ne le sont pas.

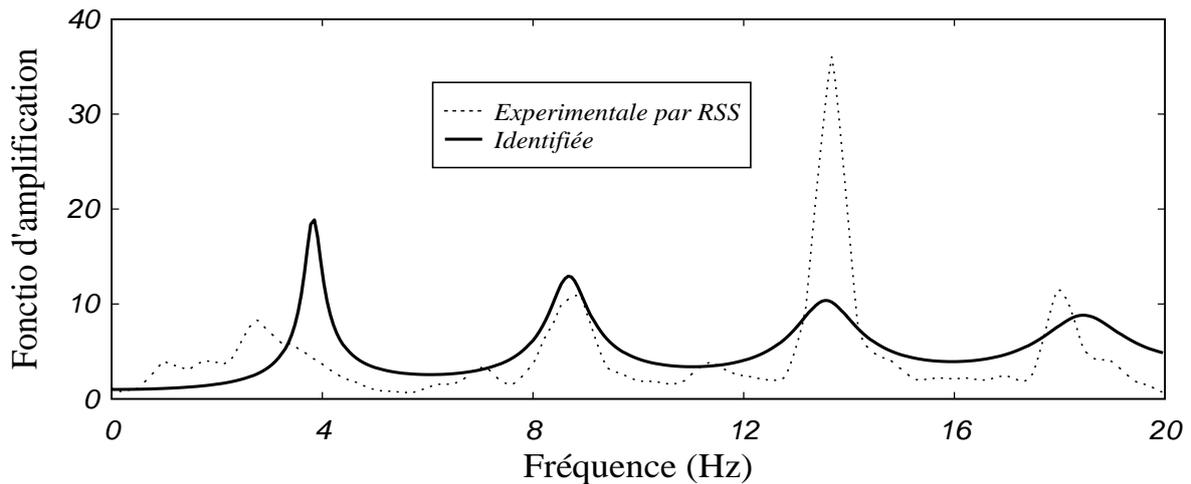


Fig. 5.16. Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport spectral standard et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification du modèle 3 du profil du site de Garner Valley.

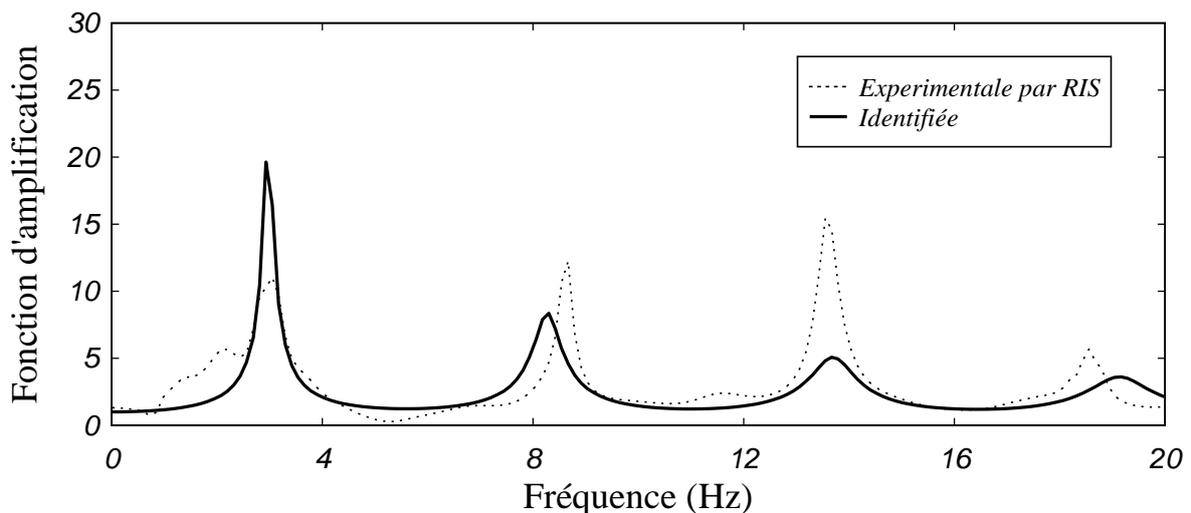


Fig. 5.17. Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport inter-spectral et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification du modèle 3 du profil du site de Garner Valley

Les profils des vitesses des ondes de cisaillement issus de l'identification sont représentés sur la **figure 5.18** en fonction de la profondeur par rapport à la surface du sol. Ces profils sont comparés avec d'autres profils issus de travaux de recherches antérieures [Pecker, 1995 ; Harichane et al., 2005].

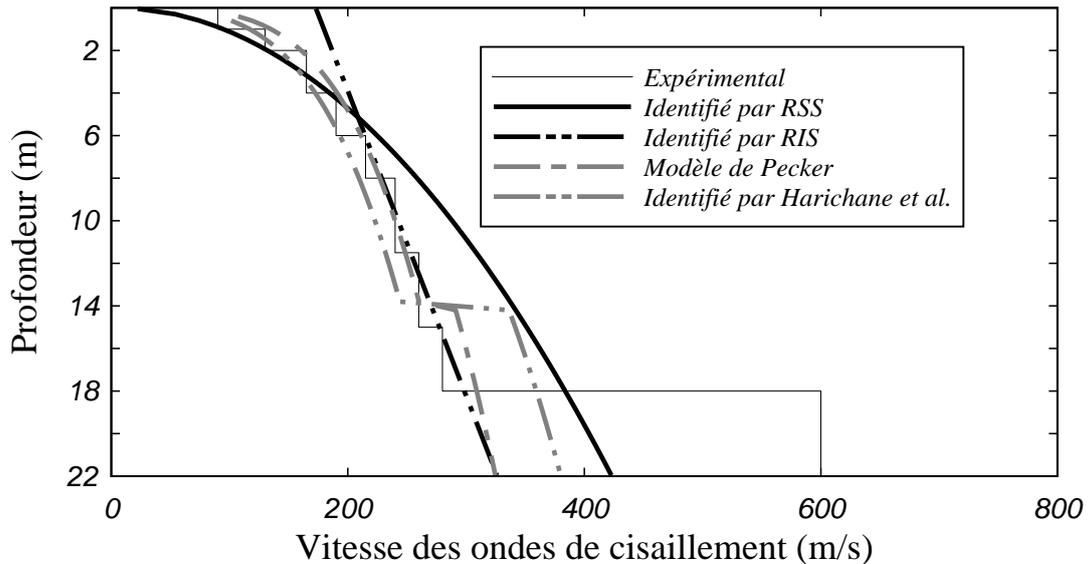


Fig. 5.18. Profil de la vitesse des ondes de cisaillement de différents modèles correspondant au site de Garner Valley.

Les profils de vitesse issus de l'identification sont différents de ceux obtenus par Pecker [Pecker, 1995] et par Harichane [Harichane et al., 2005]. Ces différences ne sont pas dues aux fortes valeurs de l'erreur dans la fonction fitness, mais plutôt à cause que Pecker et Harichane ont utilisé le modèle multi-couches homogènes stratifiées horizontalement.

5.3.6. Identification des propriétés d'une couche de sol à paramètres aléatoires

Ici, le profil de sol est supposé composé d'une couche non-homogène à paramètres aléatoires (modèle 4). La FAT est calculée avec l'**Eq. (4.27)**. Ce modèle est caractérisé par sept paramètres qui sont : h , v_s , ξ_s , α , σ_{11} , σ_{12} et σ_{22} .

L'optimisation est effectuée dans l'espace de recherche comprenant, pour chaque paramètre, toutes les valeurs possibles, soit :

- 200 – 800 m/s pour v_s ,
- 0 – 10 % pour ξ_s ,
- 0 – 100 % pour α , σ_{11} , σ_{12} et σ_{22} ,
- alors que h est considéré comme connu et égal à 22 m .

5.3.6.1. Analyse des résultats

Comme précédemment, la procédure proposée fonctionne bien et un nombre modéré de générations AGA (44 à 62) et quelques itérations LM (5 à 11) sont nécessaires pour retrouver une solution.

Cependant, la solution n'est pas unique. En effet, plusieurs solutions comprenant différentes combinaisons de paramètres ont été obtenues avec une bonne concordance entre les FAE et la FAT identifiée. La comparaison entre les différentes FAE et FAT issue des identifications sont montrées dans les [figures 5.19](#) et [5.20](#), respectivement.

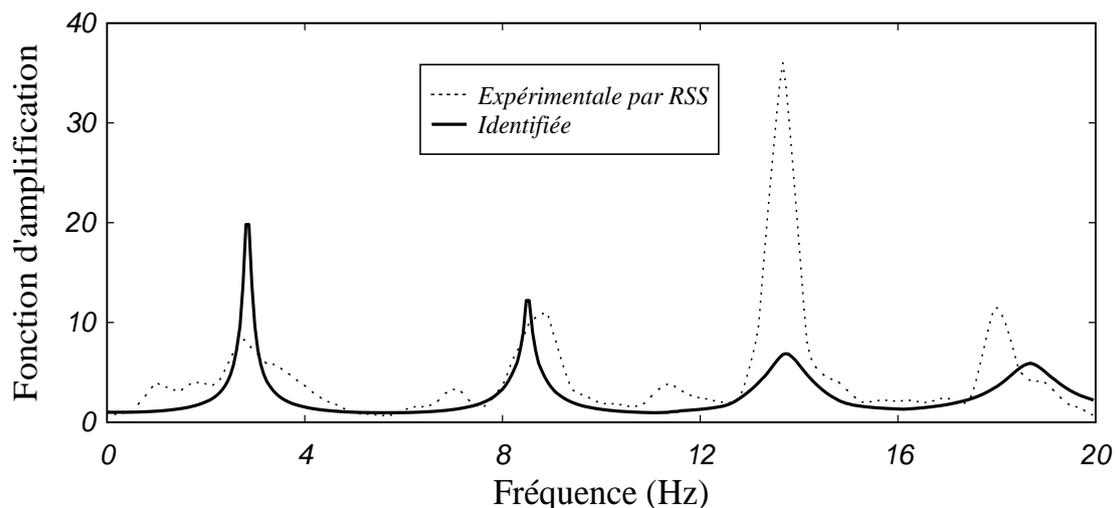


Fig. 5.19. Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport spectral standard et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification du modèle 4 du profil du site de Garner Valley.

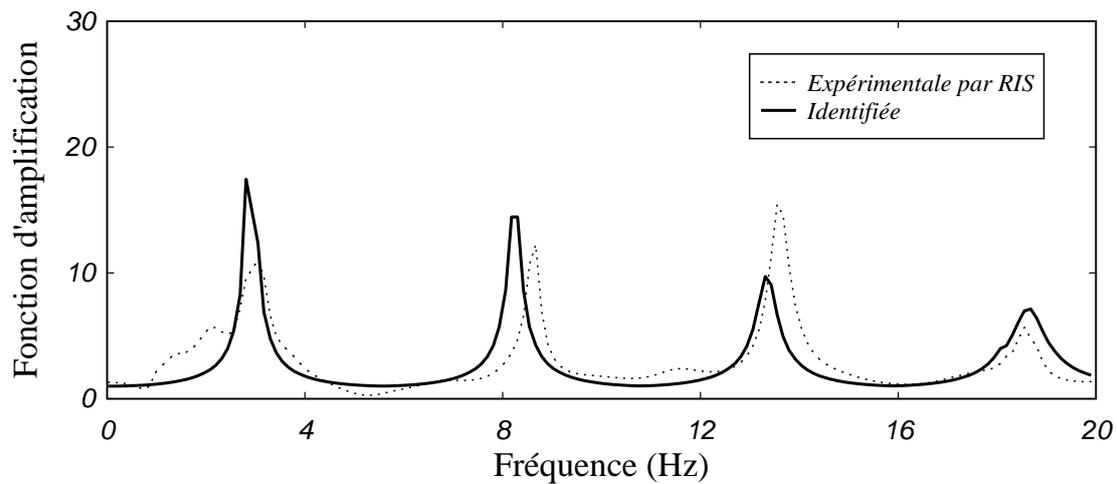


Fig. 5.20. Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport inter-spectral et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification du modèle 4 du profil du site de Garner Valley.

5.4. Conclusion

Dans le présent chapitre, la procédure d'identification a été appliquée à plusieurs exemples numériques et expérimentaux. Le premier exemple a permis la validation numérique de la procédure sur le modèle le plus simple, celui d'une couche homogène équivalente. Ensuite, le second exemple a permis de valider expérimentalement la procédure proposée avec divers modèles théoriques en utilisant les données expérimentales enregistrées sur le site de Garner Valley Downhole Array (GVDA) lors d'un séisme de faible magnitude.

Les résultats montrent que la procédure proposée fonctionne bien et l'ajustement peut être considéré comme satisfaisant dans tous les cas traités.

Cette procédure fournit de bons résultats en un temps de calcul raisonnable et avec un bon taux de convergence. En effet, ni le nombre croissant de paramètres, ni l'immensité de l'espace de recherche n'a réduit l'efficacité de cette procédure. Egalement, et malgré les différences observées au niveau des pics d'amplification des FAE calculées par RSS et RIS, un bon accord a été observé entre les paramètres expérimentaux et identifiés dans une marge d'erreur de 11 %.

