

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et la recherche scientifique

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMEN



**Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Civil**

Mémoire

Pour l'obtention du Diplôme de Magister en Génie Civil

Option : Matériaux-Structures-Géotechniques

Thème

***ESTIMATION DU RISQUE LIE A L'EFFET DE SITE
ET GENERATION D'UN SPECTRE DE REPONSE
A LA SURFACE LIBRE***

Présenté par

DERRAS Boumédiène

Soutenu le 12 juillet 2004 devant le jury composé de

| | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------|--------------|
| M^f F.GHOMARI | Maître de conférences | (Université ABB-Tlemcen) | Président |
| M^f A.BEKKOUCHE | Maître de conférences | (Université ABB-Tlemcen) | Encadreur |
| M^f D.ZENDAGUI | Chargé de cours | (Université ABB-Tlemcen) | Co-Encadreur |
| M^f N.E.HANNACHI | Professeur | (Université MM-Tizi Ouzou) | Examineur |
| M^f D.D.RAHAL | Maître de conférences | (Université USTO-Oran) | Examineur |
| M^f M.DJAFOUR | Chargé de cours | (Université ABB-Tlemcen) | Examineur |

Remerciements

Remercions en premier lieu, Dieu tout puissant de nous avoir permis de mener à bien et d'achever ce modeste travail.

Une vive gratitude s'adresse à l'encadreur A.Bekkouche pour ses conseils fructueux et ses suggestions judicieuses et au co-encadreur D.Zendagui pour ses instructions précieuses et son aide à la réalisation de cet ouvrage.

Une sincère reconnaissance s'impose à l'honneur du président de jury Monsieur F.Ghomari, ainsi qu'à Messieurs : N.E.Hannachi, D.D.Rahal et M.Djafour qui ont bien accepté d'examiner le présent mémoire.

Cette tâche aurait été impossible sans le soutien et l'aide des membres de ma famille, qu'ils trouvent ici l'expression de ma gratitude.

Pour conclure, une pensée s'adresse à chaque personne ayant contribué -de près ou de loin- à l'élaboration de ce modeste travail; et que les expressions manquent pour exprimer les reconnaissances les plus sincères.

Résumé

Les leçons tirées des violents tremblements de terre passés, montrent que les dégâts les plus importants ne sont pas nécessairement limités à la proximité immédiate du foyer du séisme, mais qu'ils peuvent également survenir à de grandes distances. Les dégâts les plus importants se sont produits à plusieurs centaines de kilomètres de l'épicentre autant à Mexico en 1985 qu'à San Francisco en 1989. Dans les deux cas, l'effet de site est le responsable de la grande majorité des dégâts : les mouvements étaient amplifiés et conduisaient à un accroissement de l'intensité.

Parmi les approches qui ont été largement utilisées ces dernières années comme un outil de modélisation efficace dans différents domaines, la méthode de réseaux de neurones artificiels qui représente l'outil de base de l'étude de l'effet de site dans le présent travail. Pour cela, deux systèmes de réseaux de neurones sont développés : le premier est basé sur le modèle linéaire équivalent, et le deuxième sur les événements réels enregistrés en surface et en profondeur, afin d'une part, d'estimer le niveau de risque lié à l'effet de site à partir des facteurs d'amplification spectrale et d'autre part, de se prononcer sur la capacité de la méthode neuronale à tracer le spectre de réponse en surface à partir de celui enregistré sur un site de référence, en tenant compte des propriétés élastiques du profil par une classification de site basée sur deux paramètres : la vitesse de cisaillement moyenne sur trente mètres de profondeur et la fréquence caractéristique du sol.

Afin de valider les deux systèmes neuronaux, quatre exemples sont présentés. Il en résulte que, les deux systèmes sont bien placés pour estimer le niveau de risque sous des sollicitations faibles à modérées en signalant une sous-estimation du risque sous une excitation forte pour le premier système neuronal, en outre, les spectres de réponses générés à la surface libre par le deuxième système neuronal peuvent donner des approximations intéressantes du point de vu engineering.

Mots clés

séisme- l'effet de site- réseaux de neurones- modèle linéaire équivalent- niveau de risque- amplification spectrale- spectre de réponse- classification de site.

Abstract

The lessons drawn from the violent ones earthquakes recent great, show that the most important damage is not necessarily limited in the immediate vicinity of the focus of the seism, but which they can also occur at long distances. The most important damage occurred to several hundreds of kilometers of the epicenter as much in Mexico City in 1985 and in San Francisco in 1989. In both cases, the site effect is the responsible of the great majority of the damage: the movements were amplified and led to an increase in intensity.

Among the approaches which gained these last years fully as an effective tool of modeling in various fields is the method of artificial neural networks which represents the basic tool of the study of the site effect in this work. For that, two systems of neural networks are developed: the first one is based on the equivalent linear model and the second on the real events recorded on the surface and in-depth, in order to a share, to estimate the level of risk related to the effect of site starting from the factors of spectral amplification and in addition, to decide on the capacity of the neuronal method to draw the spectrum of response on the surface from that recorded on a site of reference, by taking account of the elastic properties of the profile by site classification based on two parameters: the average of shear velocity on thirty meters of depth and the frequency characteristic of the soil.

In order to validate the two neuronal systems, four examples are presented. It results from it that the two systems are well established to estimate the level of risk under weak requests at moderate by announcing an undervaluation of the risk under a strong excitation for the first neuronal system. Moreover, the response spectrum generated to the free face by the second neuronal system can give interesting approximations regarding the point of engineering view.

Key words

Earthquake - site effect- neural networks- equivalent linear model- Level of risk - spectral amplification- response spectrum- site classification.

الملخص

الدروس المستخلصة من الهزات القوية الماضية، تبين أن الخسائر المهمة لا تنحصر بالضرورة في المناطق القرية من مركز الهزة. ولكنها قد تكون حاضرة أيضا على مسافات كبيرة. غالبية الخسائر المهمة التي أحدثها زلزال مكسيكيو 1985 و سان فرنسيسكو 1998 تم ملاحظتها على بعد مئات الكيلومترات من المركز. في كلتا الحالتين، تأثير الموقع هو المسؤول على غالبية الخسائر: حركة الأرض كبرت و أحدثت تصاعد في شدة الهزة.

من بين المقاربات التي لقيت صدا كبيرا في لسنوات الأخيرة كأداة تشكيل فعالة في عدة ميادين، طريقة شبكة العصبونات الاصطناعية التي تعتبر الأداة الأساسية المستعملة في هذا العمل لدراسة تأثير الموقع من أجل هذا، تم إحداث نظامين يعملان بهذه الطريقة: الأول يركز أساسا على النموذج الخطي المعادل و الثاني على الأحداث الحقيقية المسجلة على سطح الأرض و في أعماقها. وهذا من جهة، لتقدير مستوى الخطر المرتبط بتأثير الموقع اعتمادا على معامل التكبير الخطي، و من جهة أخرى، لمعرفة قدرة شبكة العصبونات على رسم طيف الإجابة على السطح اعتمادا على الطيف المسجل على موقع مرجعي، مع الأخذ بعين الاعتبار خصائص مرونة مقطع الموقع بتصنيفه تصنيفا يركز على: سرعة القص المتوسطة على عمق ثلاثون مترا و الارتداد المميز للموقع.

لتجربة النظامين، تم اختيار أربعة أمثلة. النتائج المحصل عليها تبين أن النظامين يسمحان بتقدير مستوى الخطر تقديرا جيدا تحت تأثير حمل ضعيف إلى متوسط مع ملاحظة ضعف في تقدير الخطر بالنسبة للنظام لعصبوني الأول وهذا تحت تأثير حمل قوي. زيادة على هذا، إن أطراف الإجابة المولدة على سطح الأرض من طرف النظام العصبوني الثاني تستطيع إعطاء نظرة تقريبية من وجهة نظر هندسية.

المفردات الأساسية

الزلازل - تأثير الموقع - شبكة العصبونات الاصطناعية - النموذج الخطي المعادل - مستوى الخطر - التكبير الطيفي - طيف الإجابة - تصنيف الموقع.

Sommaire

| | |
|--|----|
| Chapitre I : Introduction générale | 1 |
| I.1.Introduction | 1 |
| I.2. Organisation..... | 2 |
| Chapitre II : Aperçu sur les Méthodes d'estimations des effets locaux de site | 4 |
| II.1. Introduction | 4 |
| II.2. Faits marquants dans l'histoire de la prise en compte de l'effet de site | 4 |
| II.3. Méthodes d'estimation des effets locaux de site..... | 9 |
| II.3.1. Approches expérimentales –Mesures in situ et observations sur site | 10 |
| II.3.1.1. Réseau en puits..... | 10 |
| II.3.1.2. Rapport site sur référence «mouvement sur sol sédimentaire / mouvement sur sol rigide» | 10 |
| II.3.1.3. Rapport H/V « mouvement horizontal / mouvement vertical » | 11 |
| II.3.1.4. Traitement du signal..... | 12 |
| II.3.1.5. Observation post-séismique (Sans enregistrements)..... | 13 |
| II.3.1.6. Utilisation des stations multiples et des Séismes..... | 14 |
| II.3.2. Approche numérique..... | 16 |
| II.3.3. Approches empiriques | 16 |
| II.3.3.1. Paramètres géotechniques/amplification | 16 |
| II.3.4. Approche neuronale | 18 |
| II.3.4.1. générations d'un accélérogramme (surface libre/substratum rocheux)..... | 18 |
| II.3.4.2. générations d'un spectre de réponse en accélération (surface libre/site de référence)..... | 18 |
| II.3.4.3 Estimation du risque (rapport d'amplification spectral « site/référence ») | 19 |
| II.4. Description des travaux..... | 19 |
| II.5. Conclusion..... | 20 |
| Chapitre III : Modèles d'analyse de la réponse sismique | 21 |
| III.1. Introduction..... | 21 |
| III.2. Analyse de la réponse sismique d'un profil de sol stratifié horizontalement | 21 |
| III.2.1 Modélisation du sol en milieu continu. | 21 |
| III.2.2. Différentes étapes de calcul de la réponse du sol..... | 26 |
| III.2.2.1.Solution pour un problème Mono-couche | 27 |
| III.2.2.2. Solution pour un problème bicouche et multicouche | 30 |
| III.3. Modèle linéaire-équivalent pour un profil de sol..... | 32 |

| | |
|---|----|
| III.4. Étude comparative et analyse des résultats | 35 |
| III.4.1. Test sur le site de Oita-Ken..... | 35 |
| III.4.1.1. Présentation du site | 35 |
| III.4.1.2. Calcul effectué | 36 |
| III.4.1.3. Analyse des résultats..... | 38 |
| III.4.2. Test sur le site de Shimane | 39 |
| III.4.2.1. Présentation du site | 39 |
| III.4.2.2. Calcul effectué | 40 |
| III.4.2.3. Analyse des résultats..... | 42 |
| III.5. Conclusion | 43 |
| Chapitre IV : paramètres de la classification des sites..... | 44 |
| IV.1. Introduction | 44 |
| IV.2. Définition des deux paramètres V_{s30} et F_0 | 44 |
| IV.3. Classification de site suivant V_{s30} | 45 |
| IV.4. Étude critique et analyse des résultats..... | 47 |
| IV.5. Conclusions | 50 |
| Chapitre V : Estimation du risque lié à l'effet de site et génération d'un spectre de réponse..... | 51 |
| V.1. Introduction | 51 |
| V.2. Classification des sites..... | 51 |
| V.3. Génération de l'accélération à la surface libre | 54 |
| V.4. Influence des deux paramètres V_{s30} et F_0 sur l'accélération horizontale maximale | 56 |
| V.5. Choix d'un critère de classification pour le mouvement sismique en surface..... | 58 |
| V.6. Réseau de neurones artificiel(RNA)..... | 63 |
| V.6.1. Définitions | 63 |
| V.6.1.2. Réseau Perceptron multicouches (PMC) à rétropropagation du gradient | 63 |
| V.6.1.3. Apprentissage du PMC | 64 |
| V.6.2. Type et l'architecture du réseau de neurones utilisé..... | 65 |
| V.6.3. Test et analyse des résultats..... | 67 |
| V.7. Génération d'un spectre de réponse à la surface libre | 69 |
| V.7.1. Description de la Base de données utilisées..... | 69 |
| V.7.2. Type et architecture du réseau de neurones..... | 72 |
| V.7.3. Phase test..... | 78 |
| V.7.3.1. Tests sous d'autres enregistrements..... | 78 |
| V.8. Conclusions | 81 |
| Chapitre VI : Validation, exploitation des modèles etanalyse des résultats..... | 83 |

| | |
|--|-----|
| VI.1. Introduction | 83 |
| VI.2. Validations des deux modèles neuronaux et analyse des résultats | 83 |
| VI.2.1. Site de HYOGO (Japon) | 84 |
| VI.2.1.1. Présentation du site | 84 |
| VI.2.1.2. Estimation du niveau de risque par SRISQ | 85 |
| VI.2.1.3. Génération des accélérations spectrales et estimation du risque par SKRISQ | 87 |
| VI.2.2. Site de OKAYAMA-TOTTORI | 89 |
| VI.2.2.1. Présentation du site | 89 |
| VI.2.2.2. Estimation du risque et génération des spectres | 92 |
| VI.2.2.2.1. Analyse des résultats | 94 |
| VI.3. Exploitation des deux modèles neuronaux | 96 |
| VI.3.1. Séisme de Chenoua 1989 | 96 |
| VI.3.2. Séisme de Boumerdès 2003 | 100 |
| VI.4. Conclusion | 105 |
| Chapitre VII : Conclusion générale | 106 |
| Références bibliographiques | 109 |
| Annexes | 113 |
| 1 Annexe 1 : Notions générales sur les réseaux de neurones artificiels | 114 |
| 2 Annexe 2 : Description générale de EERA | 128 |
| 3 Annexe 3 : Denses réseaux d'accélérographes | 131 |
| 4 Annexe 4 : Présentation de quelques classifications de sites | 135 |
| 5 Annexe 5 : Aperçu sur les deux codes de calcul SRISQ et SKRISQ | 137 |

CHAPITRE I :

INTRODUCTION GENERALE

I.1.Introduction

A l'instar de beaucoup d'autre pays, l'Algérie du nord est une région à haut risque sismique. A cet effet, on rappelle les deux grands séismes majeurs qui ont frappé la région d'El-Asnam le 10 octobre 1980, d'une magnitude de 7.3 et celle de Boumerdes le 21 mai 2003, d'une magnitude de 6.8. Cependant, l'estimation correcte des actions sismiques auxquelles les structures peuvent être soumises est une donnée essentielle dans tous les cas de projet de construction parasismique, d'évaluation de la vulnérabilité du bâti existant ou de définition de plans urbains d'exposition aux risques. L'expérience a montré que dans une zone donnée, les mouvements en des points distincts peuvent être extrêmement différents en terme d'amplitude, de durée et de contenu fréquentiel. Les signaux sont influencés par la distance épacentrale, par l'orientation par rapport au plan de rupture et par le chemin suivi par les ondes. Cependant, les éléments géométriques liés à la source ne sont pas suffisants pour expliquer les observations. Il est maintenant reconnu que les effets de conditions locales de site peuvent avoir une influence très forte sur les mouvements sismiques. Par définition, les effets de sites sont des phénomènes vibratoires spécifiques qui se développent en présence de formation géologique de caractéristiques mécaniques différentes. Le résultat direct de ce phénomène est l'amplification des mouvements sismiques.