De plus, elle garanti une convergence sans faille vers des valeurs physiques puisque d'une part, la méthode AGA explore un espace de recherche borné par des valeurs réelles, et d'autre part, l'optimisation est achevée par la méthode LM qui allie rapidité et garantie de convergence vers l'optimum le plus proche dans le voisinage de la solution courante.

Cependant, cette procédure ne semble pas adéquate pour l'identification de tous les modèles d'un profil de sol sauf dans le cas d'une couche homogène équivalente. En effet, plusieurs solutions comprenant différentes combinaisons de paramètres ont été obtenues avec une bonne concordance entre les FAE et les FAT identifiées.

Ainsi, l'unicité de la solution n'est pas toujours garantie à cause du choix des modèles théoriques utilisés. En effet, l'utilisation des modèles élastiques, qui représentent une simplification assez grossière du comportement réel des sols, beaucoup plus complexe, nous mènent à une large gamme de solutions représentant des profils de sols différents. Par conséquent, l'élaboration d'une procédure d'identification, par analyse inverse, avec des modèles de comportement élastique reste limitée au sens où ces derniers ne sont pas des modèles réellement dynamiques.

A l'opposé, cette procédure peut être utilisée avec succès si le nombre de paramètres inconnus est réduit. Ceci fera l'objet d'une application qui sera traitée dans le chapitre suivant.

Egalement, la procédure peut être utilisée comme moyen efficace pour la correction des données existantes, par le biais d'ajustement des fréquences naturelles et des pics d'amplification de la FAT pour bien correspondre avec ceux de la FAE.

Autrement dit, cette procédure ouvre des perspectives pour la caractérisation rigoureuse des sites pour un coût réduit par rapport aux approches conventionnelles utilisant les essais in-situ et/ou au laboratoire lorsque les mouvements du sol enregistrés lors de séismes précédents sont disponibles.

Chapitre 6

Etude de cas

6.1. Introduction

Au chapitre précédent, la procédure d'identification a été testée sur deux exemples, l'un numérique et l'autre réel, en estimant les paramètres de sols à partir de deux enregistrements accélérométriques, l'un en surface libre et l'autre au substratum rocheux. L'analyse des résultats a montré les capacités de la procédure pour identifier les caractéristiques des sols.

Pour compléter cette étude, ce dernier chapitre met en application la procédure élaborée sur des problèmes réels plus complexes. Pour cela, deux problèmes sont traités.

Le premier problème consiste à déterminer des données manquantes d'un site donné. Pour ce faire, deux sites situés dans le voisinage de la ville d'Adapazari (Turquie), gravement touchée par le séisme de Kocaeli de 1999 est choisi. La procédure est utilisée pour déterminer les coefficients d'amortissements et l'accélérogramme du séisme dans ce site à partir des données existantes.

Le deuxième problème consiste à déterminer, simultanément, les profils de sols de deux sites à partir d'enregistrements accélérométriques, en surface libre seulement. Pour ce faire, deux sites voisins situés dans la banlieue proche de la ville d'Alger. Les accélérogrammes utilisés ont été enregistrés durant le séisme de Boumerdès du 21 Mai 2003.

Dans tous les exemples traités ci dessous, le processus d'identification est effectué comme réalisé précédemment dans le [chapitre 5](#). Les paramètres caractérisant les différents opérateurs d'AGA, les poids de pondération et les critères d'arrêt sont identiques à ceux utilisés dans le [paragraphe 5.2.3](#).

6.2. Application 1

Dans cette application, nous nous proposons de déterminer les coefficients d'amortissement et l'accélérogramme du séisme dans le site choisi [[Khellafi et al., 2016](#)]. Pour ce faire, on a :

- Un site situé dans le voisinage de la ville d'Adapazari, dont on connaît quelques informations sur son profil de sol,
- deux enregistrements accélérométriques disponibles, l'un en surface libre du site en question et l'autre sur un affleurement rocheux voisin.

6.2.1. Description des données

La ville d'Adapazari est située dans le bassin Sakarya à 130 *km* à l'est d'Istanbul et 50 *km* au sud de la mer Noire. Elle se trouve à environ 7 *km* de la faille principale du séisme de Kocaeli en 1999 ([Fig. 6.1](#)). La majeure partie de la ville repose sur une épaisse couche d'alluvions (site F) tandis que le reste s'appuie sur un terrain rocheux (site E) ([Fig. 6.2](#)).

Les propriétés des différentes couches constituant le profil de sol du site F sont données dans le [tableau 6.1](#).

Le 17 août 1999, un important séisme de magnitude 7,4 a frappé la région et a provoqué d'importants dégâts dans la ville d'Adapazari. Après la secousse principale, plusieurs répliques ont été enregistrées. Les [figures 6.3-6.5](#) représentent les accélérations enregistrées à la surface libre des sites E et F, lors des répliques du 12 et 13 septembre 1999, et ont été obtenu en utilisant les données du réseau sismique local, IZINET [[Ito et al., 2002](#)].

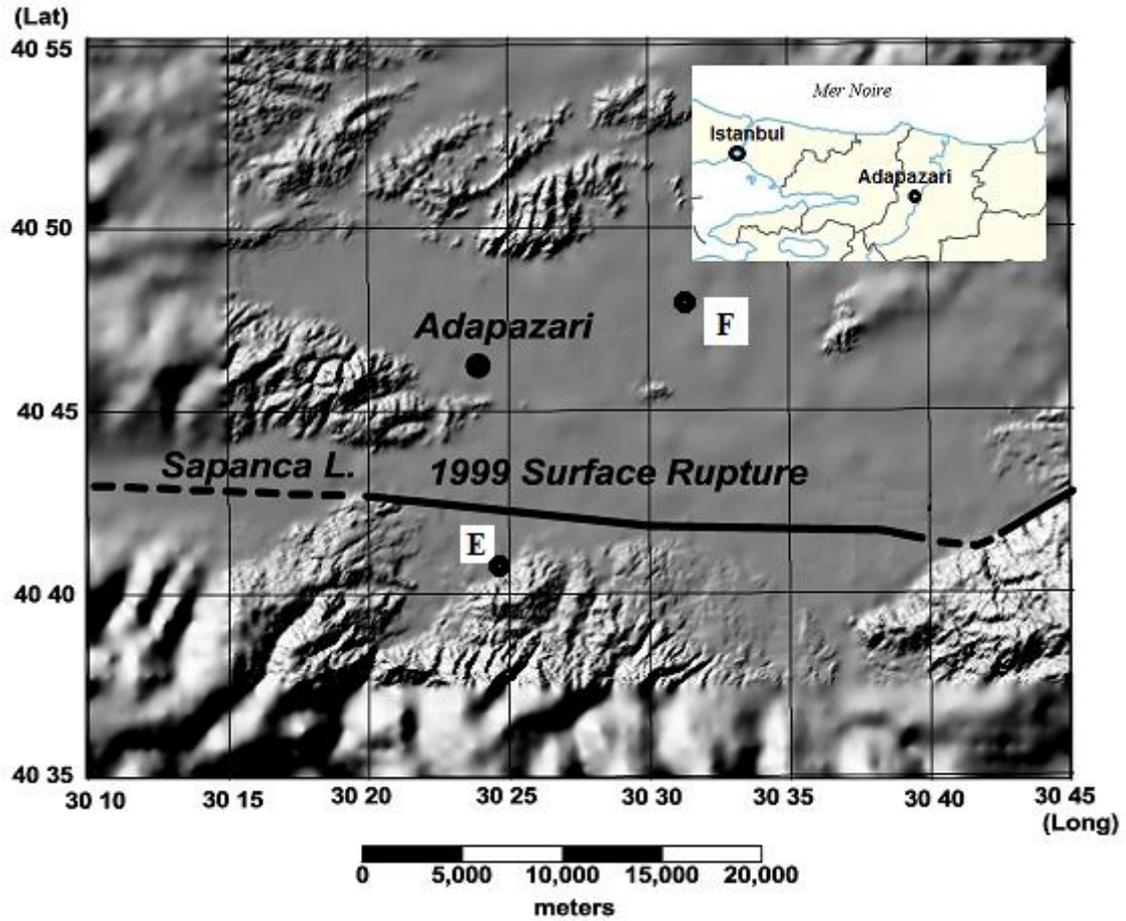


Fig. 6.1. Localisation la ville d'Adapazari et topographie de la région [Komazawa et al., 2002].

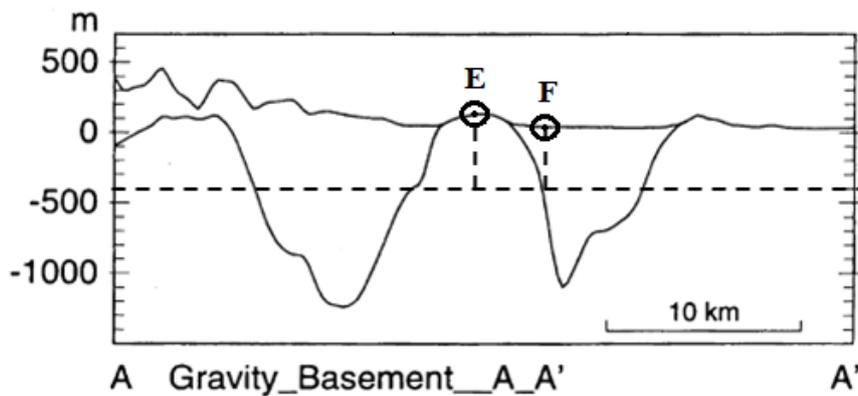
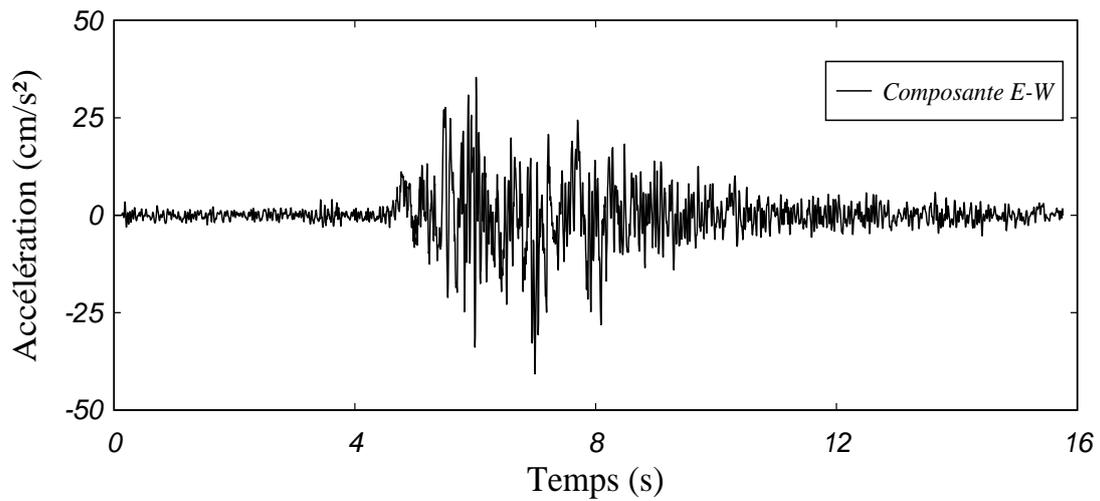
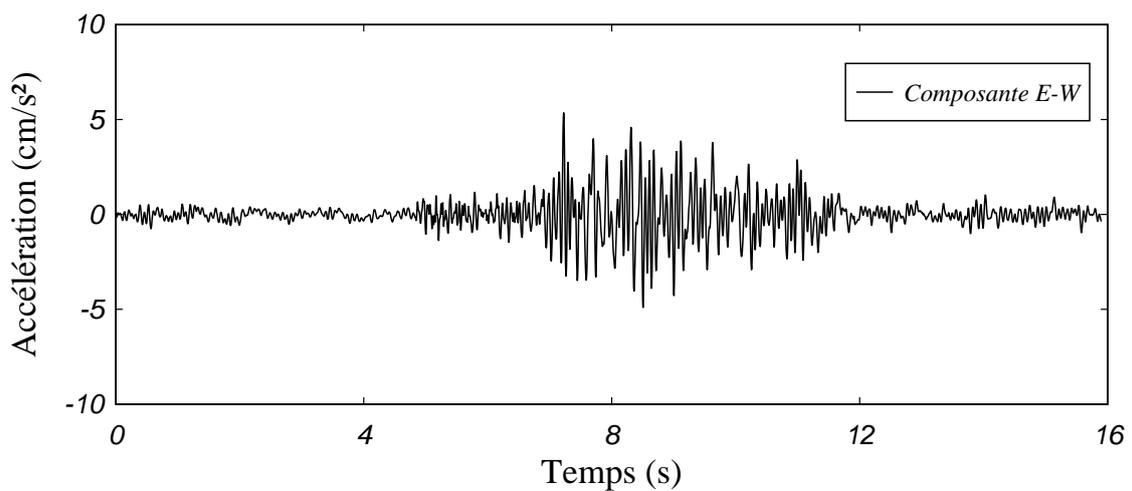


Fig. 6.2. Coupe transversale de la gravimétrie du sous-sol et topographie de la surface de la ville d'Adapazari suivant la direction EF [Komazawa et al., 2002].