Cette amplification résulte du piégeage des ondes sismiques qui se produisent dans certaines configurations stratigraphiques et est fortement présente dans les bassins sédimentaires. Cependant, leur calcul est théoriquement possible si l'on dispose de données précises sur la géométrie des couches de terrain et leurs caractéristiques géotechniques. Ce qui rend l'opération très coûteuse. C'est pourquoi, les données des denses réseaux d'accélérographes installés de par le monde sont exploitées dans le but de trouver un moyen simple et efficace pour modéliser, comprendre et diminuer le risque lié à l'effet de site. Parmi les approches qui ont été largement utilisées ces dernières années comme un outil de modélisation efficace dans différents domaines et qui s'est avéré répondre aux conditions citées auparavant est la méthode de réseaux de neurones artificiels.

L'application de cette méthode pour estimer le risque lié à l'effet de site représente l'essentiel de ce travail. Les paramètres du réseau de neurones sont déterminés par un procédé d'apprentissage. Ce composant réduit au minimum l'erreur existante entre les résultats réels et les évaluations données par le réseau. Après que cette erreur soit réduite à un niveau acceptable, le réseau peut être employé comme dispositif d'extrapolation pour des données d'entrée non présentées auparavant.

Dans le présent travail deux systèmes de réseaux de neurones sont établis. Le premier est basé sur le modèle linéaire équivalent dont les inputs sont les paramètres caractérisant le profil du sol, à savoir sa fréquence caractéristique, son épaisseur totale et sa vitesse de cisaillement sur trente mètres de profondeur; tandis que les outputs sont : les facteurs d'amplification spectrale en accélération entre [0,0.5]s et à 1.0s. Le deuxième système neuronal est formé avec des évènements réels enregistrés en surface et en profondeur dont Les entrées sont : L'accélération spectrale enregistrée en profondeur et la période correspondante, ainsi que la sortie est l'accélération spectrale enregistrée à la surface libre de la terre.

Les deux systèmes de réseaux de neurones permettent d'une part, de calculer les deux facteurs d'amplification spectrale en accélération cités auparavant qui permettent d'estimer le niveau de risque lié à l'effet de site (faible risque, moyen risque et haut risque), et d'autre part, de se prononcer sur la capacité de la méthode neuronale à tracer le spectre de réponse en surface à partir de celui enregistré en profondeur.

I.2. Organisation

Le travail présenté dans ce mémoire est organisé de la manière suivante :

- ✍ Dans le deuxième chapitre un partiel historique des dates majeures qui ont marqué la prise de conscience des effets locaux de site et les méthodes expérimentales et numériques qui ont contribué à l'estimation des effets locaux de site sont présentées.
- ✍ Suite à cela, une étude sur les modèles d'analyse de la réponse du sol et une comparaison entre les réponses fournies par ces modèles et celles enregistrées sur sites sont présentées, dans un souci de choisir un modèle qui rentre dans la phase apprentissage du système neuronal.
- ✍ Le quatrième chapitre, vient pour répondre à la question de la classification de site et mettre sous test la classification qui se base seulement sur la vitesse de cisaillement moyenne sur trente mètres de profondeur.

- ✍ La contribution de l'approche neuronale à l'estimation du risque lié à l'effet de site et à la génération d'un spectre de réponse à la surface est marquée dans le cinquième chapitre. D'une part, par un apprentissage basé sur les réponses données par le modèle linéaire équivalent et d'autre part, avec un apprentissage utilisant les accélérations spectrales enregistrées en surface et en profondeur.
- ✍ Dans le sixième chapitre la validation et l'exploitation des deux modèles neuronaux sur la base des différents exemples réels sont menées avec une analyse critique des résultats obtenus par les deux systèmes neuronaux.
- ✍ Le présent travail se conclut par un récapitulatif des résultats obtenus accompagnés de quelques recommandations pour les travaux futures.

CHAPITRE II :

APERÇU SUR LES METHODES D'ESTIMATIONS DES EFFETS LOCAUX DE SITE

II.1. Introduction

Il est apparu au cours des années que la nature des terrains soumis aux séismes a une influence certaine sur le comportement de ces séismes. Ainsi Mac Murdo (B.F Olivier, 2000) notait déjà, en 1824, que lors d'un tremblement de terre : "les édifices situés sur la roche étaient beaucoup moins affectés par les secousses que ceux dont les fondations n'atteignaient pas la couche inférieure du sol".

L'effet de site est cette caractéristique qu'à chaque site géologique, selon sa composition physique et sa géométrie, de répondre différemment aux sollicitations produites par un séisme (accélération, déformations, contraintes...). Ce phénomène est capital dans la construction de bâtiments résistants aux tremblements de terre. De ce fait, beaucoup de méthodes basées sur des approches expérimentales, empiriques, numériques et neuronales sont présentées dans le présent chapitre et qui ont été développées pour estimer cet effet. En amont, un partiel historique des dates majeures qui ont contribué à la prise en compte des effets locaux de site est présenté.

II.2. Faits marquants dans l'histoire de la prise en compte de l'effet de site

Parmi les faits marquants qui jalonnent la prise de conscience de l'importance des effets de site, quelques dates majeures sont citées:

- 19 septembre 1985, séisme de Guerrero-Michoacan : La ville de Mexico, située à 300 km de l'épicentre du séisme, subit de très forts dégâts à cause de la résonance du bassin sédimentaire sur lequel elle est construite, tandis qu'il ne causa que des dégâts modérés près de son épiceutre. Ce constat donna à penser que l'effet de site au niveau de Mexico City avait joué un rôle important dans l'amplification des effets du séisme.

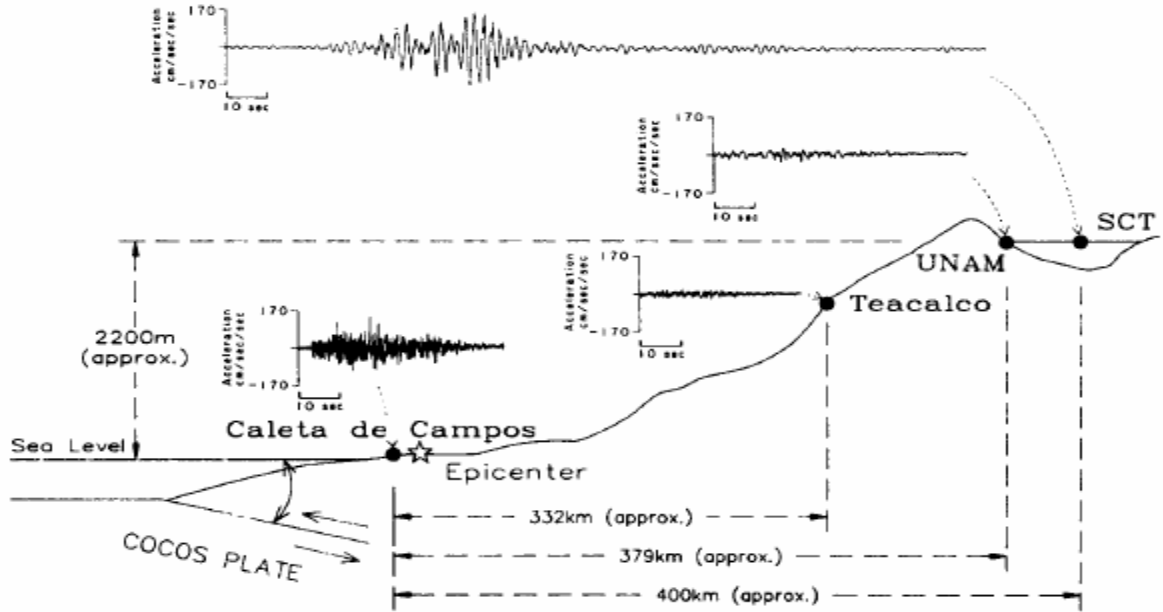


Figure.II.1. Schéma des accélérogrammes enregistrés sur la région épiscopentrale et sur le bassin sédimentaire (Gelebi. M, 1988).

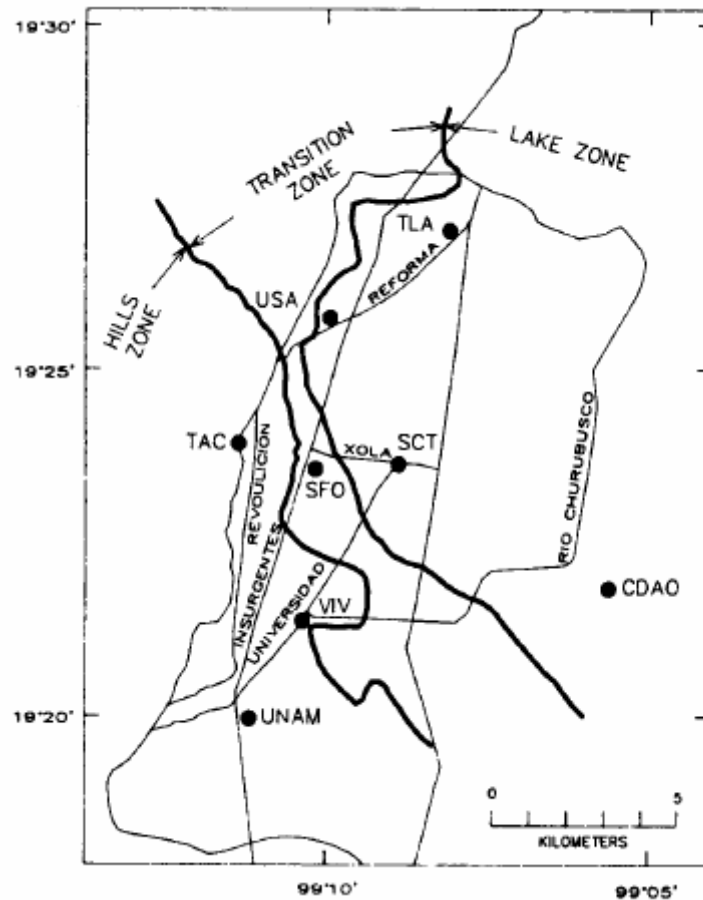


Figure.II.2. Carte indiquant les trois zones de Mexico city (Gelebi. M, 1988).

Le sol de Mexico City peut être divisé en trois sous-parties (figure.II.2) :

1. HILLS Zone (HZ) : Sol granulaire, basalte, située au sud-ouest de la ville.
2. Lake Zone (LZ) : D'épais dépôts de sols mous, constitués de limons, argile, cendres provenant des volcans alentour.
3. Transition Zone (TZ) : Située entre les deux précédentes, où les deux types de sols précédents se chevauchent.

Le séisme de Michoacan étant situé assez loin de Mexico City, il n'a provoqué que de faibles accélérations au niveau de la HZ (0,03g à 0,04g). Dans la TZ, les accélérations ont été sensiblement identiques. Mais dans la LZ, elles ont été jusqu'à 5 fois supérieures. D'où l'effet de résonance observé pour la LZ, comme le montre l'enregistrement sur la figure.II.1. (UNAM = Universidad Nacional Autonoma de Mexico, SCT = Secretary of Communication and Transportation).

- 17 octobre 1989, séisme de Loma Prieta, San Francisco située au Mont Loma Prieta, à 100 km au sud de San Francisco (figure.II.3) de magnitude $M_s=7$ et d'une profondeur de 18.5Km.

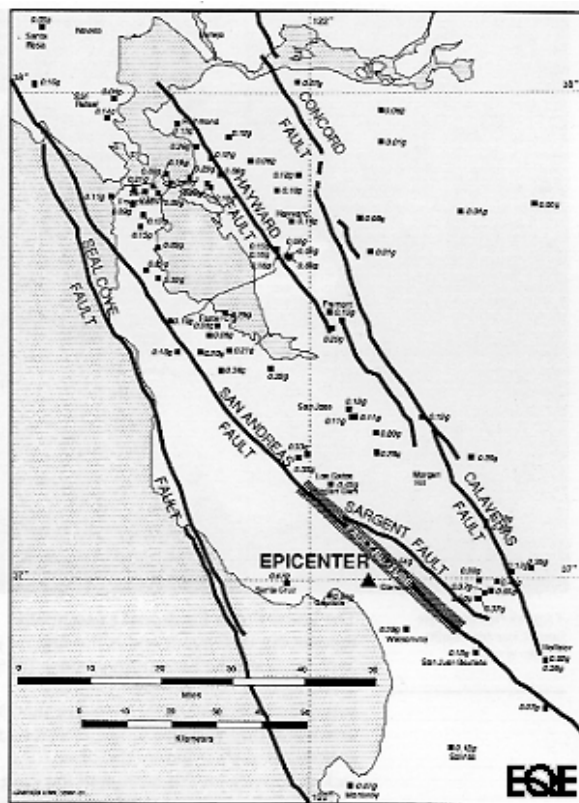


Figure.II.3. Plan de rupture de la faille (Stewart, J, 1997)



Figure.II.4. Baie de San Francisco (Stewart, J, 1997)

L'ampleur des dommages est liée aux conditions locales de la géologie. Son intensité a été, là encore, plus forte à San Francisco qu'à l'épicentre. De plus le fait que ce séisme ait provoqué des dégâts importants dans certaines régions de la ville, et pas dans d'autres, laissait supposer que l'effet de site avait eu un rôle important.

Dans la baie de San Francisco, le sol est essentiellement composé d'alluvions, et ceux-ci ont dans certains cas été surconsolidés, et dans d'autres cas pas. Il en résulte que cette baie peut être divisée en trois régions, l'une de boue de San Francisco (argile limoneuse normalement consolidée), une autre d'alluvions, et la dernière de roche (figure.II.4).

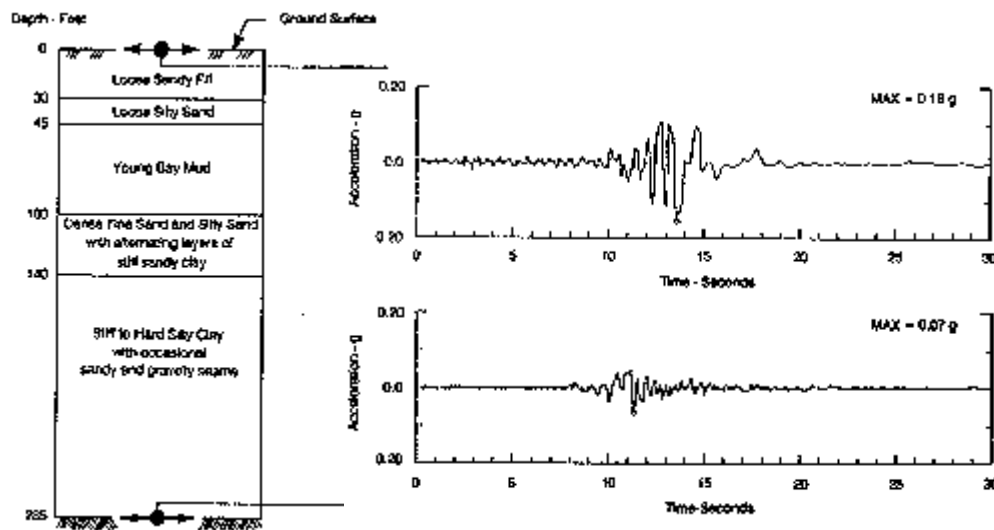


Figure.II.5. Schéma du profil de sol et la réponse de site à Treasure Island (Stewart, J, 1997)

De manière générale, l'atténuation des ondes sismiques se produit beaucoup plus rapidement dans la zone rocheuse. Deux instruments situés dans la baie, sur deux îles très proches mais de natures géologiques différentes : Yerba Buena Island et Treasure Island. La première est naturelle, et est en fait, un affleurement de la roche. La seconde a été créée par l'homme, et repose sur un banc de sable. Entre ce banc de sable et l'île, se trouve une quinzaine de mètres de boue de San Francisco (figure.II.5). De fait, lors du séisme, les deux instruments, bien que spatialement très proches, ont enregistré des accélérations très différentes : (tableau.II.1). Ici encore, c'est la présence d'une couche plus "molle" (la boue de San Francisco) qui a provoqué l'amplification du mouvement au niveau de Treasure Island (figure.II.6).

| sites | N-S Comp. | E-W Comp. | Vertical Comp. |
|--------------------|-----------|-----------|----------------|
| Treasure Island | max=0.10g | max=0.16g | max=0.02g |
| Yerba Buena Island | max=0.03g | max=0.07g | max=0.03g |

Tableau.II.1. Valeurs de l'accélération maximale des trois composantes enregistrées sur les sites de Treasure Island et Yerba Buena Island.

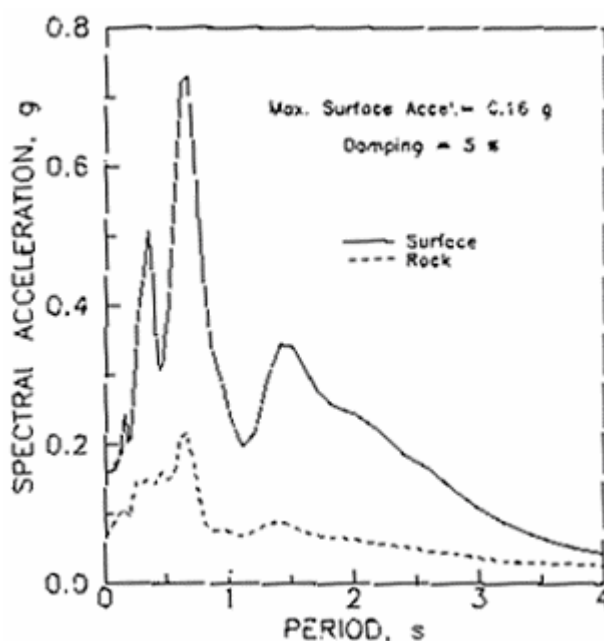


Figure.II. 6. Réponses spectrales d'accélération enregistrées au niveau de Treasure Island et Yerba Buena Island. (Stewart. J, (1997)).

- Le 21 mai 2003 à 19h44:40 une forte secousse ébranle les régions d'Alger et de Boumerdès, sa magnitude est de 6.8, avec un foyer situé à environ 10Km de profondeur, Les stations les plus proches qui ont enregistré le choc principal se trouvent à 20 Km de l'épicentre (Kaddara 1 et 2) la distance entre les deux est de 150m.

Cependant, La variation très significative observée entre la station 1 et 2 en terme d'accélération maximale dans la direction EW suggère la présence d'un effet de site, à savoir que la station Keddara1 est installée sur un sol rocheux tandis que la station Keddara2 sur un site en remblai.

Keddara 1 : E-W : 0.34g Ver : 0.25g N-S : 0.26 g

Keddara 2 : E-W : 0.58g Ver : 0.22g N-S : 0.35 g

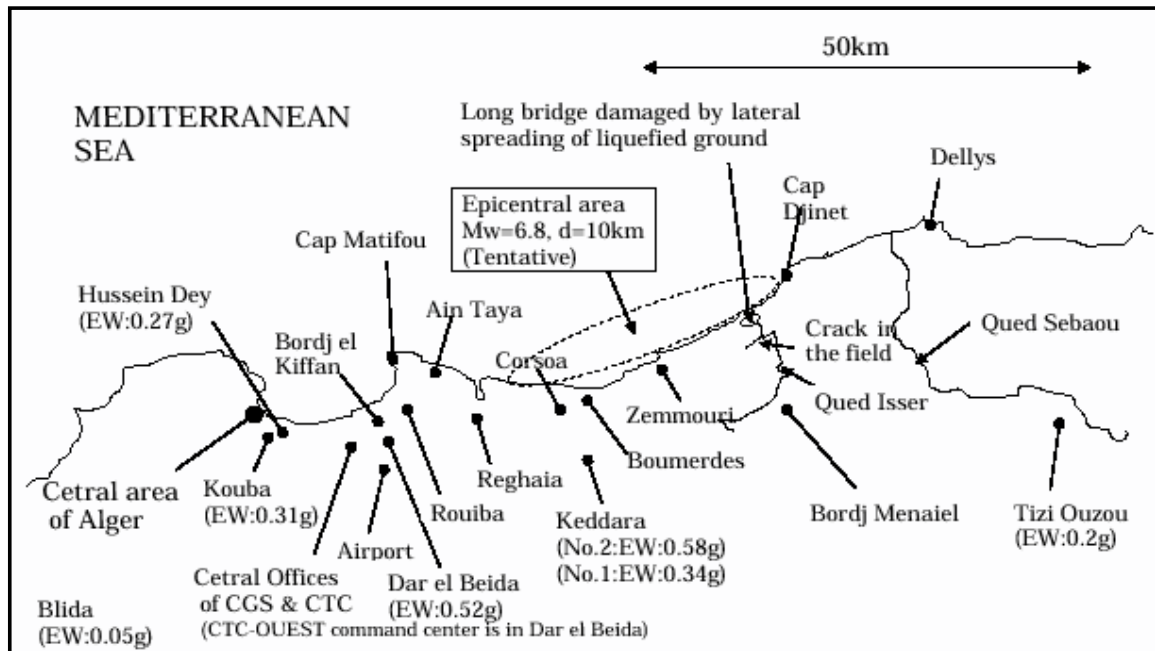


Figure.II.7. Emplacements des stations d'enregistrements et les valeurs de PGA des trois composantes E-W, N-S et V (Pic Ground Acceleration) correspondantes (Laouami, N et al, 2003)

- 1992 Odawara, First International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion
- janvier 1996, le réseau Kyoshin-NET est opérationnel,
- 1998 Yokohama, Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion (170 papiers présentés, 350 participants),
- 2000 installations du réseau KIK-NET.

II.3. Méthodes d'estimation des effets locaux de site

Le choix de la méthode pour l'évaluation de l'effet de site dépend de l'importance du projet pour lequel cette méthode est nécessaire. La section en cours présente les diverses techniques qui peuvent être employées. Celles-ci peuvent être classifiées selon divers critères. Une classification méthodologique qui distingue les approches expérimentales, numériques, empiriques et neuronales est employée dans ce qui suit.

II.3.1. Approches expérimentales – Mesures in situ et observations sur site

II.3.1.1. Réseau en puits

Le plus sûr moyen de mettre en évidence l'effet de site est d'enregistrer le mouvement du sol en profondeur et en surface sur le même site. La comparaison entre les deux signaux permet d'obtenir la « réponse » du sol à une sollicitation donnée (Figure.II.8.). En d'autres termes, la comparaison surface / profondeur (par exemple par le rapport spectral entre les deux signaux) permet de caractériser l'effet de site. Mais les données de ce type sont très rares car cette méthode requiert un dispositif expérimental très coûteux.

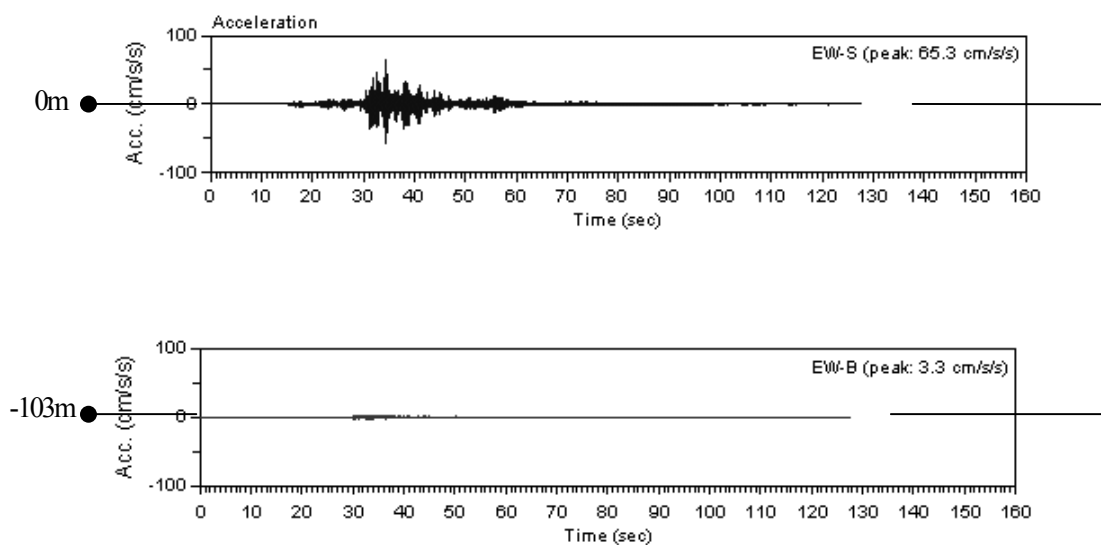


Figure.II. 8.Enregistrements en surface et en profondeur (-103m) sur une même station du réseau KIK-NET.

II.3.1.2. Rapport site sur référence «mouvement sur sol sédimentaire / mouvement sur sol rigide»

Cette méthode a été initiée par Borchardt (1970) et consiste à enregistrer le mouvement sismique en surface sur des sols de natures différentes (rocher et sédiments), à condition que les sites rocheux et sédimentaires ne soient pas trop éloignés (distance site/référence faible devant la distance site/source (Figure II.9)) pour que le champ généré par la source sismique soit identique, le rapport spectral (spectre de Fourier par exemple) sédiment/rocher peut être utilisé pour évaluer l'effet de site.

Cependant, Field et al (1995) ont proposé d'éliminer les enregistrements dont le rapport (signal/bruit) est inférieur à 3.

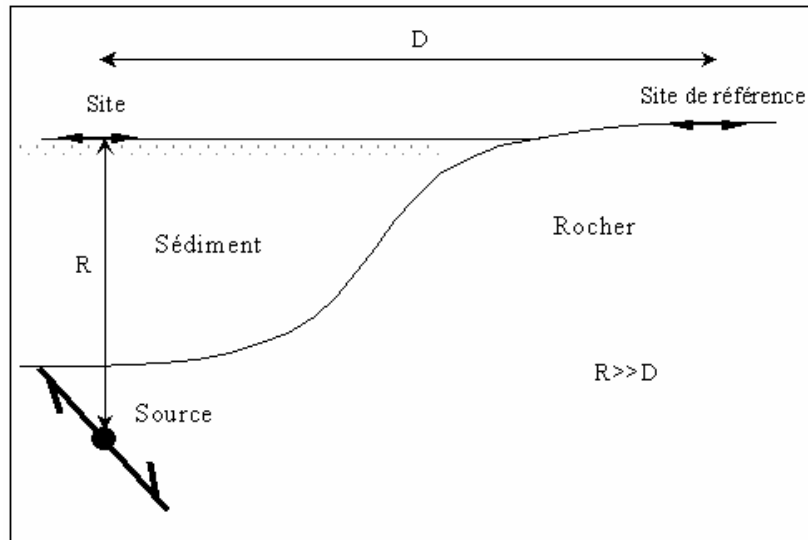


Figure.II.9. Représentation schématique de la condition d'éloignement

II.3.1.3. Rapport H/V « mouvement horizontal / mouvement vertical »

Le rapport spectral de la composante horizontale sur la composante verticale des enregistrements sismiques à la surface du même site peut être employé pour trouver la fréquence de résonance du site. Cette méthode appelée aussi HVSR: **H**orizontal **V**ertical **S**pectral **R**atio est évidemment intéressante en raison de sa simplicité et son économie. Cette méthode a été appliquée aux ensembles de données de mouvement faibles et forts par Riepl et al (1998) et Bonilla et al (1997). Les études ont prouvé que la forme de HVRS montre une bonne stabilité expérimentale et que cette méthode peut être employée pour obtenir la fréquence fondamentale de résonance d'un site à l'aide de la formule développée par Theodulidis et al (1996), indiquée sur la (Figure II.10) où S_{EW} , S_{NS} et S_{UP} sont les spectres de Fourier des accélérogrammes enregistrés à la surface de la terre de la composante est-ouest, nord-sud et Verticale respectivement.