Tab. 6.1. Propriétés des couches constituant le profil de sol du site F [Komazawa et al., 2002].

N° de la couche	h (m)	v_s (m/s)	ρ_s (kg/m ³)
1	65	200	1700
2	90	500	1800
3	250	1000	2000
Substratum	-	3500	2500

**Fig. 6.3.** Accélérations enregistrées durant la réplique du 12 septembre 1999 dans la station implantée en affleurement rocheux (site E).**Fig. 6.4.** Accélérations enregistrées durant la réplique du 13 septembre 1999 dans la station implantée en affleurement rocheux (site E).

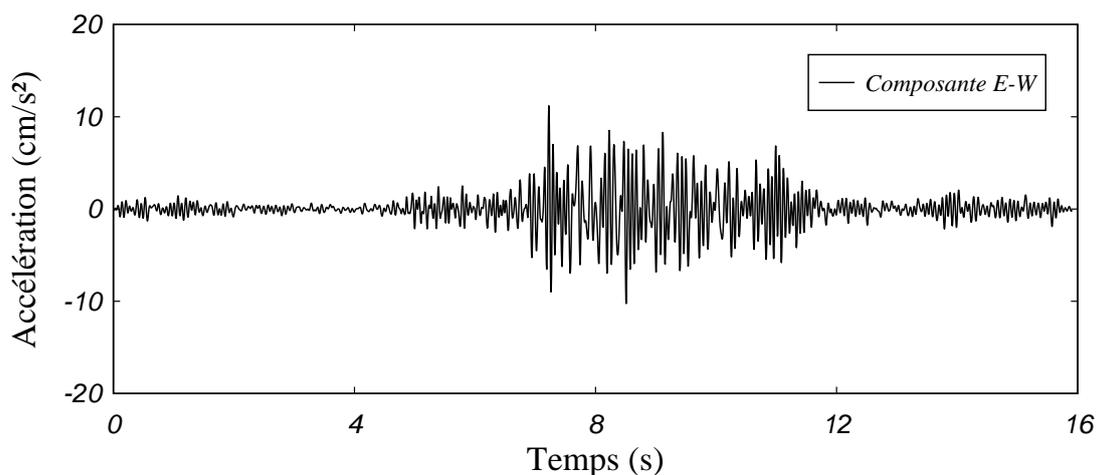


Fig. 6.5. Accélérations enregistrées durant la réplique du 13 septembre 1999 dans la station implantée dans la partie alluviale (site F).

Les accélérations maximales du sol, enregistrées en surface, des deux stations étaient inférieures à 41 Gal^1 ($0,04 \text{ g}$) dans la direction E-W, et 19 Gal ($0,02 \text{ g}$) dans la direction N-S. Ces grandeurs correspondent, en génie parasismique, à des mouvements faibles [Huang et al., 2000], ce qui nous permet d'effectuer une analyse significative et convaincante avec le modèle de sol élastique linéaire.

6.2.2. Identification des coefficients d'amortissements

Dans l'application citée ci dessus, nous nous proposons d'identifier les coefficients d'amortissements du profil de sol du site F. Pour ce faire, les enregistrements accélérométriques de la réplique du 13 septembre 1999 dans les deux sites E et F sont utilisés (Figs. 6.3 et 6.4).

L'optimisation est réalisée en minimisant l'écart entre la FAT, calculée avec l'Eq. (4.15), et la FAE, calculée par l'Eq. (4.1) et lissée avec une fenêtre triangulaire de $0,5 \text{ Hz}$ de largeur (Eqs. (4.2-4.4)).

Pour avoir une meilleure concordance entre la FAE et la FAT identifiée, nous permettons à la procédure d'introduire de légères modifications aux valeurs des paramètres connus des

¹ $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$ et $1 \text{ g} = 981 \text{ Gal}$

différentes couches du profil de sols. Ainsi, la procédure est lancée avec une population initiale composée d'individus choisis au sein d'intervalles définis, pour chaque paramètre, par sa valeur expérimentale définie comme étant le milieu de l'intervalle et avec un écart type égal à 10 %.

De plus, vu les hauteurs très importantes des différentes couches, ces dernières seront subdivisées. L'optimisation est donc réalisée en plusieurs étapes successives où, à chaque étape, toutes les couches sont subdivisées en plusieurs sous-couches ayant les mêmes caractéristiques initiales. Enfin, puisque le processus est stochastique, la procédure est lancée plusieurs fois avec, à chaque fois, une population initiale générée aléatoirement.

6.2.2.1. Analyse des résultats

Dans tous les essais, la procédure converge toujours vers une solution au bout d'un temps de calcul raisonnable estimé entre 2 et 3 heures. On constate qu'à partir d'un total de 9 couches, la valeur de la fitness se stabilise à une valeur minimale. Les valeurs obtenues avec 9 couches sont présentées dans le [tableau 6.2](#). Au-delà, aucune amélioration sensible n'a été constatée sur la valeur minimale de la fitness.

Tab. 6.2. Valeurs modifiées de h , v_s , ρ_s et les valeurs identifiées de ξ_s du site F.

N° de la couche	h (m)	v_s (m/s)	ρ_s (kg/m ³)	ξ_s (%)
1	13	210	1670	0,3
	23,5	260	1750	0,2
	27	250	1740	0,9
2	28	540	1780	0,6
	29,5	470	1760	0,3
	33	530	1770	4,3
3	83,5	1070	2040	3,1
	83	1040	2010	3,9
	90	1050	2030	5,8
Substratum rocheux	-	3500	2500	1,0

La **figure 6.6** présente une comparaison entre la FAE et la FAT issue de l'identification. Si le nombre de pics est le même dans les deux courbes, un léger décalage, entre les fréquences naturelles mesurées et calculées, est observés. Cependant, les amplitudes de ces pics sont plutôt différentes.

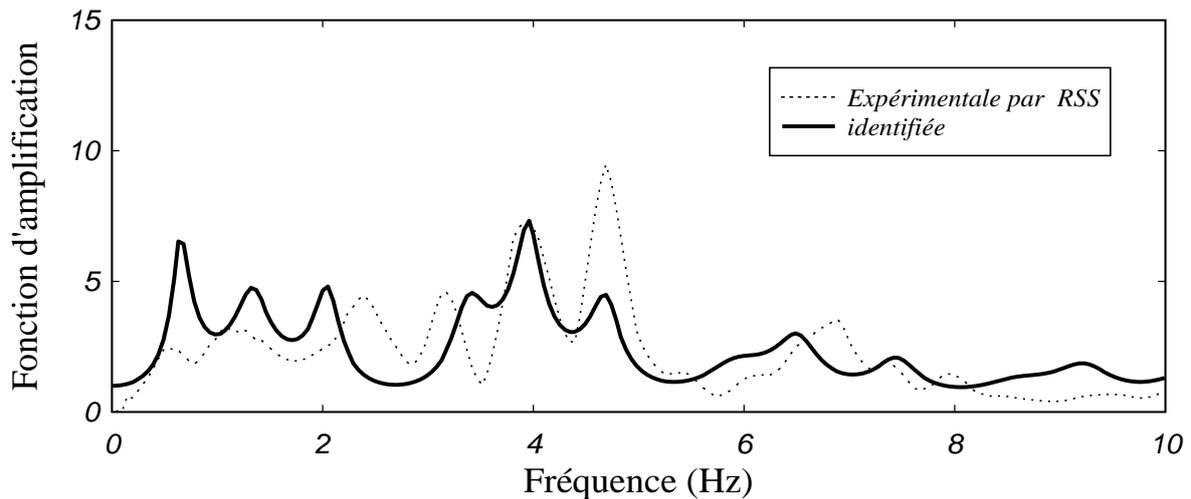


Fig. 6.6. Comparaison entre la fonction d'amplification expérimentale calculée par la méthode du rapport spectral standard et la fonction d'amplification théorique obtenue par identification du site F.

Il est intéressant de noter que, pour reproduire le plus fidèlement possible la FAE, la procédure a légèrement modifiée les valeurs des paramètres connues, tout en ne dépassant pas 8 % des valeurs initiales, sauf pour les valeurs : $v_s = 260$ et 250 m/s qui ont dépassé 25%.

En conclusion, cet exemple nous a permis de montrer l'application de la procédure afin de déterminer les coefficients d'amortissements manquants à ce site. Les résultats obtenus sont très encourageantes et les valeurs obtenues sont dans la gamme des valeurs couramment employées en dynamique des sols.

6.2.3. Détermination de l'accélérogramme du site F

Nous proposons, ici, une simulation par la méthode de convolution de l'accélérogramme du 12 septembre 1999 dans la station implantée dans le site F et qui n'a pas été enregistré au préalable. Pour ce faire, nous utilisons l'enregistrement accélérométrique du même jour du

site E (**Fig. 6.3**) et la procédure élaborée pour prospector les différentes solutions issue de l'identification des coefficients d'amortissement du site F.

En revenant au processus décrit dans l'exemple précédent, 15 essais de simulations successives sont effectués en procédant comme suit :

1. déterminer le spectre de Fourier de l'accélérogramme du séisme au site E,
2. la procédure est lancée pour avoir un ensemble de paramètres servant à calculer la fonction de transfert du profil de sol qui permettra la détermination du spectre de Fourier de l'accélérogramme rechercher au site F,
3. une courbe moyenne est déterminée à partir des courbes obtenues après chaque essai,
4. l'accélérogramme du séisme au site F est obtenu en calculant la transformée de Fourier inverse de la courbe moyenne.

6.2.3.1. Analyse des résultats

L'accélérogramme déterminé de la réplique du 12 septembre 1999 au site F est présenté dans la **figure 6.7**. Cette figure montre que l'accélération maximale atteint 67 Gal ($0,07 \text{ g}$). En comparaison avec la valeur mesurée au site E, la plaine alluviale a tendance à amplifier l'accélération maximale du mouvement du sol en surface du site F, ce qui est en accord avec la théorie d'amplification des mouvements sismiques dans les bassins sédimentaires.

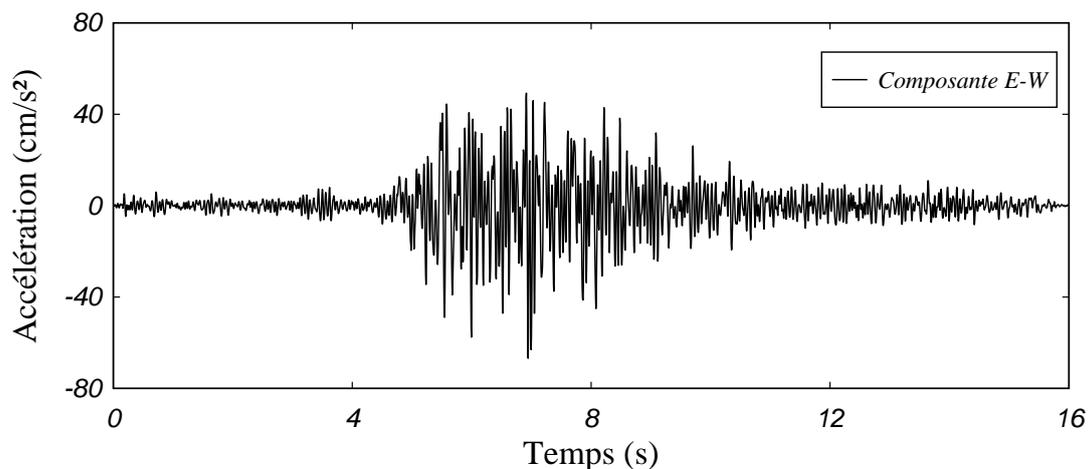


Fig. 6.7. Accélérogramme moyen de la réplique du 12 septembre 1999 dans la station implantée dans le site F.

Il convient de rappeler que, lors du séisme de Kocaeli du 17 août 1999, Kudo et al. [Kudo et al., 2000] ont remarqué que les mouvements de sol dans la zone endommagée d'Adapazari (là où se trouve le site F) étaient plus importants que ceux de Sakarya (là où se trouve le site E) et ont attribué ces dommages à la différence de la réponse entre les deux sites.

Donc, l'accélérogramme obtenu est raisonnable, et peut être considéré dans d'autres études sismiques liées à ce site.

6.3. Application 2

Dans les exemples précédents, notre procédure a montré son efficacité dans l'identification des caractéristiques d'un profil de sols d'un seul site. Ici, nous proposons une autre application qui concerne deux sites en même temps. Dans ce cas, la procédure est utilisée pour identifier les caractéristiques des profils de sols sous les stations d'enregistrement implantées dans deux sites différents. Pour ce faire, on a :

- deux sites situés dans la banlieue proche de la ville d'Alger (Hussein Dey et Kouba), dont on ne connaît pas les informations sur les profils de sols sous les stations d'enregistrement,
- deux enregistrements accélérométriques en surface libre de chaque site, enregistrés après le séisme de Boumerdès du 21 Mai 2003.