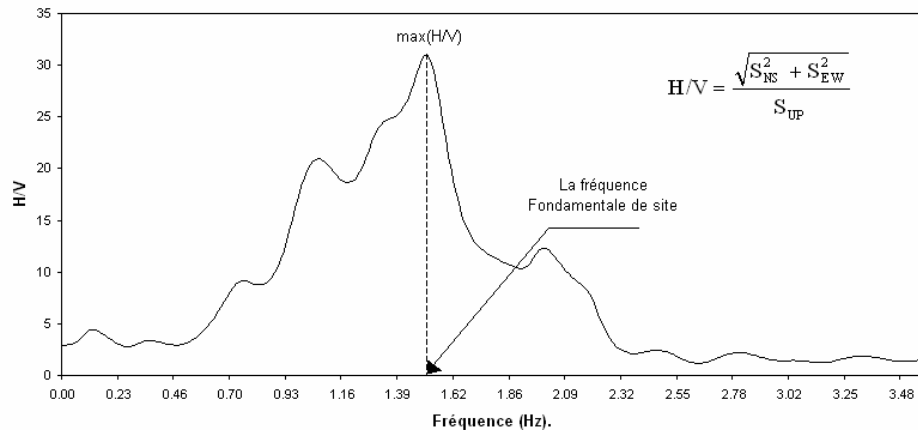


Figure.II.10. HVSR de l'événement du 16/09/2002 enregistré sur la station TTRH03 (KIK-NET)

De son côté, Nakamura (1989) a développé la technique de GAN (GROUND AMBIENT NOISE) qui se base sur les enregistrements des bruits ambiants générés par le trafic, l'interaction vent-structure et d'autres activités urbaines. Il a montré que le rapport spectral de la composante horizontale et verticale du bruit ambiant à la surface peut exprimer les effets de site car ce rapport est lié à la fréquence fondamentale du sol sous le site et par conséquent au facteur d'amplification.

II.3.1.4. Traitement du signal

Lussou (2001) a effectué une étude comparative entre les trois accélérographes présentés sur la figure.II.11, le premier (séisme d'Hector Mine Californie, 16 octobre 1999, magnitude 7) a une allure "classique" alors que les deux autres sont fortement perturbés. Le second enregistrement a été obtenu à Port Island (séisme de Kobe, 17 janvier 1995, magnitude 7,2) sur un site où de la liquéfaction s'est produite. Le troisième accélérographe a été enregistré sur le site de Kushiro Port (séisme de Kushiro, 15 janvier 1993, magnitude 7,6). Dans ce cas il a montré que, c'est le phénomène de mobilité cyclique dû aux propriétés de dilatance des sables denses qui est responsable des pics observés à la fin de l'accélérographe. Cet exemple fait apparaître de manière spectaculaire que l'accélérographe enregistré en surface contient de l'information sur les milieux que l'onde a traversés.

Pour rendre ces méthodes opérationnelles il est indispensable d'effectuer des tests sur un nombre significatif de données, or les données bien documentées sont rares. Il faudra donc patienter encore quelques années avant de voir émerger ces méthodes.

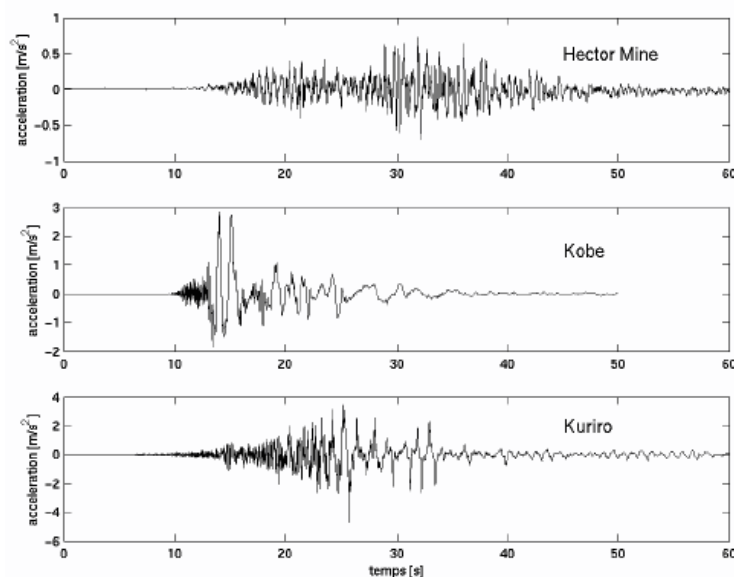


Figure.II. 11. Accélérographes enregistrés à Garner Valley (séisme Hector Mine 1999), à Port Island (séisme de Kobe 1995) et à Kushiro Port (séisme de Kushiro 1993) (Lussou, P, 2001) .

II.3.1.5. Observation post-séismique (Sans enregistrements)

Trifunac et Todorovska (1998) ont réalisé une étude sur le séisme de Northridge. Les auteurs analysent les cartes des dommages infligés aux pavillons et aux conduites d'eau dans la vallée de San Fernando (Figure.II.12). Sachant que les pavillons sont sensibles aux pics de vitesse et les conduites aux grandes déformations, ils établissent une corrélation entre les dégâts observés et le comportement du sol. Dans les zones où le sol s'est comporté linéairement, l'énergie des ondes sismiques a été transmise en majorité à la surface et a causé de gros dégâts aux pavillons. Dans les zones où la réponse est non linéaire, l'énergie est absorbée par la déformation du sol et les dégâts sont alors reportés sur les conduites enterrées. Cette méthode apporte un éclairage très intéressant sur l'effet de site linéaire et non linéaire mais il paraît difficile de quantifier le potentiel de non-linéarité d'un site donné avec une telle méthode.

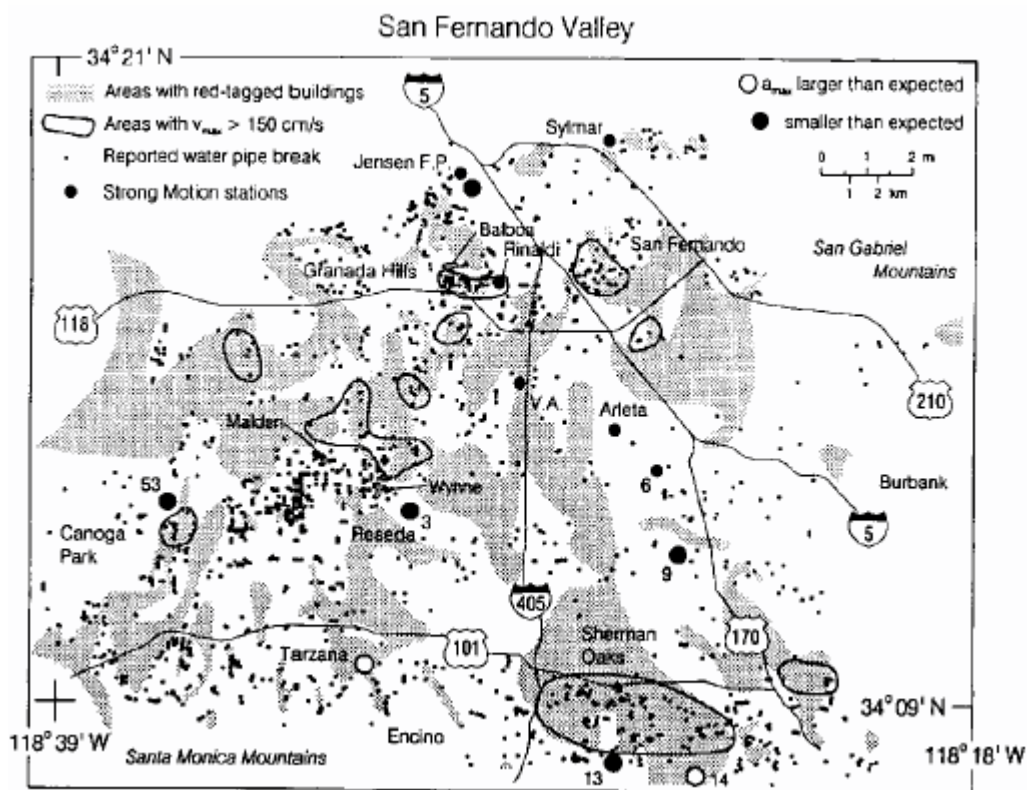


Figure.II.12. Description des dégâts dus au séisme de Northridge dans la vallée de San Fernando d'après (Trifunac. M.D et al, 1998).

Dans ce contexte, Marzorati et al (2003) ont évalué les effets locaux de site en comparant les dommages réels (causés par le séisme de Ombrie Marche du 4 septembre 1997) détectés par des photos aériennes prises peu de jours après les événements principaux sur les

bâtiments des 60 villages italiens gravement touchés et les dommages théoriques estimés par les courbes empiriques, obtenues à partir de l'analyse des séismes italiens récents, les résultats sont mentionnés sur la figure.II.13. Cette approche peut être utilisée pour calibrer les résultats de l'étude du micro-zonage et pour s'approprier quand une évaluation immédiate des dommages est exigée, pour estimer les zones d'amplification. Néanmoins, la quantification du potentiel des effets locaux d'un site reste aussi difficile avec cette méthode.

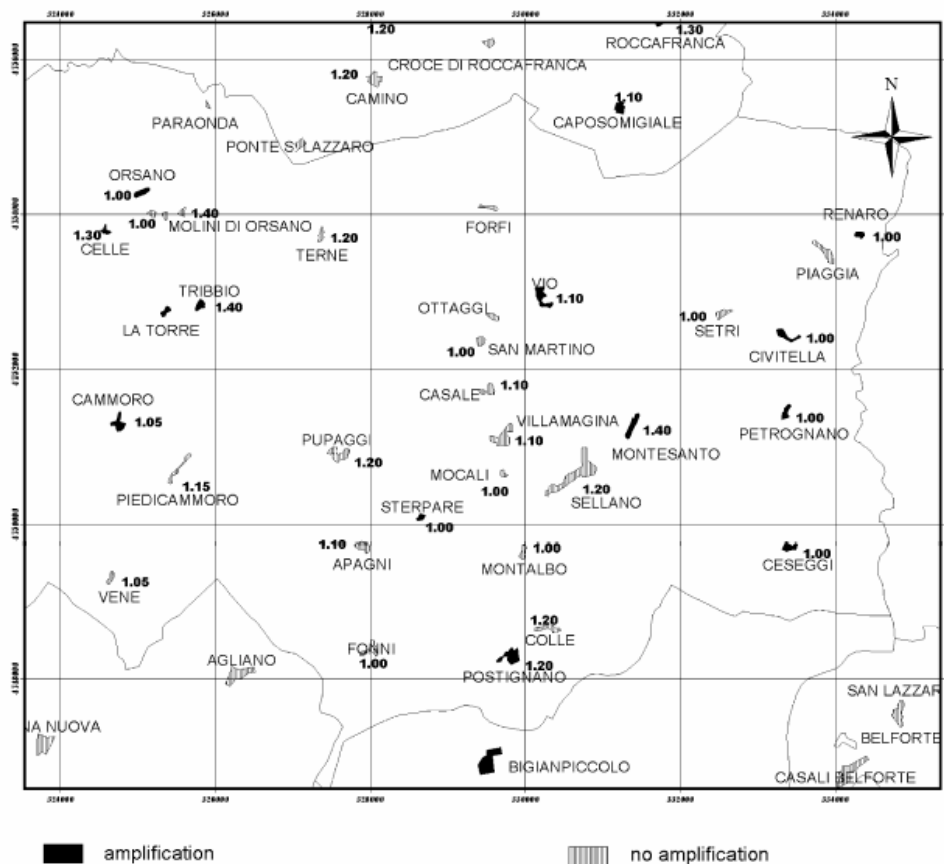


Figure.II.13. Présentation de zones amplifiées et non amplifiées

II.3.1.6. Utilisation des stations multiples et des séismes

Une approche très utilisée par des sismologues pour caractériser l'amplification de site consiste à appliquer les techniques d'inversion généralisées à l'enregistrement principal et aux répliques (secousse secondaire) à partir d'un grand nombre de stations (Andrews. D.J, 1986) et (Hartzell. SH, 1992). L'hypothèse principale derrière la méthodologie est qu'un mouvement enregistré $U_{ij}(f)$ peut être rapproché dans le domaine fréquentiel comme un produit de trois filtres représentant le spectre de source $S_i(f)$, de propagation d'ondes $P_{ij}(f)$ et d'amplification

de site $R_j(f)$. Ainsi, le spectre de Fourier, $U_{i,j}(f)$ de l'enregistrement à la station j du séisme i est (Bard. P.-Y, et al , 2000) :

$$U_{i,j}(f) = S_i(f) \times R_j(f) \times P_{i,j}(f) \quad \text{II.3.1}$$

Notant, que $R_j(f)$ est assumé indépendant du séisme (l'amplification de site est linéaire).

La combinaison de l'inversion généralisée nécessite la détermination de $S_i(f)$ et $R_j(f)$ d'un ensemble d'équations écrites pour tous les séismes et les stations (Eq. II.3.1). A cet égard, les effets de propagations d'ondes sont déterminés en premier lieu et sont supposés indépendants du site : distance site référence et faible devant la distance site source, $P_{i,j}(f)$ est le même pour tous les groupes d'enregistrements, un groupe est constitué des enregistrements du séisme i sur des sols de type j , (Şafak. E, 2001) :

$$P_{i,j}(f) = \frac{1}{r_{i,j}} \times \exp\left[\frac{-\pi \times f \times \tau_{i,j}}{Q \times \beta}\right] \quad \text{II.3.2}$$

Avec $r_{i,j}$ la distance de la station, $\tau_{i,j}$ est le temps de travail, Q est le temps de passage d'onde, β est la vitesse de cisaillement et Q est le facteur de qualité de l'onde de transmission (Lam. N, et al 2000) :

$$Q = Q_0 \left(\frac{f^n}{f_0} \right) \quad \text{II.3.3}$$

$f_0=1\text{Hz}$, Q_0 et n sont des facteurs dépendants du modèle.

De son côté Chopra (Chopra. A.K, 1995) a donné une autre définition au facteur Q :

$$Q = \exp[-2\pi \times f \times \xi \times t] \quad \text{II.3.4}$$

ξ : amortissement critique.

t : est le temps mesuré à partir du commencement d'une oscillation normale atténuée.