6.3.1. Description des données

Le Nord de l'Algérie est souvent secoué par des séismes d'intensité variable. Le 21 Mai 2003, un séisme de Magnitude $M_L = 6,8$ a frappé la région de Boumerdès (50 km à l'Est de la ville d'Alger), causant beaucoup de dommages dans la région.

Après la secousse principale, plusieurs enregistrements des mouvements du sol ont été réalisés par le Réseau National d'Accélérographes du Centre National de Recherches Appliquées en Génie Parasismique (C.G.S) dans la zone épiscoptrale et ses alentours.

Les **figures 6.8** et **6.9** représentent les accélérations enregistrées à la surface libre dans deux stations situées dans les communes d'Hussein Dey et de Kouba. Les accélérations maximales des sols enregistrées en surface de chaque site étaient de 11 et 10 Gal, respectivement.

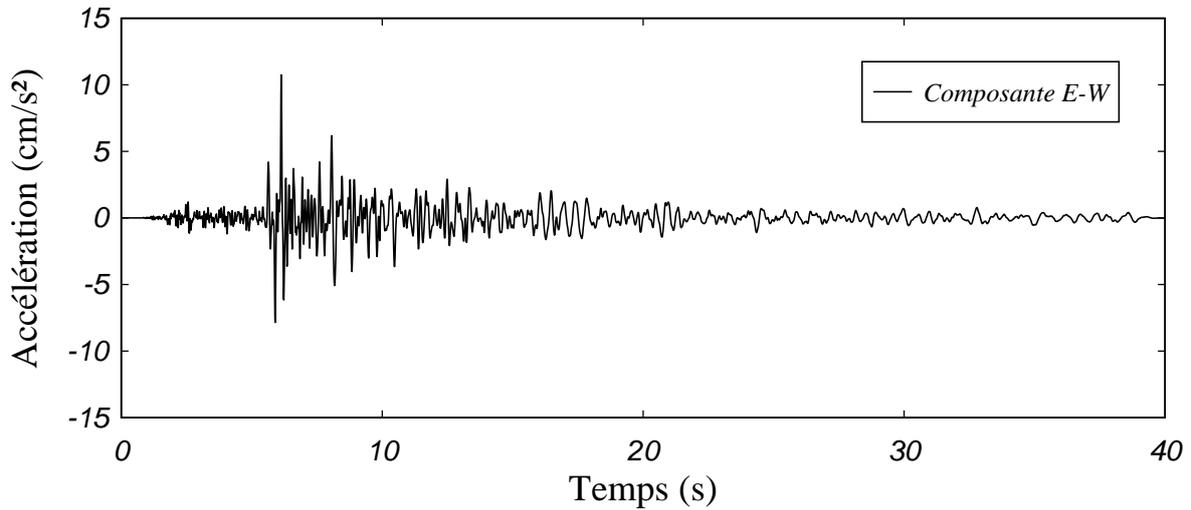


Fig. 6.8. Accélérations enregistrées dans la station implantée dans le site d'Hussein Dey.

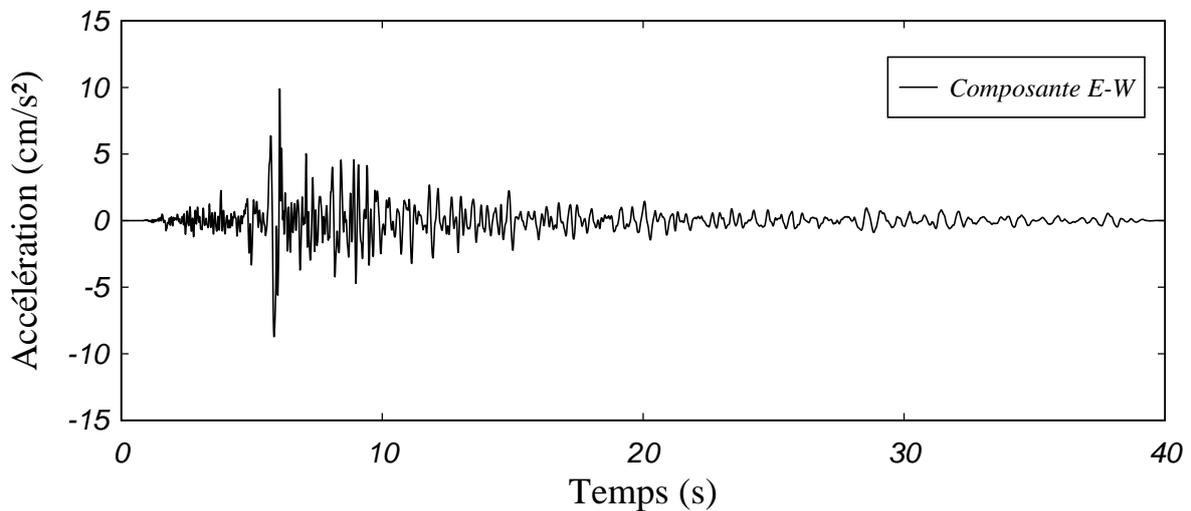


Fig. 6.9. Accélérations enregistrées dans la station implantée dans le site de Kouba.

Hussein Dey et Kouba sont deux communes voisines situées dans la proche banlieue Sud-Est d'Alger, à environ 5 et 6 km, respectivement, du centre ville d'Alger (**Fig. 6.10**). Hussein

Dey se situe sur la plaine côtière de la baie d'Alger, tandis que Kouba se situe sur l'un des derniers mamelons du sahel algérois, à une altitude de 120 à 130 m.

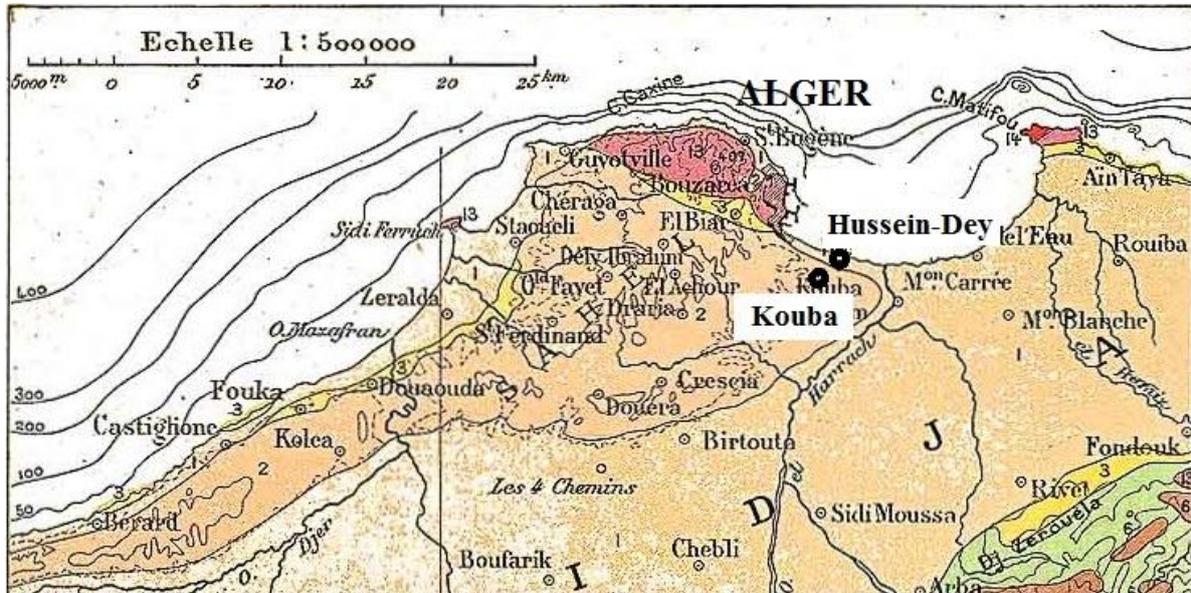


Fig. 6.10. Localisation des communes d'Hussein Dey et de Kouba par rapport à Alger centre.

6.3.2. Identification des propriétés des profils de sols des deux sites

Nous nous proposons de déterminer les caractéristiques des profils de sols sous les stations d'enregistrement des deux sites d'Hussein Dey et de Kouba. Le problème étudié consiste à identifier, simultanément, les caractéristiques des deux profils en minimisant l'écart entre le rapport des fonctions d'amplification expérimentales (Γ_e) et le rapport des fonctions d'amplification théoriques (Γ_m).

Tout d'abord, supposant que les deux profils de sols reposent sur une base rocheuse commune, et sont soumis à des excitations sismiques identiques à la base. Dans ce cas, le paramètre α peut être considéré égal à 1.

La procédure utilisera les enregistrements accélérométriques en surface libre des deux stations (Figs. 6.8 et 6.9). La fonction Γ_e est calculée avec l'Eq. (4.31) et ensuite lissée avec une fenêtre triangulaire de 0,5 Hz de largeur. La courbe obtenue est présentée sur la figure 6.11.

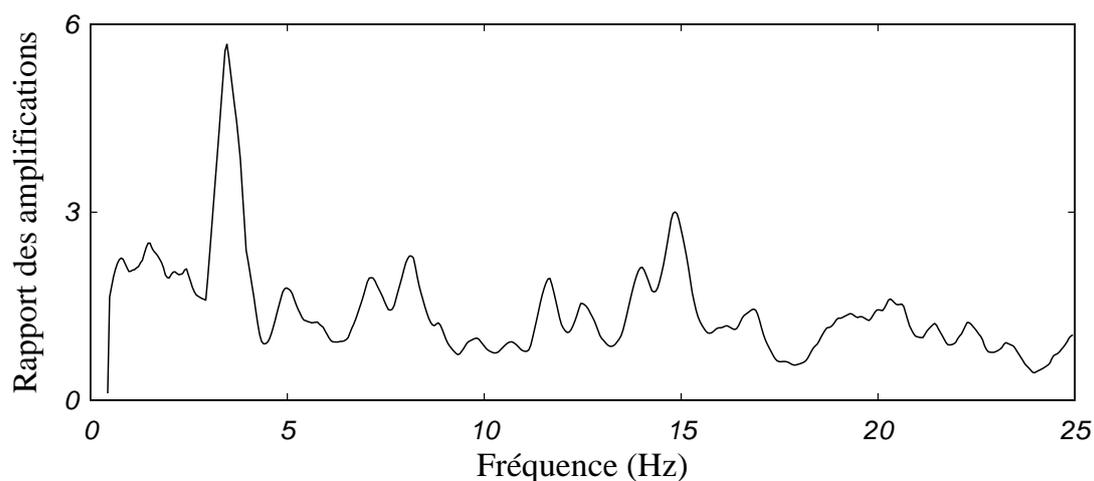


Fig. 6.11. Rapport des amplifications expérimentales lissées des sites d'Hussein Dey et de Kouba.

La fonction Γ_m est calculée avec l'Eq. (4.32), en considérant les deux modèles :

- multi-couches homogènes stratifiées horizontalement (modèle 1),
- une couche non-homogène dont le module de cisaillement augmente avec la profondeur (modèle 2).

L'optimisation est réalisée en minimisant, pour chaque modèle, l'écart entre la fonction Γ_e et le module de la fonction Γ_m . Dans le premier cas, l'identification est réalisée comme décrit dans le [paragraphe 5.3.4.](#), en considérant un nombre de couches inconnu. Dans le deuxième cas, l'identification est réalisée comme décrit dans le [paragraphe 5.3.5.](#), en considérant la hauteur de la couche inconnue.

Enfin, vu la nature stochastique du processus, la procédure est lancée plusieurs fois avec, chaque fois, une population initiale générée aléatoirement. Ce processus prend fin lorsqu'aucune amélioration sur la valeur minimale de la fitness n'est enregistrée.

6.3.2.1. Analyse des résultats

Dans tous les essais, la procédure converge toujours vers une solution au bout d'un temps de calcul plus long que d'habitude, qui peut aller jusqu'à 53 heures avec le modèle 1 et environ 1 heure avec le modèle 2.

En effet, lorsqu'on utilise le modèle 1, le processus établi plus haut, a mis en jeu un nombre considérable de paramètres à optimiser, atteignant jusqu'à 120 paramètres à la fois, et ce parce qu'il identifie deux profils de sols simultanément. En conséquence, un nombre important de générations AGA (38 à 132) et quelques itérations LM (3 à 5) sont nécessaires pour retrouver une solution.

La **figure 6.12** illustre une comparaison entre la fonction Γ_e et le module de la fonction Γ_m identifiée. A l'aide des résultats obtenus, nous traçons, pour chaque site, la variation des paramètres identifiés en fonction de la profondeur. Ils sont présentés sur les **figures 6.13-15**.

Il est à noter que les profondeurs identifiées des substratums rocheux des deux sites sont, respectivement, 38,2 m et 27,9 m.