Après que $P_{i,j}(f)$ est déterminé, l'éq.II.3.1 peut être écrite:

$$\ln(U_{i,j}(f)) - \ln(P_{i,j}(f)) = \ln(S_i(f)) + \ln(R_j(f)) \quad \text{II.3.5}$$

Dans la station de référence $R(f)$ est supposé égale à 1, $S_i(f)$ et $R_j(f)$ sont déterminés par la technique des moindres carrés minimisés à chaque fréquence.

L'amplification de site $R(f)$ obtenu par cette méthode donne une moyenne et une description approximative de l'amplification à ce site, mais en générale ne montre pas la fréquence de résonance et les valeurs exactes de l'amplification.

II.3.2. Approche numérique

La procédure d'estimation de l'effet de site par une approche numérique se décompose en trois étapes (Laouami, 1998) :

1. La première est la collecte de données sur le comportement mécanique des terrains formant le site.
2. La deuxième est la modélisation théorique de la structure étudiée.
3. La troisième consiste à transcrire numériquement le modèle et à résoudre le problème de la propagation d'onde dans le site.

Seules les deux dernières étapes font strictement partie du champ numérique. Cependant, il faut toujours garder à l'esprit que les données initiales jouent un rôle essentiel et que même si l'approche numérique est correcte, les résultats peuvent être totalement faussés par une erreur ou des imprécisions sur les paramètres mécaniques ou géométriques.

En outre, la méthode qui se base sur des calculs approchés fournit une valeur raisonnable de la fréquence propre sous l'incidence d'une onde SH verticale (avec une sous-estimation de l'ordre de 10%).

L'approche numérique qui est maintenant souvent utilisée en ingénierie, consiste à calculer la réponse d'une colonne de sol soumise à une onde SH d'incidence verticale. Cette méthode permet de prendre en compte des effets non linéaires.

Généralement ceux-ci sont introduits par l'approche « linéaire équivalente » initiée par Schnabel et al (1972) et qu'elle va être traitée en détail, ainsi que les approches élastique et viscoélastique dans le prochain chapitre.

II.3.3. Approches empiriques

II.3.3.1. Paramètres géotechniques/amplification

Particulièrement dans de grandes villes où le développement des projets est important, les détails des données géotechniques sont rassemblés en outre de l'information simple sur la géologie extérieure. Ceci a motivé des chercheurs, qui ont tenté de dériver quelques règles afin de relier les paramètres géotechniques avec l'amplification locale.

Le paramètre le plus important est la vitesse des ondes de cisaillement. Plusieurs auteurs ont proposé des relations entre la vitesse de cisaillement moyenne (dont certains ont ajouté la profondeur du profil sédimentaire) et l'amplification relative. La comparaison entre certaines relations est mentionnée sur la figure II.14.

| Chercheurs | Équation |
|------------------------------|--|
| (Midorikawa. S, 1987) | $A = 68 \times V_1^{-0.6}$ ($V_1 < 1100 \text{m/s}$) $A=1$ ($V_1 > 1100 \text{m/s}$) |
| (Joyner et Fumal, 1984) | $A = 23 \times V_2^{-0.45}$ |
| (Borcherdt. R.D, et al 1991) | AHSA1=700/ V_1 (pour des mouvements faibles) AHSA1=600/ V_1 (pour des mouvements forts) |
| (Field. E.H, 2001) | AHSA2= ($V_0 / 1000$) ^{-0.704} × exp (0.12 × B_depth) |

Tableau.II. 2. Corrélation entre la vitesse de cisaillement et l'amplification relative. (Reproduction de (Bard, P.-Y,2000) et (Field. E.H,2001)).

A: facteur d'amplification relative à la vitesse maximale du sol (PGV).

AHSA1 : amplification spectrale horizontale moyenne entre la période 0.4 et 2.0 seconde.

AHSA2 : amplification spectrale horizontale moyenne à la période 1.0 seconde.

V_0 : vitesse de cisaillement moyenne sur 30m de profondeur (Km/s)

V_1 : vitesse de cisaillement moyenne sur 30m de profondeur (m/s)

V_2 : vitesse de cisaillement moyenne sur la gamme de la profondeur qui correspond à un quart de la longueur d'onde à la période 1.0 seconde (m/s).

B_depth : profondeur à une vitesse de cisaillement de 2.5Km/s.

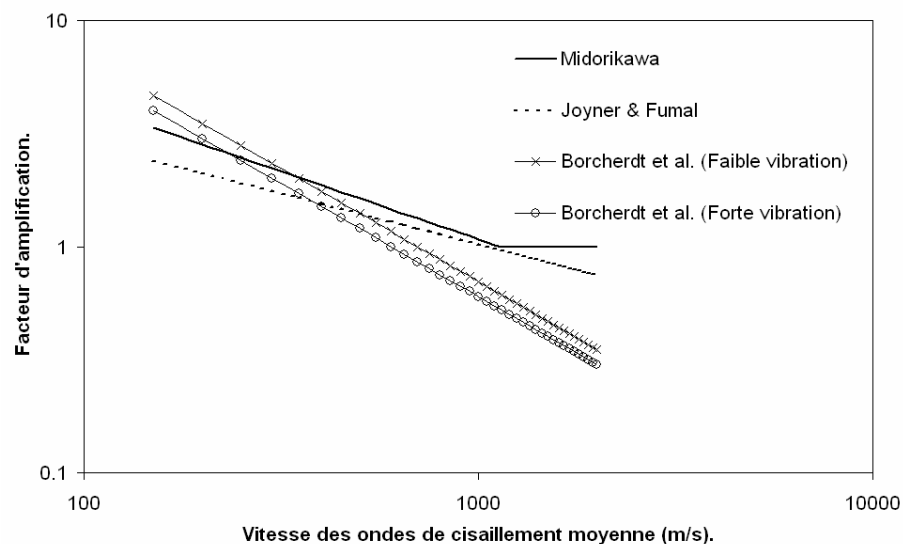


Figure.II. 14. Corrélation entre la vitesse de cisaillement et l'amplification relative.

II.3.4 Approches neuronales

II.3.4.1. Générations d'un accélérogramme (surface libre/substratum rocheux)

Hurtado et al (2001) ont utilisé la méthode des réseaux de neurones artificiels (RNA) pour estimer l'histoire de l'accélération sismique à la surface libre de la terre d'un profil de sol à partir de l'histoire de l'accélération sismique au niveau du substratum rocheux calculée par simulation numérique basée sur la méthode de Shinozuka (Shinozuka. M, et al, 1987). Le programme SHAKE a été employé pour obtenir les enregistrements à la surface libre d'un profil unidimensionnel composé de cinq couches de sable, de gravier et d'argile. Les paramètres du RNA sont déterminés par un procédé de formation, se composant réduisant au minimum l'erreur existant entre les résultats réels (les histoires des accélérations générées par le SHAKE) et les évaluations données par le réseau. Après que cette erreur avait été réduite à un niveau acceptable, le réseau peut être employé comme dispositif d'extrapolation pour des données d'entrée non présentées auparavant.

II.3.4.2. Générations d'un spectre de réponse en accélération (surface libre/site de référence)

Hurtado et al (2001) ont développé un réseau de neurones permet de générer artificiellement le spectre de réponse d'accélération à la station C00 (sol alluvial récent, réseau SMART-1 (Taiwan), figure.II.15) à partir de celui enregistré à la station E02 (affleurement rocheux). L'apprentissage du réseau de neurones est effectué avec l'événement du 21/09/83. Le réseau a été par la suite, testé avec deux autres événements enregistrés sur l'affleurement rocheux (E02). Les deux spectres de réponses en accélération générés par le réseau de neurones convergent vers ceux obtenus à partir des accélérographes de la station C00 et ce malgré l'utilisation d'un seul événement dans la procédure d'apprentissage. Cependant, les estimations des pics sont soit sous-estimés soit surestimés; ceci est dû au niveau de non-linéarité qui varie en passant de bas pic vers le haut pic. Pour palier cette gêne, ils recommandent l'élaboration de plusieurs réseaux de neurones pour plusieurs gammes d'accélération maximale.

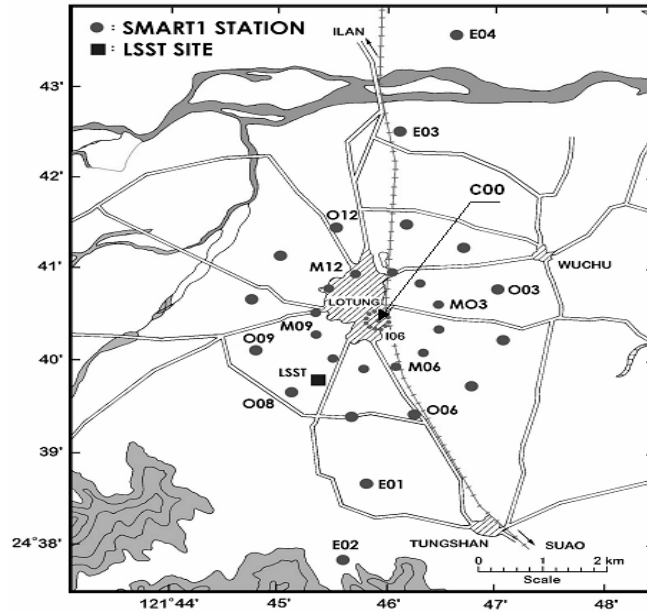


Figure.II. 15. Denses réseaux d'accélérographes SMART-1 (Taiwan).

II.3.4.3. Estimation du risque (rapport d'amplification spectral « site/référence »)

Paolucci et al (2000) ont élaboré un modèle neuronal basé sur les paramètres de site (paramètres d'entrée) et sur les facteurs d'amplification spectrale entre 0 et 0.5 sec et à 1.0 sec, à partir de ces deux facteurs le niveau de risque est évalué : haut risque, moyen risque et faible risque (paramètre de sortie). Il en résulte que le réseau de neurones développé donne seulement une indication sur le niveau de risque lié à l'effet de site.

II.4. Description des travaux

Dans le présent travail, les denses réseaux d'accélérographes installés de par le monde ont contribué à la compréhension de l'effet de site et à l'estimation du risque lié à ce phénomène et ce par le biais de la méthode de réseaux de neurones artificiels. Et par la suite, discuté la capacité de la méthode neuronale à tracer le spectre de réponse en surface à partir de celui enregistré en profondeur. Cependant, la procédure d'apprentissage d'un réseau de neurones représente la phase la plus essentielle dans l'approche neuronale. Pour cette raison, une analyse comparative entre un certain nombre de modèles numériques d'analyses de la réponse sismique est effectuée en premier lieu, l'un de ces modèles est sensé être utilisé dans la procédure d'apprentissage des réseaux de neurones.

L'analyse des méthodes d'estimation des effets locaux de site présentées dans ce chapitre va nous orienter à effectuer les travaux qu'il faut adopter dans les prochains chapitres, ces travaux sont :

1. Étudier les différents modèles numériques d'analyse de la réponse sismique, à savoir le modèle élastique, viscoélastique et linéaire équivalent.
2. Chercher les meilleurs paramètres pour classer un site.
3. Estimation du risque lié à l'effet de site et génération de spectre de réponse en accélération à la surface libre de la terre par l'approche neuronale.
4. Validation du modèle neuronal et exploitation des résultats trouvés.
5. Conclusion générale avec recommandations pour les travaux futurs.

II.5. Conclusion

L'ensemble de ces méthodes reflète d'une part, l'importance accordée par les chercheurs à l'étude des effets locaux de site et d'autre part la multiplicité des approches développées. En effet, un examen détaillé de l'ensemble des méthodes montre que l'objectif principal de ces méthodes est la quantification de ce phénomène physique et ceci ne peut être qu'avec des méthodes fiables (de préférence qui nécessitent un nombre limité de paramètres et peu coûteux).

Dans ce contexte, une étude sur un ensemble des modèles d'analyse de la réponse du sol avec une comparaison entre les réponses fournies par ces modèles et celles enregistrées sur sites vont être présentées dans le chapitre suivant, dans le souci de choisir un modèle qui va être utilisé dans la phase apprentissage du système neuronal.

CHAPITRE III:

MODELES D'ANALYSE DE LA REPONSE SISMIQUE

III.1. Introduction

L'analyse de la réponse d'un profil du sol sous un chargement sismique par la théorie de la propagation d'onde dans un milieu continu est présentée en détail dans ce chapitre. La réponse est déterminée par trois modèles: élastiques, viscoélastique et linéaire équivalent.

Premièrement, un éclaircissement sur l'influence de l'amortissement effectif sur l'amplification sismique est donné en comparant les réponses obtenues par le modèle élastique et viscoélastique et ce pour des différents profils de sols : mono-couche, bi-couches et multicouches.

Par la suite, une étude sur le modèle linéaire équivalent est menée en examinant les sources éventuelles de non-linéarité. Enfin, deux tests basés sur deux cas réels viennent pour mettre en évidence le modèle viscoélastique et le modèle linéaire équivalent.

III.2. Analyse de la réponse sismique d'un profil de sol stratifié horizontalement

III.2.1 Modélisation du sol en milieu continu.

Le problème consiste à trouver la réponse d'un profil de sol à une onde de volume en utilisant la théorie de propagation d'ondes dans un milieu continu. C'est un problème tridimensionnel puisque l'onde se propage dans toutes les directions. La source est considérée comme constituée d'une ligne (faille) et le site supposé placé à une distance suffisamment éloignée de la source, le problème devient donc bidimensionnel.

Dans cette analyse le profil du sol est modélisé en milieu continu. À cet effet, les conditions suivantes sont adoptées :

- En génie parasismique l'hypothèse qui est admise est que le mouvement horizontal résulte de la propagation d'onde de cisaillement, et le mouvement vertical de la propagation de l'onde de compression.
- Chaque couche du profil est affectée d'un système d'axes (x,y_i) et est également supposée homogène, isotrope.