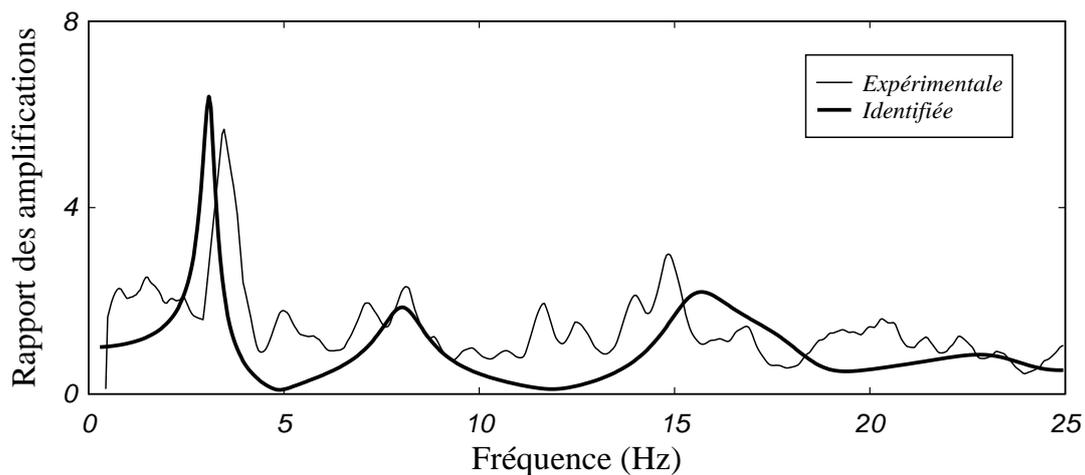


Fig. 6.12. Comparaison entre le rapport des amplifications expérimentales lissé des sites d'Hussein Dey et de Kouba, et le module du rapport des fonctions de transfert, identifié avec le modèle 1.

Ainsi, à partir de deux enregistrements accélérométriques, en surface libre, de chaque site, on a pu avoir :

- les profils de sols des deux sites,
- les caractéristiques des différentes couches,
- les profondeurs des substratums rocheux.

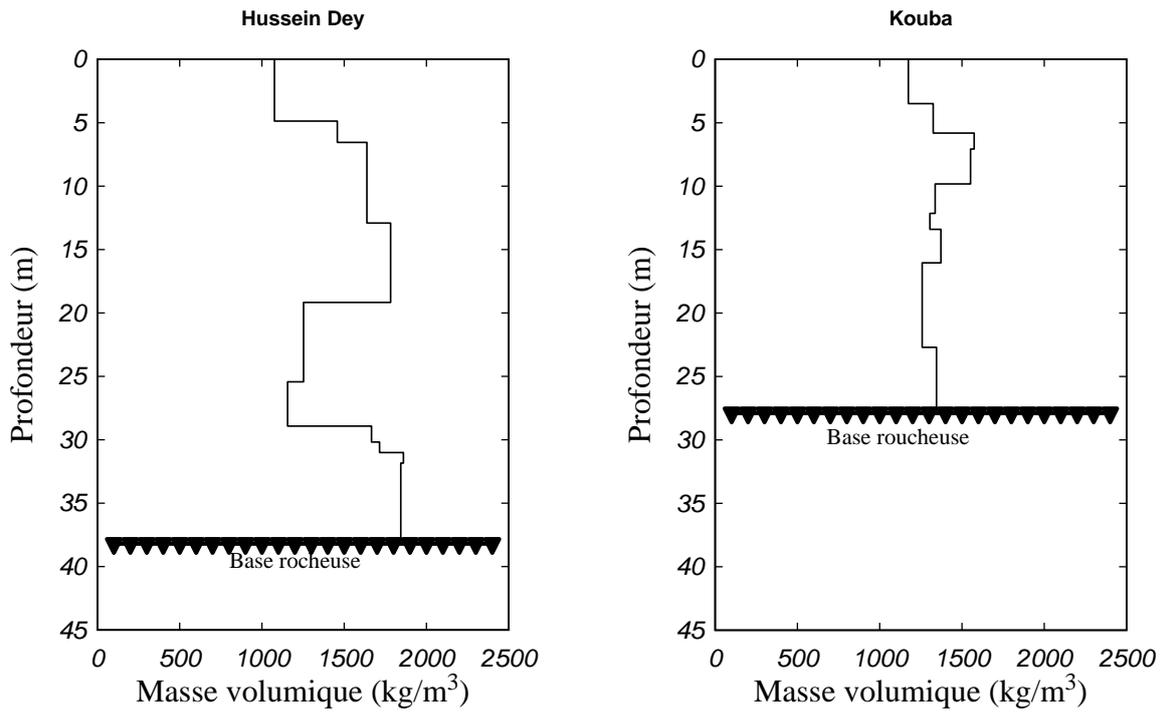


Fig. 6.13. Profils des masses volumiques des sites d’Hussein Dey et de Kouba, identifiés avec le modèle 1.

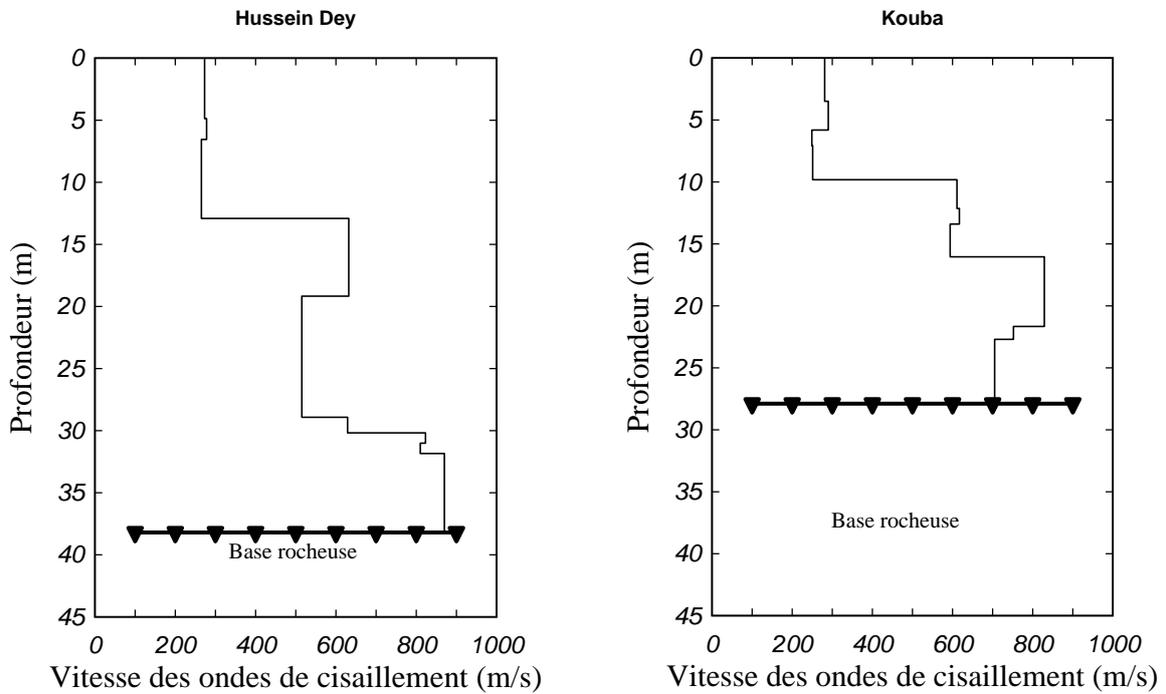


Fig. 6.14. Profils des vitesses des ondes de cisaillement des sites d’Hussein Dey et de Kouba, identifiés avec le modèle 1.

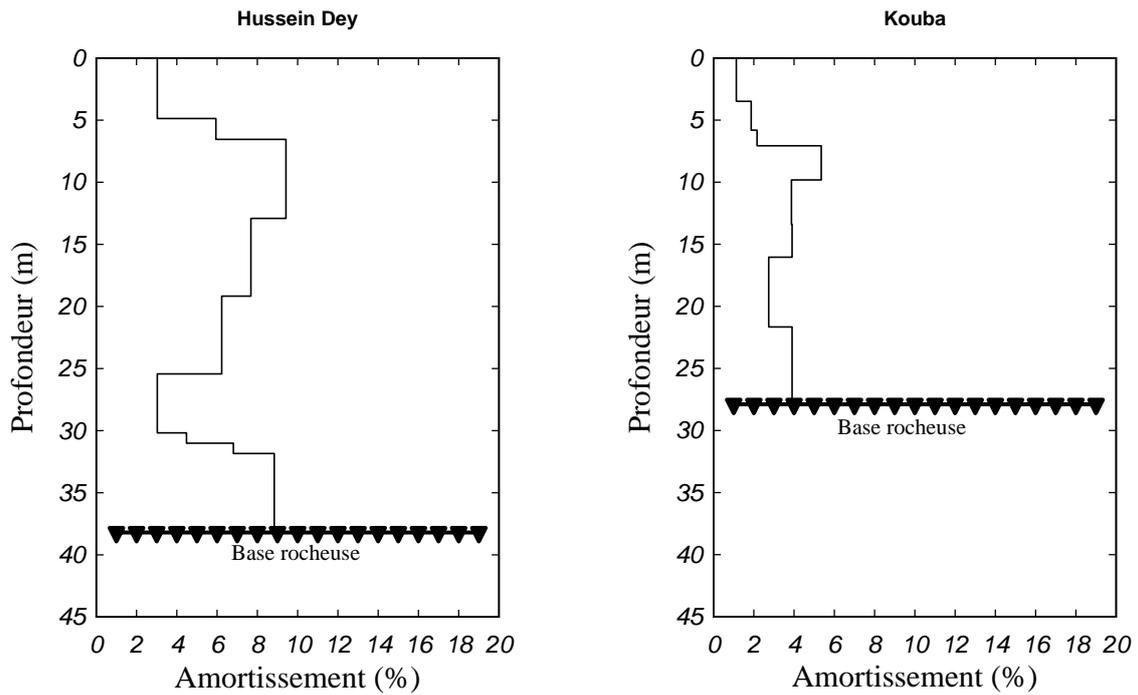


Fig. 6.15. Profils des vitesses des amortissements des sites d'Hussein Dey et de Kouba, identifiés avec le modèle 1.

Lorsqu'on utilise le modèle 2, la procédure identifie 10 paramètres seulement. Dans ce cas, un nombre modéré de générations AGA (44 à 65) et quelques itérations LM (3 à 6) sont nécessaires pour trouver une solution. La **figure 6.16** illustre une comparaison entre la fonction Γ_e et le module de la fonction Γ_m identifiée.

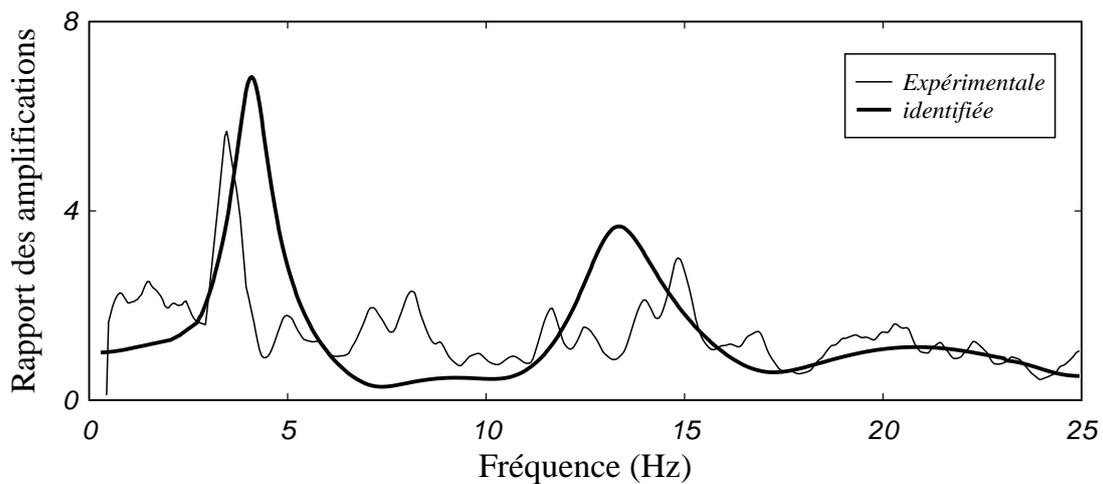


Fig. 6.16. Comparaison entre le rapport des amplifications expérimentales lissé des sites d'Hussein Dey et de Kouba, et le module du rapport des fonctions de transfert, identifié avec le modèle 2.

Les valeurs identifiées sont données dans le **tableau 6.3**. Les variations des vitesses des ondes de cisaillement identifiées en fonction de la profondeur, dans les deux sites, sont présentées sur la **figure 6.17**.

Tab. 6.3. Propriétés des profils de sols des sites d’Hussein Dey et de Kouba, identifiés avec le modèle 2.