- Le profil de sol est supposé infini dans le sens x , par conséquent, toutes les fonctions régissant le profil sont indépendantes des variables x et z .
- Pour la modélisation le profil de sol est constitué de N couches horizontales d'épaisseur h_i , de masse volumique ρ_i , de vitesse de cisaillement complexe v_i et de coefficient d'amortissement ξ_i . Figure III.1.
- Le profil de sol est supposé soumis à la propagation verticale d'ondes de cisaillement, par conséquent, le vecteur déplacement en tout point présente une seule composante non nulle selon l'axe x : la propagation verticale d'onde de cisaillement ne peut induire qu'une déformation horizontale.

$$\vec{u} = \begin{Bmatrix} u_x \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

III.2.1.1

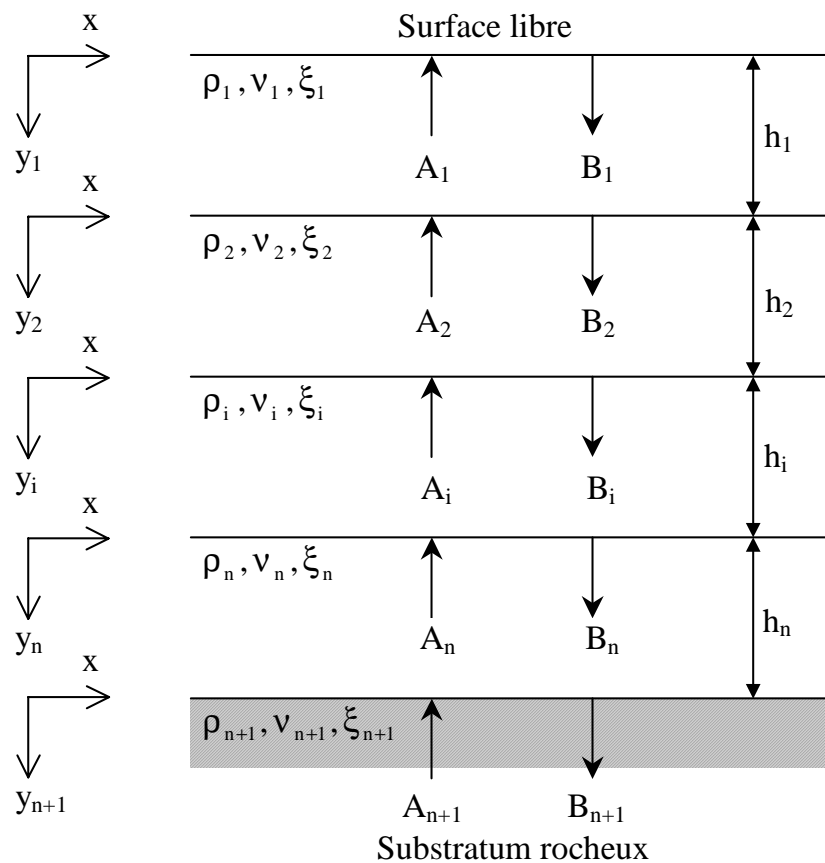


Figure.III.1. Système de couches de sol stratifié horizontalement soumis à la propagation d'onde S verticale. (Yezli-Khati, F, 2003).

Le tenseur des déformations est défini comme suit : $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \{u_{i,j} + u_{j,i}\}$ III.2.1.2

La composante u_x est la seule à être non nulle et indépendante de x et z : par conséquent une seule composante du tenseur des déformations est également non nulle (Filiatrault, A,1991) :

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \frac{\partial u_x}{\partial y} \quad \text{III.2.1.3}$$

Le profil de sol est régi par la loi de Hooke :

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} \quad \text{III.2.1.4}$$

λ et G désignent les coefficients élastiques de Lamé et δ_{ij} est le symbole de Kronecker.

(III.2.1.4) est remplacée dans (III.2.1.3), pour trouver que seule la contrainte de cisaillement σ_{xy} est non nulle :

$$\sigma_{xy} = G \frac{\partial u_x}{\partial y} \quad \text{III.2.1.5}$$

Ainsi l'équation d'équilibre s'écrit : $\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \gamma_i$ III.2.1.6

γ_i : l'accélération suivant la direction i .

ρ : masse volumique.

ρf_i : la densité de volume dans la direction i .

(III.2.1.5) est remplacée dans (III.2.1.6) pour obtenir :

$$G_i \frac{\partial^2 u_{xi}}{\partial y^2} = \rho_i \frac{\partial^2 u_{xi}}{\partial t^2} \quad \text{III.2.1.7}$$

G_i : module de cisaillement de la couche i .

Dans le but de modéliser la dissipation d'énergie dans le sol, le module de cisaillement G_i est remplacé par une quantité équivalente d'amortissement visqueuse appelée module de cisaillement complexe G^* (Vrettos, C,2000) :

$G_i^* = G_i (1 + 2i\xi_i)$ Cette formule est démontrée en détail dans la section III.3 du présent chapitre.

L'équation III.2.1.7 peut s'écrire :

$$\frac{\partial^2 u_{xi}}{\partial t^2} - v_i^2 \frac{\partial^2 u_{xi}}{\partial y^2} = 0 \quad \text{III.2.1.8}$$

Avec $v_i = \sqrt{\frac{G_i}{\rho_i}}$ (Hadjebbar. M.Y, 2001)

Où v_i est la vitesse de cisaillement dans la couche i .

L'équation III.2.1.8 est une équation aux dérivées partielles de second ordre à coefficients constants.

La solution générale de cette dernière peut être obtenue par la méthode de séparation des variables sous la forme (Pecker. A, 1984):

$$u_{xi}(y, t) = x_i(y) e^{i\omega t} \quad \text{III.2.1.9}$$

Où $x_i(y)$ est la déformation modale, ω est la pulsation en (rad/s).

(III.2.1.9) est portée dans (III.2.1.8) pour obtenir :

$$\frac{d^2 x_i}{dy^2} + \frac{\omega^2}{v_i^2} x_i = 0 \quad \text{III.2.1.10}$$

L'équation III.2.1.10 est une équation différentielle du second ordre à coefficients constants.

La solution générale de cette équation s'écrit sous la forme :

$$x_i(y) = A_i e^{(ik_i^* y)} + B_i e^{(-ik_i^* y)} \quad \text{III.2.1.11}$$

$k_i^{*2} = \frac{\rho \omega^2}{G^*}$ est le numéro d'onde complexe.

L'équation III.2.1.11 est écrite pour chaque couche du profil de sol, les coefficients A_i et B_i s'obtiennent à partir des conditions aux limites suivantes :

- Forme modale normalisée à l'unité en surface :

$$\lim_{y \rightarrow 0} x_i(y) = 1 \Rightarrow A_i = 1 \quad \text{III.2.1.12}$$

- Contrainte de cisaillement nulle à la surface libre :

$$\lim_{y \rightarrow 0} G_i^* \frac{dx_i}{dy} = 0 \Rightarrow A_i = B_i \quad \text{III.2.1.13}$$

- Continuité de la contrainte de cisaillement entre la couche i et la couche $i+1$:

$$x_i(y) = A_i e^{(ik_i^* y)} + B_i e^{(-ik_i^* y)}$$

$$x_{i+1}(y) = A_{i+1} e^{(ik_{i+1}^* y)} + B_{i+1} e^{(-ik_{i+1}^* y)}$$

$$\lim_{y \rightarrow h_i} G_i^* \frac{dx_i}{dy} = \lim_{y \rightarrow 0} G_{i+1}^* \frac{dx_{i+1}}{dy} \quad \text{III.2.1.14}$$

$$A_{i+1} - B_{i+1} = \frac{\kappa_i^* G_i^*}{\kappa_{i+1}^* G_{i+1}^*} \left(A_i e^{(i\kappa_i^* h_i)} - B_i e^{(-i\kappa_i^* h_i)} \right) \quad \text{III.2.1.15}$$

- Continuité du déplacement entre la couche i et $i+1$

$$\lim_{y \rightarrow h_i} x_i(y) = \lim_{y \rightarrow 0} x_{i+1}(y) \quad \text{III.2.1.16}$$

$$A_{i+1} + B_{i+1} = \left(A_i e^{(i\kappa_i^* h_i)} + B_i e^{(-i\kappa_i^* h_i)} \right) \quad \text{III.2.1.17}$$

A partir de l'équation III.2.1.15 et III.2.1.17 les amplitudes A_{i+1} et B_{i+1} en fonction de A_i et B_i sont déterminés :

$$A_{i+1} = \left(\frac{1}{2} A_i (1 + \alpha_i^*) e^{(i\kappa_i^* h_i)} + \frac{1}{2} B_i (1 - \alpha_i^*) e^{(-i\kappa_i^* h_i)} \right) \quad \text{III.2.1.18}$$

$$B_{i+1} = \left(\frac{1}{2} A_i (1 - \alpha_i^*) e^{(i\kappa_i^* h_i)} + \frac{1}{2} B_i (1 + \alpha_i^*) e^{(-i\kappa_i^* h_i)} \right) \quad \text{III.2.1.19}$$

Où α_i^* est le rapport d'impédance complexe entre la couche i et $i+1$ (Kramer. S.L, 1996) :

$$\alpha_i^* = \frac{\kappa_i^* G_i^*}{\kappa_{i+1}^* G_{i+1}^*} = \sqrt{\frac{\rho_i G_i^*}{\rho_{i+1} G_{i+1}^*}} \quad \text{III.2.1.20}$$

Les équations III.2.1.18 et III.2.1.19 sont valables à partir de la couche 2.

D'autre part, la fonction de transfert $T_{i,i+1}$ est le rapport de l'amplitude de déplacement au toit de la couche i à l'amplitude de déplacement au toit de la couche $i+1$:

$$T_{i,i+1}(\omega) = \frac{A_i + B_i}{A_{i+1} + B_{i+1}} \quad \text{III.2.1.21}$$

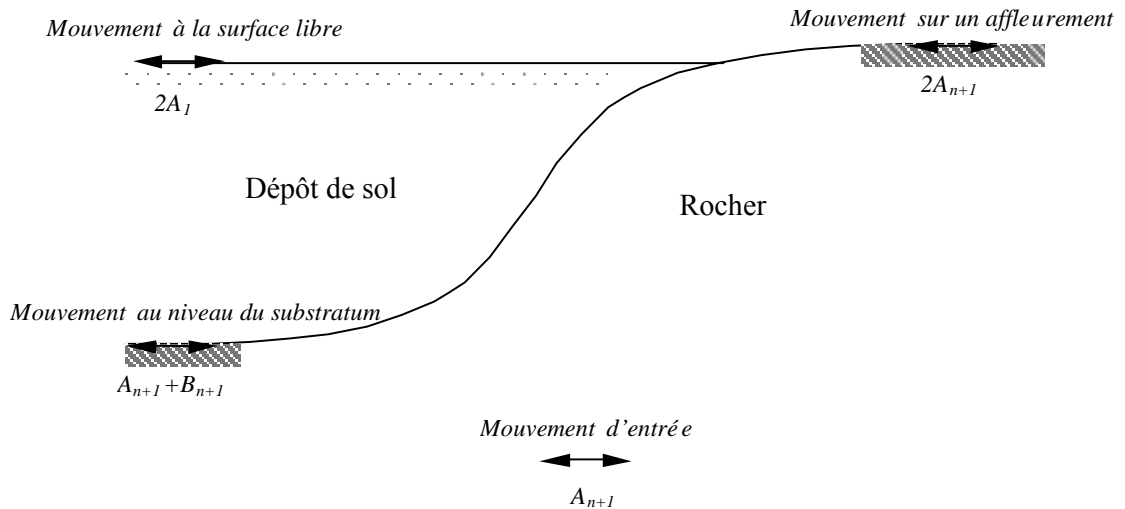


Figure.III. 2. Terminologie utilisée dans l'analyse de la réponse de site

La figure III.2 schématise les quatre termes (amplitude) utilisés dans le calcul de la réponse d'un site et est montrée que l'onde incidente de cisaillement qui se propage verticalement vers le haut a pour amplitude A_{n+1} , or elle est de $A_{n+1}+B_{n+1}$ au toit du substratum rocheux sous les couches de sol. Tandis que dans l'affleurement rocheux l'amplitude est égale à $2A_{n+1}$, et enfin sur la surface libre d'un dépôt de sol elle est de $2A_1$.

A partir des quatre amplitudes représentées sur la figure III.2 une multitude de fonctions de transferts peut être déduite (Bardt. J. P., 2000) :

La première relie le mouvement du substratum rocheux et le mouvement d'affleurement rocheux :

$$T_{n+1 \ n+1}(\omega) = \frac{2A_{n+1}}{A_{n+1} + B_{n+1}} \quad \text{III.2.1.22}$$

En outre, la fonction de transfert relie le mouvement à la surface libre et le mouvement d'affleurement rocheux est :

$$T_{1 \ n+1}(\omega) = \frac{1}{A_{n+1}} \quad \text{III.2.1.23}$$

Finalement, la fonction de transfert relie le mouvement à la surface libre et le mouvement du substratum rocheux est égale à:

$$T_{1 \ n+1}(\omega) = \frac{2}{A_{n+1} + B_{n+1}} \quad \text{III.2.1.24}$$

III.2.2. différentes étapes de calcul de la réponse du sol

Outre les définitions données dans la section précédente, l'amplitude à la surface libre d'un sol peut être définie comme le produit entre l'amplitude d'entrée et la fonction de transfert qui relie la surface et la couche qui comporte le mouvement d'entrée. Par conséquent, la réponse d'un profil du sol sous un chargement sismique, peut être obtenue par les étapes suivantes (Yezli-Khati, F, 2003):

1. Exprimer le mouvement d'entrée dans le domaine fréquentiel en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT). Cette transformée de Fourier aura une partie réelle et une partie imaginaire.

La transformée de Fourier d'une fonction continue dans le temps $f(t)$ est donnée par :

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad \text{III.2.2.1}$$

qui peut également s'écrire sous une forme complexe :

$$F(\omega) = E(\omega)e^{-i\phi(\omega)t} = C(\omega) - iS(\omega) \quad \text{III.2.2.2}$$

$$\text{avec : } E(\omega) = \sqrt{C(\omega)^2 + S(\omega)^2} \quad \text{III.2.2.3}$$

Où $E(\omega)$ représente le spectre d'amplitude de Fourier.

2. Définir la fonction de transfert entre la couche d'entrée et la couche de sortie, qui aura également une partie réelle et une partie imaginaire.
3. Faire le produit entre le spectre de Fourier au niveau du mouvement d'entrée et la fonction de transfert reliant la couche d'entrée et de sortie, ce produit donne le spectre de Fourier à la surface libre, qui aura également une partie réelle et une partie imaginaire. soit :

$$E_1(\omega) = E_{n+1}(\omega) \times |T_{1\ n+1}(\omega)| \quad \text{III.2.2.4}$$

$E_1(\omega)$: le spectre de Fourier à la surface libre.

$E_{n+1}(\omega)$: le spectre de Fourier au niveau du substratum rocheux

$|T_{1\ n+1}(\omega)|$: la fonction de transfert entre l'entrée et la surface.

4. Le spectre de Fourier à la surface libre étant connu, il est possible de déterminer l'accélérogramme à la surface libre par la transformée de Fourier inverse.

III.2.2.1. Solution pour un problème Mono-couche

Sur la base de ces étapes, un programme de calcul a été développé en langage MATLAB version.6 (Lapreste, J.T, 1999). Le profil de sol représenté sur la figure III.3 est utilisé pour valider le programme.

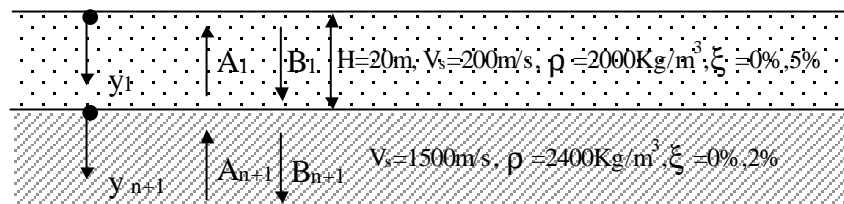


Figure.III. 3. Profil du sol monocouche

Le profil est soumis à l'excitation de l'événement du 21/09/83 enregistré à la station E02 du réseau SMART-1 (Taiwan) sur un affleurement rocheux dont la valeur maximale de l'accélération (PGA) est de 0.0197g, avec un pas du temps égal à 0.01s.

Les résultats obtenus sont regroupés sur les deux figures III.4 (comportement élastique $\xi=0\%$) et III.5 (comportement viscoélastique $\xi=2\%$), et la différence entre les deux événements générés par les deux modèles (élastique et viscoélastique) est représentée sur la figure III.6. La principale remarque tirée de ces deux figures est la suivante :

- L'absence de l'amortissement effectif dans le modèle élastique donne une surestimation vis-à-vis de l'événement généré à la surface libre. En plus, la fonction de transfert atteint des proportions plus importantes dans le cas d'un sol à comportement élastique que dans celui à comportement viscoélastique; ce qui signifie que l'amortissement influe sur la valeur de l'amplification en l'atténuant.

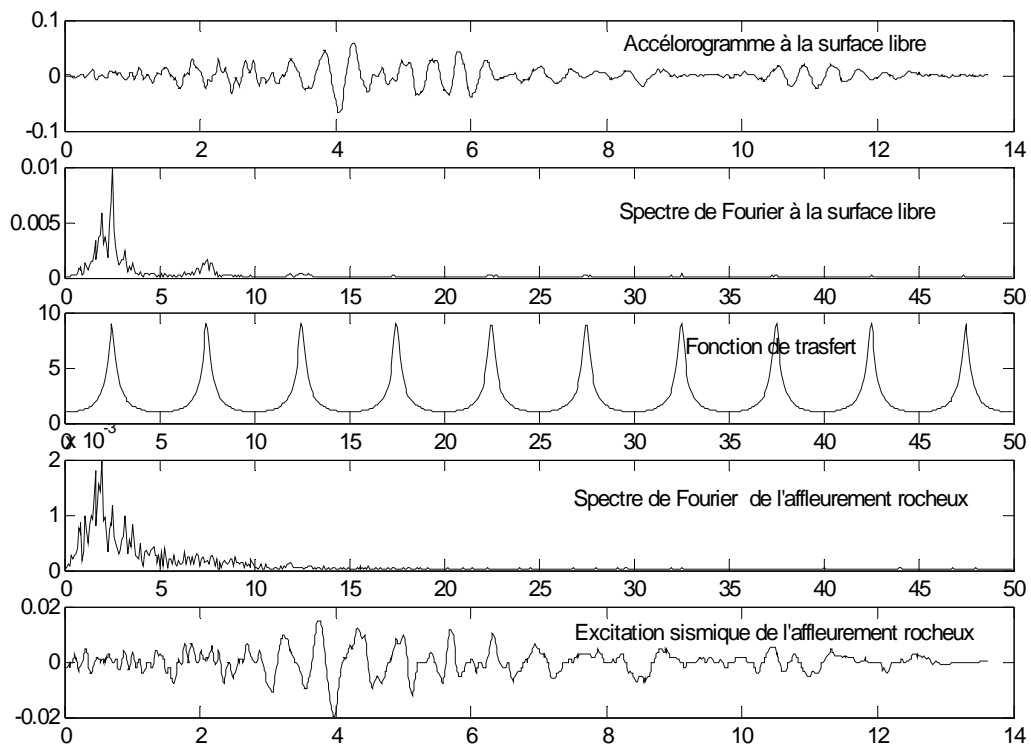


Figure.III. 4. Système mono-couche avec un comportement élastique

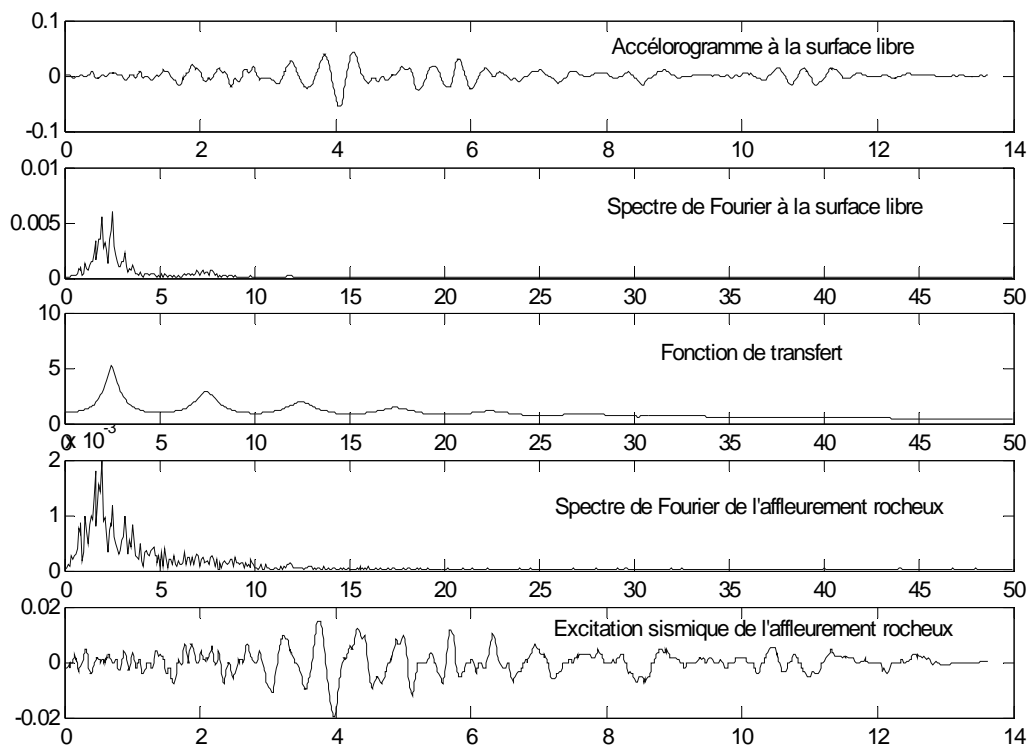


Figure.III. 5. Système mono-couche avec un comportement viscoélastique

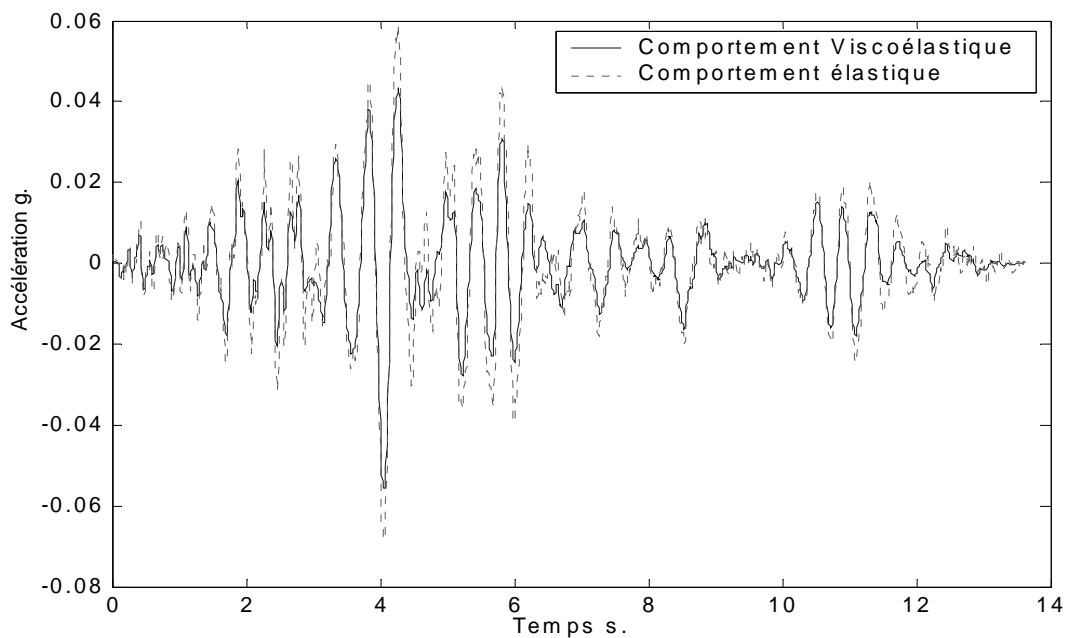


Figure.III. 6. Accélération à la surface

III.2.2.2. Solution pour un problème bicouche et multicouche

Les étapes utilisées dans la génération de la réponse du sol à la surface libre dans le problème mono-couche restent valables pour le cas bicouches et multicouches. Cependant, la seule différence réside dans les amplitudes A_i et B_i de chaque couche, qu'il faut les calculer pour obtenir l'amplitude d'entrée A_{n+1} .

Dans ce contexte, un autre programme en langage MATLAB nommé « RESPONSE.m » a été élaboré pour le problème bicouches et multicouches. Les caractéristiques mécaniques des deux profils de sol sont représentées sur le tableau III.1 et III.2 respectivement :

| Couches | H (m) | ρ Kg/m ³ | ξ | V_s m/s |
|-----------------|-------|--------------------------|-------|-----------|
| 1 | 13 | 2200 | 0.05 | 150 |
| 2 | 30 | 2200 | 0.05 | 200 |
| Affleur-rocheux | | 2400 | | 1500 |

Tableau.III. 1 Caractéristiques mécaniques du bicouche

| Couches | H (m) | ρ kg/m ³ | ξ | V_s m/s |
|-----------------|-------|--------------------------|-------|-----------|
| 1 | 3 | 1200 | 0.03 | 200 |
| 2 | 8 | 1400 | 0.04 | 260 |
| 3 | 10 | 1800 | 0.03 | 300 |
| 4 | 2 | 2100 | 0.04 | 550 |
| 5 | 13 | 2200 | 0.04 | 700 |
| Affleur-rocheux | | 2400 | | 850 |

Tableau.III. 2. Caractéristiques mécaniques du multicouche

Les deux profils sont soumis à l'excitation de l'événement du 21/09/83 enregistré à la station E02 du réseau SMART-1 (Taiwan) sur un affleurement rocheux dont la valeur maximale de l'accélération (PGA) est de 0.0197g, avec un pas du temps=0.01s.

Les résultats obtenus sont représentés sur les deux figures III.7 (bicouche) et III.8 (multicouche).

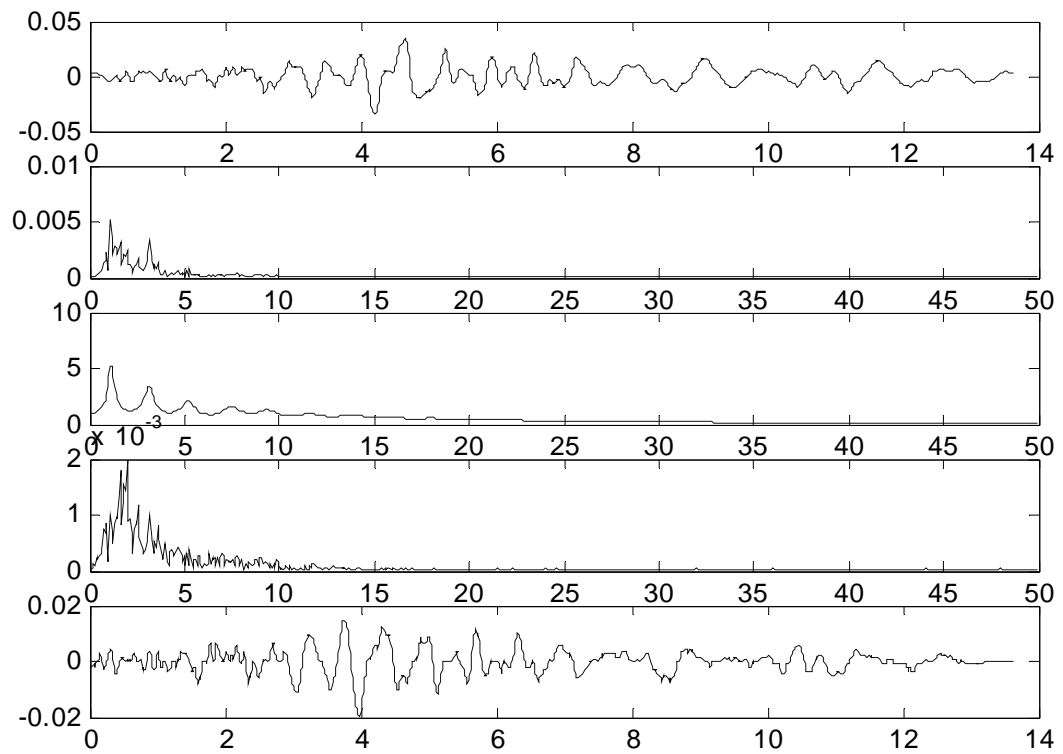


Figure.III. 7. Système bicouche avec un comportement viscoélastique

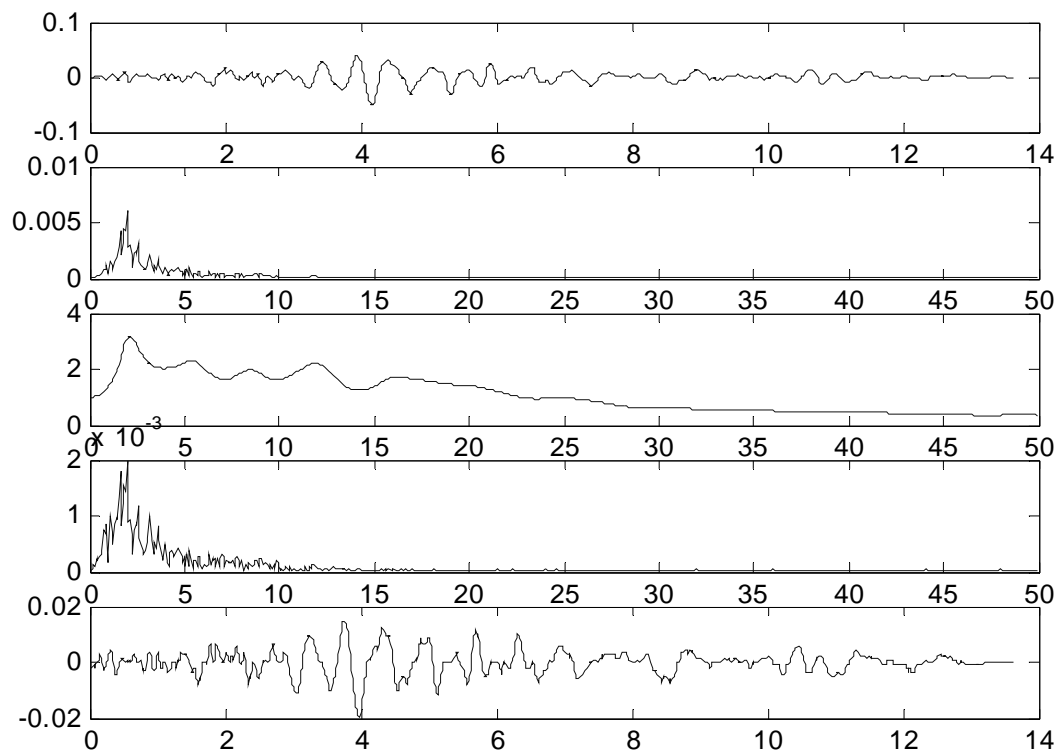


Figure.III. 8. Système multicouche avec un comportement viscoélastique

III.3. Modèle linéaire-équivalent pour un profil de sol

Dans un but de clarté et d'homogénéité dans les explications, le milieu est supposé là aussi composé de couches horizontales homogènes soumis à un champ d'onde d'incidence verticale.