Site	p	z_0 (m)	v' (m/s)	ξ (%)	h (m)	ρ_s (kg/m ³)
Hussein Dey	2,98	17,82	2,31	5,38	28,23	1790
Kouba	4,03	11,81	0,52	3,45	29,41	1530

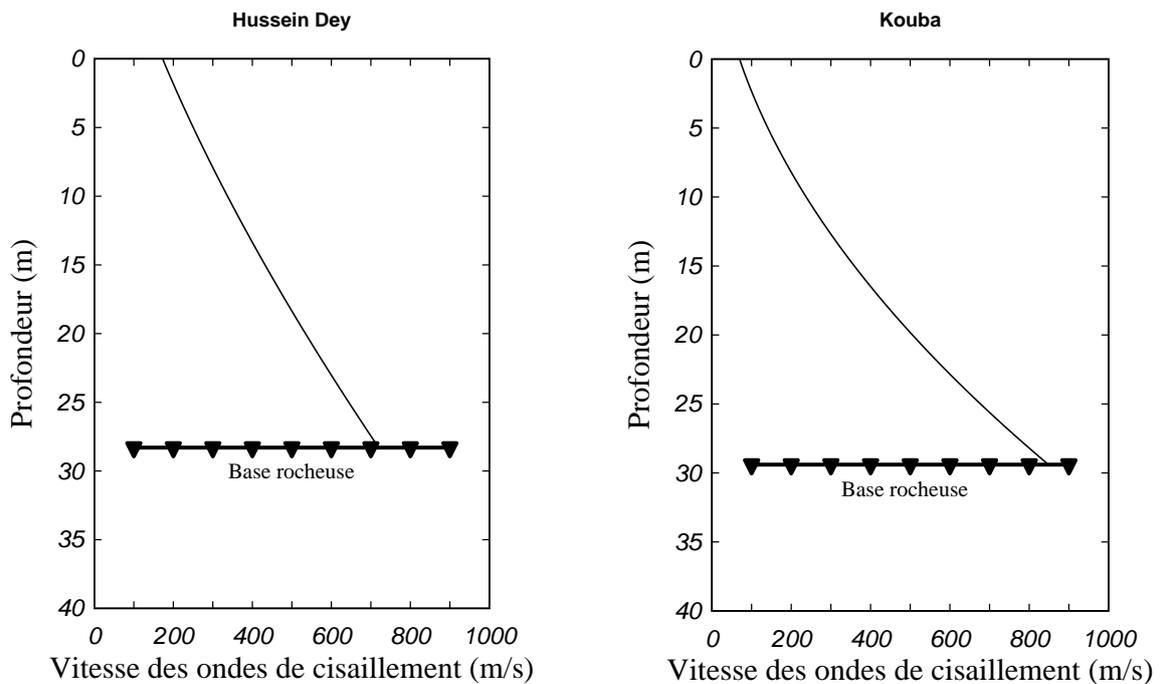


Fig. 6.17. Profils des vitesses des ondes de cisaillement des sites d’Hussein Dey et de Kouba, identifiés avec le modèle 2.

6.4. Conclusion

Dans le présent chapitre, la procédure d’identification a été appliqué pour résoudre deux problèmes réels plus complexes.

Le premier problème consiste à déterminer, à l'aide de la procédure élaborée et des données existantes, les coefficients d'amortissements et l'accélérogramme du séisme dans un site situé dans le voisinage de la ville d'Adapazari (Turquie), encore inexistant avant d'entamer cette étude.

Les résultats montrent que la procédure proposée est très utile pour résoudre des problèmes variés. En effet, la procédure converge toujours vers une solution et les valeurs obtenues sont dans la gamme des valeurs couramment employées en dynamique des sols, avec une bonne concordance entre la FAE et la FAT identifiée.

D'autre part, la procédure a été utilisée avec succès dans la détermination de l'accélérogramme de la réplique du 12 septembre 1999 au site F, non disponible à l'origine de ce travail. L'accélérogramme obtenu est raisonnable et la valeur de l'accélération maximale (égale à 67 Gal) montre que le sous-sol (dépôt alluvial) du site considéré a tendance à amplifier le mouvement en surface, ce qui est en accord avec la théorie d'amplification des mouvements sismiques dans les bassins sédimentaires et peut être considéré dans d'autres études sismiques liées à ce site.

Le deuxième problème consiste à déterminer, simultanément, les profils de sols de deux sites, situés dans les communes d'Hussein Dey et de Kouba, à partir de deux enregistrements accélérométriques en surface libre seulement. Deux modèles sont utilisés celui (i) d'un multi-couches homogènes stratifiées horizontalement, et (ii) d'une couche non-homogène dont le module de cisaillement augmente avec la profondeur.

Dans les deux cas, les profils identifiés sont supposés reposant sur une base rocheuse commune, et sont soumis à des excitations sismiques identiques à la base.

Lorsque le profil de sol est composé de multi-couches homogènes stratifiées horizontalement, la procédure a mis beaucoup de temps pour donner une solution à cause du nombre très important de paramètres à identifier.

Lorsque le profil de sol est composé d'une couche non-homogène dont le module de cisaillement augmente avec la profondeur, la procédure a mis moins de temps pour donner une solution du fait qu'un nombre réduit de paramètres sont déterminés.

Cependant, dans les deux cas, on a pu déterminer :

- les profils de sols des deux sites,
- les propriétés des différentes couches,
- et les profondeurs des substratums rocheux.

Il faut également rappeler, qu'avec les deux modèles utilisés, la solution n'est pas unique, et la procédure d'identification conduit à une large gamme de valeurs possibles pour tous les paramètres.

Ainsi, des améliorations sont encore nécessaires pour orienter la procédure vers les bonnes solutions et améliorer ainsi ses performances.

En conclusion, cette approche ouvre des perspectives pour une caractérisation géotechnique plus complète et plus rigoureuse de sites servant d'assises aux constructions, pour un coût réduit par rapport à l'approche classique utilisant les essais au laboratoire et in-situ.

Conclusion générale et perspectives

1. Conclusion

Les mouvements sismiques observés en surface sont, significativement, influencés par les conditions locales de site. Cet effet de site dépend de la configuration géologique du sous-sol, de la topographie, et de la nature des couches qui le composent. Cependant, la connaissance des conditions de site est, généralement, imparfaite à cause des sources d'information qui restent approximatives, limitées et coûteuses.

Les enregistrements sismiques constituent une source d'informations inestimables et peuvent nous donner d'importantes informations sur le comportement dynamique réel des systèmes géotechniques. C'est dans ce contexte, que se pose la problématique d'analyse inverse en géotechnique : peut-on déterminer le profil de sol sous les stations, ainsi que les propriétés des couches le constituant à partir des enregistrements accélérométriques en surface seulement ?

L'étude présentée dans cette thèse concerne la caractérisation sismique de sites à partir de deux enregistrements accélérométriques en surface libre. Deux approches sont utilisées pour réaliser ce travail. La première consiste à utiliser une méthode purement expérimentale, basée sur l'utilisation de deux méthodes NHVSR et du rapport v_{max}/a_{max} . La deuxième approche consiste à développer un code de calcul qui optimise l'écart entre les résultats du calcul

numérique et les données expérimentales. Ce code de calcul permet d'identifier les paramètres de modèles constitutifs de sol par analyse inverse. En raison de la complexité des systèmes géotechniques, un processus robuste a été élaboré.

La caractérisation sismique, proposée par Bouckovalas et al., (2002) et présentée dans le premier chapitre, a été appliquée sur plusieurs sites du Nord de l'Algérie. Dans ce cas, les trois composantes de l'accélération du sol mesurées par les stations implantées dans ces sites durant le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003, ont été exploitées et analysées.

Les résultats obtenus, qui ont fait l'objet d'une publication [Khellafi et al., 2013], ont montré qu'il est possible de caractériser un site et fournir une description géologique globale du site à partir des enregistrements accélérométriques en surface libre, seulement, sans plus de détails sur le profil de sol ou sur ses caractéristiques géotechniques. Cependant, les descriptions géologiques qui ont été établies pour la région du Nord de l'Algérie ont montré que les valeurs limites fixées par Bouckovalas et al., (2002) ne sont pas adaptées au cas présent car elles sont souvent dépassées, et doivent ainsi être corrigées pour mieux adapter la méthode utilisée au Nord de l'Algérie.

L'étude bibliographique, au chapitre 2, montre que la résolution d'un problème inverse nécessite une bonne compréhension du problème afin de déterminer les contraintes et les critères d'optimisation qu'ils impliquent. Cette revue bibliographique nous a permis de choisir les méthodes qui seront utilisées pour résoudre le problème. Ainsi, pour avoir de meilleures estimations des paramètres recherchés, en moins de temps de calculs, une procédure d'optimisation hybride combinant la méthode d'Algorithme Génétique Adaptative (AGA) et la méthode de Levenberg-Marquardt (LM) est adoptée, dont les principes sont détaillés au chapitre 3. Ce schéma est connu pour sa capacité à résoudre des problèmes complexes, mais il est peu utilisé pour identifier les paramètres de sols à partir de données sismiques.

Le problème inverse est résolu en réduisant au minimum les écarts entre la fonction d'amplification expérimentale et la fonction de transfert d'un modèle de sol défini a priori. Trois objectifs ont été considérés : (i) minimisation de la différence entre les fonctions numérique et expérimentale, (ii) minimisation des écarts entre les fréquences naturelles calculées et mesurées, et (iii) minimisation des écarts entre les pics d'amplifications calculés et mesurés. Les fonctions expérimentales sont évaluées à l'aide de techniques utilisant une

comparaison entre deux enregistrements accélérométriques. D'autre part, quatre modèles unidimensionnels, basés sur la propagation verticale des ondes SH, sont utilisés pour évaluer la fonction de transfert en fonction de différents paramètres de sols. Ces techniques et modèles sont détaillés au chapitre 4.

Au chapitre 5, une étude exhaustive sur l'identification des paramètres de sols est menée pour tester, et valider la procédure élaborée sur deux exemples, l'un numérique et l'autre expérimental utilisant les données enregistrées sur le site de Garner Valley. Les résultats ont montré que la procédure a abouti à des résultats satisfaisants dans tous les cas traités.

Dans le dernier chapitre, la méthode est appliquée à des cas réels. Les résultats obtenus, qui ont fait l'objet d'une publication [Khellafi et al., 2016], ont confirmé les résultats obtenus dans le chapitre précédent. Egalement, la procédure élaborée a été utilisée pour déterminer les profils de sols de deux sites, simultanément, à partir de deux enregistrements accélérométriques en surface libre, seulement. Ainsi, on a pu déterminer : les profils de sols des deux sites, les propriétés des différentes couches, ainsi que les profondeurs des substratums rocheux. Bien que les problèmes étudiés soient sujets à de nombreuses incertitudes, les études menées donnent des résultats consistants quel que soit le nombre de paramètres recherchés.

D'après les résultats obtenus de cette étude, les principales conclusions suivantes peuvent être tirées :

- La méthode proposée par Bouckovalas et al., (2002) peut être utilisée en premier lieu afin de déterminer la nature du site caractérisé. En effet, les descriptions géologiques peuvent être utilisées pour orienter la procédure numérique dans l'identification des paramètres des profils de sols afin d'éviter une recherche trop longue et inutile en définissant des intervalles de recherche plus petits. D'autres méthodes peuvent également être utiles, et le champ reste ouvert aux chercheurs de l'avenir.
- Cette étude montre que la procédure numérique élaborée fonctionne bien et l'identification a été considérée comme satisfaisante avec tous les modèles et méthodes utilisés. Le processus converge presque-sûrement vers le minimum global. Généralement, le nombre de générations AGA de quelques dizaines et quelques itérations LM suffisent pour atteindre la solution finale.

- Ni le nombre croissant de paramètres, ni l'immensité de l'espace de recherche, ni les différences observées au niveau des pics d'amplification calculées par les deux méthodes du rapport spectral standard et rapport inter-spectral, n'ont réduit l'efficacité de la procédure numérique, enregistrant ainsi une marge d'erreur inférieure à 11 %.
- La procédure numérique a pu identifier toutes les propriétés du sol correspondant au modèle d'une couche homogène équivalente. Les résultats obtenus peuvent être considérés comme valeurs moyennes raisonnables.
- La procédure numérique n'a pas été capable d'identifier toutes les propriétés du sol des autres modèles utilisés dans cette thèse. En effet, plusieurs solutions comprenant différentes combinaisons de paramètres ont été obtenues avec une bonne concordance entre la fonction d'amplification mesurée et la fonction de transfert identifiée. Cependant, elle a été utilisée avec succès comme moyen d'ajustement des données existantes. En effet, les valeurs corrigées ont nettement rétabli les pics d'amplification et les fréquences naturelles correspondantes de la fonction théorique calculée avec ceux de la fonction d'amplification mesurée.
- La procédure numérique a été utilisée avec succès lorsque le nombre de paramètres inconnu est réduit. Aussi, elle peut être utilisée comme un moyen efficace pour la détermination de l'amortissement du sol. Ce dernier est un facteur important dans l'évaluation du comportement des sols sous sollicitations sismiques.
- L'utilité de cette procédure peut être étendue pour fournir d'autres paramètres liés aux comportements des sols sous sollicitations sismiques, tel que : accélérations, spectre de réponse, etc. Elle a été utilisée avec succès dans la détermination par déconvolution, d'un accélérogramme manquant d'un site donné à partir d'un autre disponible dans un site voisin.

Ainsi, la procédure d'identification développée dans cette thèse se présente comme un outil d'aide à la caractérisation des sites. Elle marque une avancée importante par rapport aux méthodes, couramment, employées dans la littérature. Toutefois, si ces résultats semblent prometteurs, il est important de garder à l'esprit, que comme dans toute méthode numérique, les résultats doivent être interprétés avec précautions. Une expertise géotechnique reste essentielle pour sélectionner, correctement, les paramètres de sol d'un modèle.

2. Perspectives

Ce travail ouvre des perspectives pour une caractérisation rigoureuse de sites servant d'assise aux constructions, pour un coût réduit comparé à l'approche classique utilisant les essais in-situ et/ou au laboratoire lorsque des mouvements de sol enregistrés lors de séismes antérieurs sont disponibles.

Cette approche a été menée en considérant seulement les effets de sites unidimensionnels relatifs à l'hypothèse de la propagation verticale des ondes SH. Cependant, durant les dernières années, un intérêt considérable est apporté aux effets de site bidimensionnel. Dans ce contexte, il pourrait être possible d'étendre l'approche à l'identification bidimensionnelle des caractéristiques de profils de sol.

Il est, également, possible de développer le problème d'optimisation en considérant d'autres objectifs afin d'en tirer plus d'informations des enregistrements sismiques. On peut, ainsi, imaginer d'utiliser les lois de comportement non linéaires. Ceci peut conduire à développer la procédure d'optimisation pour qu'elle s'adapte mieux avec la réalité.

De même, on peut imaginer de tenir compte plus de l'aspect aléatoire des propriétés du sol en considérant le profil de sol constitué de plusieurs couches à paramètres aléatoires et d'utiliser des lois de comportement de sol plus complexes. En effet, l'une des difficultés majeures rencontrées dans cette étude est la nécessité de disposer d'un modèle numérique capable de reproduire de manière convenable les données expérimentales.

Finalement, cette thèse nous a permis de montrer la pertinence de ce type d'approche pour le génie sismique. Ceci montre que la recherche, en analyse inverse, appliquée en ingénierie géotechnique et sismique (geotechnical earthquake engineering en anglais) reste un sujet d'étude encore largement ouvert.

Références Bibliographiques

- Afra H. (1991).** Identification du comportement sismique de bâtiments à partir de leurs réponses accélérométriques. Thèse de doctorat. Ecole nationale des ponts et chaussées. Paris, France.
- Afra H. & Pecker A. (2002).** Calculation of free field response spectrum of a non-homogeneous soil deposit from bedrock response spectrum. Soil dynamics and earthquake engineering, Vol. 22, No. 2, pp. 157-165.
- Afra H. & Harichane Z. (2007).** Identification de profils de sol de sites à partir de deux enregistrements accélérométriques en surface libre. 7ème Colloque National AFPS 2007, Ecole Centrale Paris, 4-6 juillet, Paris, France.
- Allaire G. (2005).** Analyse numérique et optimisation: une introduction à la modélisation mathématique et à la simulation numérique. Editions Ecole Polytechnique, Paris, France.
- Anbazhagan, P. (2011).** Introduction to Engineering Seismology. National Program on Technology Enhanced Learning (NPTEL).
- Andrews D.J. (1986).** Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size. In earthquake source Mechanics (Ed. By S. Das, J. Boatwright, and C.H. Scholz), American geophysical union, Washington, D.D., pp. 259-268.
- Assimaki D. & Steidl J. (2007).** Inverse analysis of weak and strong motion downhole array data from the $M_w 7.0$ Sanriku-Minami earthquake. Soil dynamics and earthquake engineering. Vol. 27, pp. 73-92.

- Ayadi, A., Maouche, S., Harbi, A., Meghraoui, M., Beldjoudi, H., Oussadou, F., Mahsas, A., Benouar, D., Heddar, A., Rouchiche, Y., Kherroubi, A., Frogneux, M., Lammali, K., Benhamouda, F., Sebai, A., Bourouis, S., Alasset, P. J., Aoudia, A., Cakir, Z., Merahi, M., Nouar, O., Yelles, A., Bellik, A., Briole, P., Charade, O., Thouvenot, F., Semane, F., Ferkoul, A., Deramchi, A., & Haned, S. A. (2003).** Strong Algerian earthquake strikes near capital city. *EOS transactions American geophysical union*, Vol. 84, pp. 561-568.
- Baddari K. & Djeddi M. (1994).** *Elément de sismologie*. Editions O.P.U., Alger, Algérie.
- Baise L.G. & Glaser S.D. (2000).** Consistency of site response estimates made using system identification. *Bulletin of the seismological society of America*. Vol. 90, No. 4, pp. 993-1009.
- Berro A. (2001).** *Optimisation multiobjectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique*. Thèse de doctorat. Université de Toulouse I, France.
- Boatwright J., Fletcher J.B. & Fumal T.E. (1991).** A general inversion scheme for source, site and propagation characteristics using multiply recorded sets of moderate-sized earthquakes. *Bulletin of the seismological society of America*, Vol. 81, pp. 1754-1782.
- Bogaert P. (2005).** *Probabilités pour scientifiques et ingénieurs : Introduction au calcul des probabilités*. Editions De Boeck & Larcier, Bruxelles, Belgique.
- Bonilla L., Steidl J., Lindley G., Tumarkin A. & Archuleta R. (1997).** Site amplification in the San Francisco Valley, California: variability of the site-effect estimation using S wave, coda and H/V methods. *Bulletin of the seismological society of America*, Vol. 87, pp. 710-730.
- Bonilla L.F., Steidl J.H., Gariel J.C. & Archuleta R.J. (2002).** Borehole response studies at the Garner Valley Downhole Array, Southern California. *Bulletin of the seismological society of America*, Vol. 92, No. 8, pp. 3165–3179.
- Bonnans J.F., Gilbert J.C., Lemaréchal C. & Sagastizábal C. (2006).** *Numerical optimization: Theoretical and practical aspects*. Editions Springer, Berlin, Germany.

- Boominathan A. (2004).** Seismic site characterization for nuclear structures and power plants. *Current Science*, Vol. 87, No. 10, pp. 1388-1397.
- Borcherdt R.D. (1970).** Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the seismological society of America*, Vol. 60, pp. 29-61.
- Borcherdt R.D. & Wentworth C.M. (1995).** Strong ground motion generated by the Northridge earthquake of January 17, 1994: Implications for seismic design coefficients and seismic zonation. *Proceeding of the Fifth International Conference on seismic zonation*. October 17-19, Vol. II, pp. 964-971, Nice, France.
- Bouafia A., Frank R., Delage P. & Harichane Z. (2011).** *Introduction à la géotechnique*. Editions OPU, Alger.
- Bouckovalas G.D., Kouretzis G.P., & Kalogeras I.S. (2002).** Site-specific analysis of strong motion data from the September 7, 1999 Athens, Greece Earthquake. *Natural Hazards*, Vol. 27, No. 1-2, pp. 105-131.
- Cambefort H. (1980).** *Géotechnique de l'ingénieur, reconnaissance des sols*. Editions Eyrolles, Paris, France.
- Carlomagno G.M. & Brebbia C.A. (2011).** *Computational methods and experimental measurements XV*. Editions WIT press, Southampton, UK.
- Carvajal J.C., Taboada V.M. & Romo M.P. (2001).** Evaluation of Mexico City Clay Dynamic Properties Using a Parameter Identification Approach. *Proceeding of the Forth international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics*, 26-31 Mars, Missouri, USA.
- Chun C. (2005).** Iterative methods improving newton's method by the decomposition method. *Computers & mathematics with applications*, Vol. 50, No. 10-12, pp. 1559-1568.
- Collette Y. & Siarry P. (2004).** *Multiobjective optimization: principles and case studies*. Editions Springer-Verlag, Berlin, Germany.

- Dantzig G.B. (1990).** Origins of the simplex method. In: S.G. Nash (ed.), Proceeding of the ACM conference on a history of scientific computing, ACM Press, Addison-Wesley Publishing company, New York, pp. 141-151.
- Deb K. (2001).** Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Editions John Wiley & Sons, New York, USA.
- Dimitriu P., Theodulidis N., Hatzidimitriou P. & Anastasiadis A. (2001).** Sediment non-linearity and attenuation of seismic waves: a study of accelerograms from Lefkas, Western Greece. Soil dynamics and earthquake engineering. Vol. 21, No. 1, pp. 63-73.
- Dobry R., Withman R.V. & Roesset J.M. (1971).** Soil properties and the one dimensional theory of earthquake amplification. Report R71-18, M.I.T., Cambridge, MA, USA.
- Dréo J., Pérowski A., Siarry P. & Taillard E. (2003).** Métaheuristiques pour l'optimisation difficile. Editions Eyrolles. Paris, France.
- Duloutre S. (2010).** Utilisation du bruit ambiant pour étudier les couches superficielles.
- Eiben A.E., Marchiori E. & Valkó V.A. (2004).** Evolutionary algorithms with on-the-fly population size adjustment. In: Proceeding of 8th conference on parallel problem solving from nature. Birmingham, UK. In: Lecture notes in computer science, Vol. 3242, pp. 41-50, Springer, Berlin, Germany.
- El Hacem B. (2015).** Apport des outils d'optimisation pour l'identification des lois de comportement mécanique des matériaux. Thèse de doctorat. Université de Lille I, France.
- Erken A., Kaya Z. & Erdem A. (2004).** Ground deformations in Adapazari during 1999 Kocaeli Earthquake. 13th world conference on earthquake engineering, Paper No. 1510, Canada.
- Filliat G. (1981).** La pratique des sols et fondations. Editions Moniteur, Paris, France.

- Field E.H. & Jacob K.H. (1995).** A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent. Bulletin of the seismological society of America, Vol. 85, No. 4, pp. 1127-1143.
- Fishman G. (1997).** Monte-Carlo: concepts, algorithm and applications. Editions Springer-Verlag, New York, USA.
- Garcia S.R. & Romo M.P. (2004).** Dynamic soil properties identification using earthquake records: a NN approximation. In: Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, August 1-6, Vancouver, Canada.
- Gazetas G. (1982).** Vibrational characteristics of soil deposits with variable wave velocity. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol. 6, No. 1, pp. 1-20.
- Gen M. & Cheng R. (2000).** Genetic algorithms and engineering optimization. Editions John Wiley & Sons, New York, USA.
- Ghayamghamian M.R. & Motosaka M. (2001).** Identification of dynamic soil properties using vertical array recordings. Proceedings of the 4th international conference on earthquake geotechnical engineering, 25-28 June, Thessaloniki, Greece.
- Glover F. & Laguna M. (1997).** Tabu search. Editions Kluwer Academic Publishers. Boston, USA.
- Goldberg D.E. (1989).** Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Editions Addison Wesley Publishing Company, USA.
- Goudie A., Lewin J., Richards K., Anderson M., Burt T., Whalley B. & Worsley P. (1990).** Geomorphological Techniques. Editions Taylor & Francis, New York, USA.
- Hadid M. & Afra H. (2000).** Sensitivity analysis of site effects on response spectra of pipelines. Soil dynamics and earthquake engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 249-260.

- Harichane Z. (2005).** Modélisation du comportement sismique des sols à partir de données accélérométriques. Thèse de doctorat. Université des Sciences et Technologie d'Oran, Algérie.
- Harichane Z., Afra H. & Elachachi S.M. (2005).** An identification procedure of soil profile characteristics from two free field accelerometer records. Soil dynamics and earthquake engineering. Vol. 25, No. 6, pp. 431-438.
- Hestenes M. & Stiefel E. (1952).** Methods of conjugate gradients for solving linear systems. Journal of research of the national bureau of standards, Vol. 49, No. 6, pp. 409-436.
- Holland J. (1975).** Adaptation in natural and artificial systems. Thèse de doctorat, University of Michigan, USA.
- Huang H.C., Shieh C.S. and Chiu H.C. (2000).** Linear and nonlinear behaviors on a soil site using Lotung downhole array in Taiwan. 12th World conference on earthquake engineering, February 1-4, Auckland, New Zealand.
- Huang A.B. & Mayne P.W. (2008).** Geotechnical and geophysical site characterization. Editions Taylor & Francis, London, UK.
- Ito A., Üçer B., Barış Ş., Nakamura A., Honkura Y., Kono T., Hori S., Hasegawa A., Pektaş R. & Işıkara A.M. (2002).** Aftershock activity of the 1999 Izmit, Turkey, earthquake revealed from microearthquake observations. Bulletin of the seismological society of America, Vol. 92, No. 1, pp. 418-427.
- Jafarian Y., Kermani E. & Baziar M.H. (2010).** Empirical predictive model for the v_{max}/a_{max} ratio of strong ground motions using genetic programming. Computers & geosciences. Vol. 36, No. 12, pp 1523-1531.
- Jozefowicz N. (2013).** Optimisation combinatoire multi-objectif : des méthodes aux problèmes, de la Terre à (presque) la Lune. Thèse d'habilitation à diriger des recherches. Institut national polytechnique de Toulouse, France.

- Khellafi A.M., Harichane Z., Afra H. & Sadouki A. (2013).** A case study of accelerometric records analysis of May 21st, 2003, Boumerdes (Algeria) earthquake. *International journal of geotechnical earthquake engineering*, Vol. 4, No. 2, pp 34-52.
- Khellafi A.M., Afra H., Harichane Z., Chehat A. (2015a).** Identification des caractéristiques d'une couche de sol non homogène à paramètres aléatoires à partir d'enregistrements accélérométriques en utilisant une méthode d'optimisation hybride multi-objective. 9ème Colloque National AFPS 2015, 1-2 décembre, IFSTTAR Marne la Vallée, France.
- Khellafi A.M., Afra H., Harichane Z. & Chehat A. (2015b).** Identification des caractéristiques de profils de sols à partir d'enregistrements accélérométriques en utilisant une méthode d'optimisation hybride multi-objectif. 13th Arab Structural Engineering Conference, 13-15 décembre, Université de Blida 1.
- Khellafi A.M., Harichane Z., Afra H. & Erken A. (2016).** Prediction of parameters of soil stratum and earthen dams from free field acceleration records. *International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering*, Vol. 7, No. 1, pp 33-56.
- Kiran S.R., Nagaraju S.S. & Varadarajan S. (2011).** A hybrid technique for frequency domain identification of servo system with friction force. *International journal of engineering science and technology*, Vol. 3, No. 3, pp 2020-2030.
- Kitagawa Y., Okawa I. & Kashima T. (1992).** Observation and analyses of dense strong ground motions at sites with different geological conditions in Sendai. *Proceeding of the international Symposium on the effects of surface geology on seismic Motion*. Association of earthquake disaster prevention. March 25-27, Vol.1, pp. 311-316, Odawara, Japan.
- Komazawa M., Morikawa H., Nakamura K., Akamatsu J., Nishimura K., Sawada S., Erken A. & Onalp A. (2002).** Bedrock structure in Adapazari, Turkey – a possible cause of severe damage by the 1999 Kocaeli earthquake. *Soil dynamics and earthquake engineering*. Vol. 22, pp. 829-836.

- Kramer S.L. (1996).** Geotechnical earthquake engineering. Editions Prentice Hall, New York, USA.
- Kudo K., Kanno T., Okada H., Özel O., Erdik M., Takahashi M., Sasatani T., Higashi S. & Yoshida K. (2000).** Site Specific Issues on Strong Ground Motion during the Kocaeli, Turkey Earthquake of August 17, 1999, as Inferred from Array Observations of Microtremors and Aftershocks. Bulletin of the seismological society of America, Vol. 92, No. 1, pp. 448-465.
- Kurita T. & Matsui K. (1998).** Sensitivity analysis on measurement noise in the identification of soil properties from vertical array observation data. Earthquake engineering and structural dynamics, Vol. 26, No. 9, pp. 951-965.
- Landau I.D. (1998).** Identification des systèmes. Editions Hermès, Paris, France.
- Levasseur S. (2007).** Analyse inverse en géotechnique : développement d'une méthode à base d'algorithmes génétiques. Thèse de doctorat. Université de Grenoble I, France.
- Levenberg K. (1944).** A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. Quarterly of Applied Mathematics 2, pp. 164-168.
- Liu B., Beghou L. & Pichon L. (2008).** Adaptive genetic algorithm based source identification with near-field scanning method. Progress in electromagnetics research B, Vol. 9, pp. 215-230.
- Maouche S., Harbi A. & Meghraoui M. (2008).** Attenuation of intensity for the Zemmouri earthquake of 21 May 2003 (Mw 6.8): Insights for the seismic hazard and historical earthquake sources in northern Algeria. In J. Fréchet, M. Meghraoui, & M. Stucchi, (Eds.), Historical seismology – Interdisciplinary studies of Past and recent earthquakes (pp. 327-350). Editions Springer, Germany.
- Magnin V. (1998).** Contribution à l'étude et à l'optimisation de composants optoélectroniques. Thèse de doctorat. Université de Lille I, France.
- Manolis G.D. (2002).** Stochastic soil dynamic. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 3-15.

- Marquardt D. (1963).** An algorithm for least-squares estimation of non linear parameters. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, Vol. 11, No. 1, pp. 431-444.
- Masahiko H. & Shin O. (2006).** Response control and seismic isolation of buildings. Editions Routledge, London, UK.
- Meghraoui M. (1988).** Géologie des zones sismiques du nord de l'Algérie : Paléosismologie, tectonique active et synthèse sismotectonique. Thèse de doctorat, Université Paris XI, France.
- Meslem A., Yamazaki F., Maruyama Y., Benouar D., Laouami N. & Benkaci N. (2010).** Site-response characteristics evaluated from strong motion records of the 2003 Boumerdes, Algeria, earthquake. Earthquake Spectra, Vol. 26, pp. 803-823.
- Mikami A., Sawada T. & Ekawa T. (2003).** Identification of non-linear and non-stationary soil properties during the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake. Soil dynamics and earthquake engineering, Vol. 23, No. 4, pp. 279-286.
- Nakamura Y. (1989).** A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. QR railway technical research institute, Vol. 30, No. 1.
- Nelder J. A. & Mead R. (1965).** A Simplex method for function minimization. Computer Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 308-313.
- Nelles O. (2001).** Nonlinear system identification: from classical approaches to neural networks and fuzzy models. Editions Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Németh J., Vargha B. & Kollár I. (1999).** Online frequency domain system identification based on a virtual Instrument. Proceeding IEEE instrumentation and measurement technology conference, IMTC/99, pp. 1211-1216, Venice, Italy.
- Newmark N.M. (1973).** A study of vertical and horizontal earthquake spectra. Newmark consulting engineering services, directorate of licensing. U.S. Atomic energy commission, Washington, D.C, USA.

- Nie J., Xu J. & Costantino C. (2007).** P-CARES: Probabilistic computer analysis for rapid evaluation of structures, NUREG/CR-6922, Brookhaven National Laboratory, Washington, USA.
- NRC (2006).** National Research Council: Improved Seismic Monitoring, Improved Decision-Making, Assessing the Value of Reduced Uncertainty. National Academies Press, Washington, D.C., USA.
- Numerical Recipes in Fortran 90 (1996).** 2nd Editions, edited by William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, and Brian P. Flannery. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Pecker A. & Mohammadioun B. (1991).** Downhole instrumentation for the evaluation of non-linear soil response on ground surface motion. In: 11th structural mechanics in reactor technology conference, K: 33-38, Tokyo, Japan.
- Pecker A. (1995).** Validation of small strain properties from recorded weak seismic motions. Soil dynamics and earthquake engineering, Vol. 14, pp. 399-408.
- Pham N. & Wilamowski B. M. (2011).** Improved Nedler Mead's Simplex method and applications. Journal of Computing, Vol. 3, No. 3, pp. 55-63.
- Philipponnat G. & Hubert B. (1979).** Fondations et ouvrages en terre. Editions Eyrolles, Paris, France.
- Popper K. (1997).** Toute vie est résolution de problèmes. Editions Actes Sud, Paris, France.
- Renalier F. (2010).** Caractérisation sismique de sites hétérogènes à partir de méthodes actives et passives : variations latérales et temporelles. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble I, France.
- Russel S. & Norvig P. (1995).** Artificial intelligence, a modern approach. Editions Prentice Hall, New Jersey, USA.

- Sadouki A., Harichane Z. & Chehat A. (2012).** Response of a randomly inhomogeneous layered media to harmonic excitations. *Soil dynamics and earthquake engineering*, Vol. 36, pp. 84-95.
- Şafak E. (1991).** Problems with using spectral ratios to estimate site amplification. In: *Proceedings of the 4th international conference on seismic zonation*, Vol 2, pp. 227-284, Stanford University, California, USA.
- Şafak E. (1995).** Discrete-time analysis of seismic site amplification. *Journal of engineering mechanics*, Vol. 121, No. 7, pp. 801-809.
- Şafak E. (1997).** Models and methods to characterize site amplification from a pair of records. *Earthquake Spectra*, Vol. 13, No. 1, pp. 97-129.
- Srivinas N. & Deb K. (1993).** Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. Technical Report, Department of Mechanical Engineering, Institute of Technology, India.
- Steidl J.H., Archuleta R.J., Tumarkin A.G. & Bonilla L.F (1998).** Observations and modeling of ground motion and pore pressure at the Garner Valley, California, test site. *Proceeding 2nd international symposium on the effects of surface geology on seismic motion*, pp 225-232. Yokohama, Japan, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Stoffa P.L. & Sen M.K. (1991).** Nonlinear multiparameter optimization using genetic algorithms: inversion of plane-wave seismograms. *Geophysics*, Vol. 56, No. 11, pp. 1794-1810.
- Tokimatsu K. & Sekiguchi T. (2001).** Site effects estimated from microtremor measurements at selected strong motion stations in Taiwan. *Proceeding of the Forth international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics*, 26-31 Mars, Missouri, USA.
- Towhata I. (1996).** Seismic wave propagation in elastic soil with continuous variation of shear modulus in the vertical direction. *Soils and foundations*, Vol. 36, No. 1, pp. 61-72.

- Towhata I. (2008).** Geotechnical earthquake engineering. Editions Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Travasrou T. & Gazetas G. (2004).** On the linear seismic response of soils with modulus varying as a power of depth-the Maliakos marine clay. *Soils and foundations*, Vol. 44, No. 5, pp. 85-93.
- Tsai F.T.C., Sun N.Z. & Yeh W.W.G. (2003).** Global-local optimization for parameter structure identification in the three-dimensional groundwater modeling. *Water resources research*, Vol. 39, No. 2, pp. 1-13.
- Vera-Grunauer X., Bray J.D., Pestana J.M., Kayen R., Tandazo E., Ramirez J., Vera-runauer J.G. & Mera-Ortiz W. (2006).** Site characterization and seismic zonation of guayaquil city, Ecuador. *Proceedings of the 8th U.S. National conference on earthquake engineering*. Paper No. 1467, April 18-22, San Francisco, USA.
- Zeghal M., Elgamal A.W., Tang H.T. & Stepp J.C. (1995).** Lotung downhole array. II: FNo. 4, pp. 363-378.
- Zerva A., Petropulu A.P. & Abeyratne U. (1995).** Blind deconvolution of seismic signals in site response analysis. *Proceeding of the Fifth international conference on seismic zonation*.
- Zitzler E. & Thiele L. (1998).** An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: the strength Pareto approach. TIK-Report No 43.

RESUME

La réduction du risque sismique dans les régions à forte sismicité nécessite des études détaillées qui doivent inclure des paramètres mécaniques et physiques des profils de sols sur la profondeur d'investigation. La reconnaissance et l'identification de ces paramètres passent inévitablement par des essais in-situ et/ou au laboratoire afin d'apprécier le comportement des sols vis-à-vis des mouvements sismiques. Cependant, ces essais sont généralement très coûteux et nécessitent du matériel lourd et du personnel très qualifié. Récemment, les méthodes d'optimisation ont montré une grande capacité pour résoudre les problèmes complexes dans diverses disciplines en engineering. L'utilisation des méthodes d'optimisations telles que la méthode de Levenberg-Marquart ou les Algorithmes Génétiques ont permis d'obtenir des résultats satisfaisants. En combinant ces deux méthodes on aboutit à une méthode hybride qui garantit des solutions plus appréciables. Ce travail consiste à fournir une autre approche expérimentale, analytique et numérique pour identifier les caractéristiques de profils de sol et réduire ainsi considérablement le coût de l'opération. Cette approche utilise les enregistrements sismiques et une procédure d'optimisation hybride. Les résultats escomptés devraient contribuer à réduire le coût des investigations et de renforcer la sécurité des constructions bâties dans les zones à forte sismicité.

Mots clés : profil de sol, caractéristiques mécaniques et physiques, enregistrements sismiques, identification, algorithme génétique adaptatif, Levenberg-Marquart.

ABSTRACT

The reduction of seismic risk in areas of high seismicity requires detailed studies including mechanical and physical parameters of soil profiles on the depth of investigation. Recognition and identification of these parameters inevitably pass by in-situ and/or laboratory tests to assess the behavior of soils to seismic motions. However, these tests are very expensive and require heavy equipment and highly qualified personnel. Recently, optimization methods have shown potential achievements to overcome such problems in various disciplines of engineering. The use of optimization methods such as Levenberg-Marquart method or Genetic Algorithms has produced satisfactory results. Combining these two methods leads to a hybrid method that guarantees more favorable results. This work consists in developing another analytical, numerical and experimental approach to identify the characteristics of soil profiles and reduce significantly the cost of the operation. This approach uses seismic data records and hybrid optimization procedure. The expected results should help us to reduce the cost of investigations and enhance the safety of buildings in high seismic areas.

Keywords: soil profile, mechanical and physical characteristics, seismic records, identification, adaptive genetic algorithm, Levenberg-Marquart.