Avant d'aller plus en avant dans les explications, il est utile de préciser, la notion de contrainte effective. Cette notion, introduite par le fondateur de la mécanique des sols moderne Karl von Terzaghi (1883-1963), est illustrée sur la Figure III.9 : La contrainte totale qui s'applique sur un mélange eau + grains est la somme de la contrainte reprise par le squelette granulaire (contrainte effective) et de la contrainte reprise par l'eau (pression interstitielle).

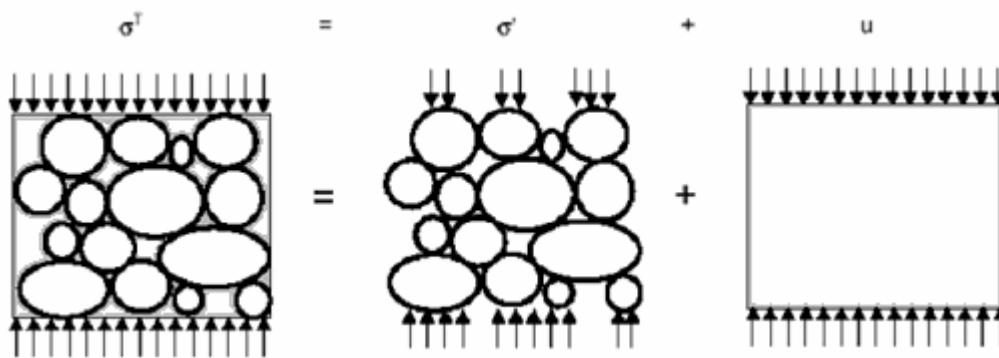


Figure.III. 9. Contrainte totale est la somme de la contrainte effective et de la pression interstitielle

Écrit en contraintes totales, le modèle linéaire équivalent ne constitue pas véritablement une loi de comportement, il s'agit plutôt de l'adaptation d'une méthode de calcul simple et rapide aux constatations expérimentales. Le grand avantage des méthodes linéaires est d'utiliser une relation de proportionnalité entre contraintes et déformations (Figure III.10), cette caractéristique permet de résoudre les équations d'équilibres dans le domaine fréquentiel. Principalement, pour cet avantage que le modèle linéaire équivalent est largement utilisé dans la détermination de la réponse sismique d'un profil de sol.



Figure.III. 10. Modèle linéaire, la déformation est proportionnelle à la contrainte.

$$\tau = G.\gamma$$

III.3.1

Une méthode simple pour rendre compte de la dissipation d'énergie observée expérimentalement, est d'ajouter au modèle de sol une viscosité (modèle de Kelvin-Voigt).

Cet ajout se traduit par une relation linéaire entre la contrainte et la dérivée de la déformation par rapport au temps (Figure III.11).

$$\tau = G \cdot \gamma + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad \text{III.3.2}$$

Où G est le module de cisaillement et η est la viscosité.

Avec :

$$\gamma(y, t) = \frac{\partial u(y, t)}{\partial y} \quad \text{et} \quad \dot{\gamma} = \frac{\partial \gamma(y, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 u(y, t)}{\partial y \partial t} \quad \text{III.3.3}$$

$u(y, t)$ est le déplacement horizontal à une profondeur y et à l'instant t .

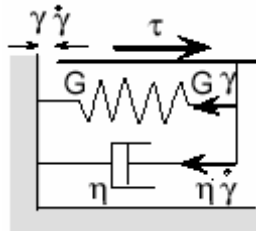


Figure.III. 11. Modèle de Kelvin-Voigt.

Dans le cas d'un mouvement harmonique, le déplacement, la déformation et la vitesse de déformation valent :

$$u(y, t) = U(y)e^{i\omega t}, \quad \gamma(y, t) = \frac{\partial U(y)}{\partial y} \cdot e^{i\omega t} = \Gamma(y)e^{i\omega t} \quad \text{et} \quad \dot{\gamma}(y, t) = \frac{\partial U(y)}{\partial y} \cdot i\omega e^{i\omega t} = i\omega \Gamma(y)e^{i\omega t}$$

Où $U(y)$ et $\Gamma(y)$ sont l'amplitude de déplacement et de déformation en cisaillement respectivement.

Or :

$$\tau(y, t) = \Lambda(y)e^{i\omega t} = G \cdot \gamma + \eta \cdot \dot{\gamma} = G \cdot \frac{\partial U(y)}{\partial y} \cdot e^{i\omega t} + \eta \cdot \frac{\partial U(y)}{\partial y} \cdot i\omega \cdot e^{i\omega t} = (G + i\omega\eta) \frac{\partial U(y)}{\partial y} \cdot e^{i\omega t}$$

$$\tau(y, t) = G^* \cdot \gamma(y, t) \Rightarrow G^* = (G + i\omega\eta)$$

Où G^* est le module de cisaillement complexe et $\Lambda(y)$ est l'amplitude de la contrainte de cisaillement; Après l'introduction du coefficient d'amortissement critique $\xi = \frac{\eta \cdot \omega}{2G}$ le module

$$\text{de cisaillement complexe devient : } G^* = G \cdot (1 + 2 \cdot i \cdot \xi) \quad \text{III.3.4}$$

Le problème est de savoir quel module de cisaillement et quel coefficient d'amortissement visqueux doivent être utilisés pour chaque couche de sol avec cette analyse linéaire équivalente.

En pratique, l'analyse linéaire est répétée afin d'ajuster le module de cisaillement en fonction du niveau de déformation en cisaillement résultant. Cette procédure d'itération comprend les étapes suivantes (Lussou. P, 2001) :

1. Première itération $K=1$, initialisation de $G=G_{\max}$ et $\xi = \xi_{\min}$.
2. Calcul de la transformée de Fourier du mouvement incident.
3. Calcul de $G^* = G^K \cdot (1 + 2 \cdot i \cdot \xi)$, $v_s^* = \sqrt{\frac{G^*}{\rho}}$.
4. Calcul des fonctions de transfert.
5. Multiplier le mouvement incident avec les fonctions de transfert.
6. calcul de la déformation γ au milieu de chaque couche
7. calcul de la transformée de Fourier inverse de γ pour obtenir $\gamma(t)$
8. calcul de la norme du vecteur déformation $\|\gamma(t)\|$
9. calcul du $\max(\|\gamma(t)\|)$
10. Évaluation de G^{k+1} et ξ^{k+1} pour $\chi = \frac{M-1}{10}$ fois $\max(\|\gamma(t)\|)$; M est la magnitude.
11. Si $\left| \frac{G^{k+1} - G^k}{G^k} \right| > \theta$ et $K < k$ alors retourner au point n°3.
12. Évaluation des vecteurs : accélération, vitesse et déplacement au sommet de chaque couche
13. Évaluation de la contrainte et de la déformation au milieu de chaque couche.

En général il n'est pas nécessaire de dépasser $k=10$ itérations pour faire converger l'algorithme. En pratique $\theta=5\%$ et χ est pris égal à 0,65 selon les recommandations des auteurs du programme SHAKE (Schnabel et al, 1972).

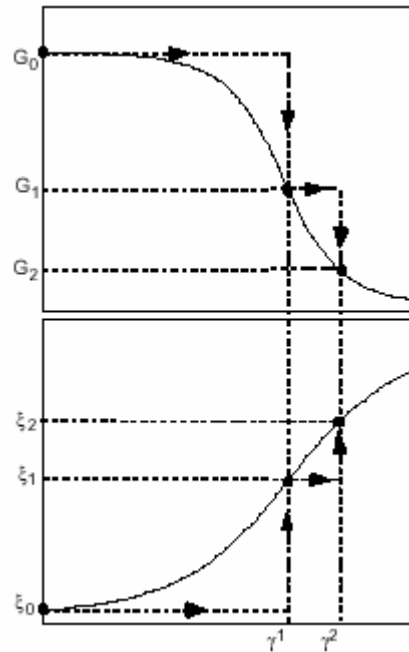


Figure.III. 12. Itération de module de cisaillement et de l'amortissement en fonction de l'amplitude de déformation.

III.4. Étude comparative et analyse des résultats

L'objectif ici est de tester l'aptitude des deux modèles (viscoélastique et linéaire équivalent) à évaluer la réponse sismique d'un profil de sol.

A cet égard, le code de calcul utilisé pour effectuer le calcul est le EERA (A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits) développé par (BARDET. J.P, et al 2000). (l'annexe 2).

Pour effectuer ce test en vraie grandeur, calcul et enregistrement obtenus in-situ sont confrontés. Les deux sites de : Oita-Ken sollicité par un mouvement modéré et de Shimane sous un mouvement fort sont utilisés.

III.4.1. Test sur le site de Oita-Ken

III.4.1.1. Présentation du site

Les deux sites (Saiki et Kamae) se situent dans le département de Oita-Ken sur l'île de Kyushu au sud ouest du Japon. L'événement utilisé est celui du 31/05/2003 d'une magnitude de 4.5, à une profondeur de 65km.

Le présent test est basé sur les résultats des essais in-situ tirés de la base de donnée K-NET (figure III.13 et III.14) et ce pour définir les propriétés mécaniques des deux modèles.

Dans ce contexte, les deux stations : OIT016 (Saiki) et OIT018 (Kamae -site de référence-) sont considérées.

| Code de site | Condition de site | Nom de site | Lal | Lon | Alt(m) | préfecture |
|--------------|---------------------|-------------|---------|----------|--------|------------|
| OIT016 | Remblai-Sable-Limon | SAIKI | 32.9713 | 131.9052 | 1 | OITAKEN |
| OIT018 | Roche | KAMAE | 32.7938 | 131.9275 | 10 | OITAKEN |

Tableau.III. 3. Informations sur les deux sites Saiki et Kamae

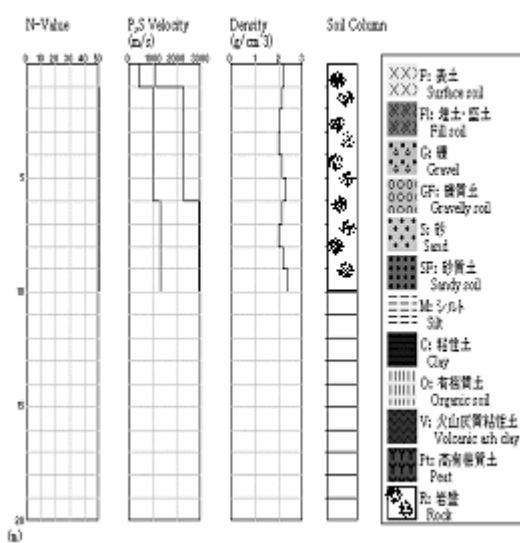


Figure.III. 13.Profil de sol de la station OIT018

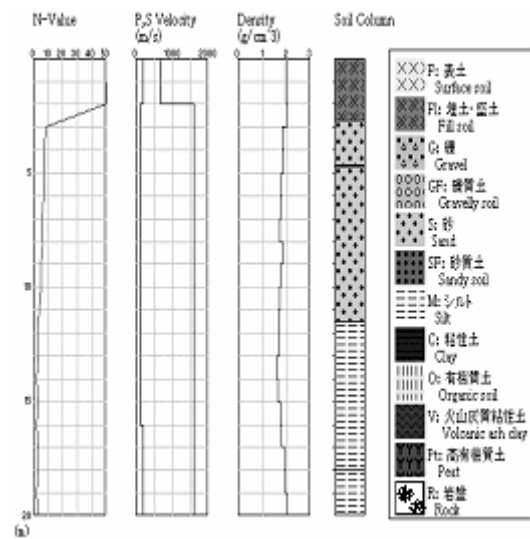


Figure.III. 14. profil de sol de la station OIT016

III.4.1.2. Calcul effectué

Le site de Kamae est un affleurement de la roche. L'événement enregistré à la station OIT018 est adopté comme étant un événement d'entrée des deux modèles viscoélastique et linéaire équivalent. Cependant, les caractéristiques élastiques de site de Saiki sont introduites dans les deux modèles et les événements obtenus sont confrontés avec celui enregistré à la station OIT016.

Les quatre histoires du temps enregistrées et obtenues par les deux modèles viscoélastique et linéaire équivalent sont représentées sur la figure III.15 et les spectres de réponses d'accélération (l'amortissement=5%) des deux stations OIT018 et OIT016 ainsi que ceux obtenus par les deux modèles viscoélastique et linéaire équivalent sont illustrés sur la figure.III.16.

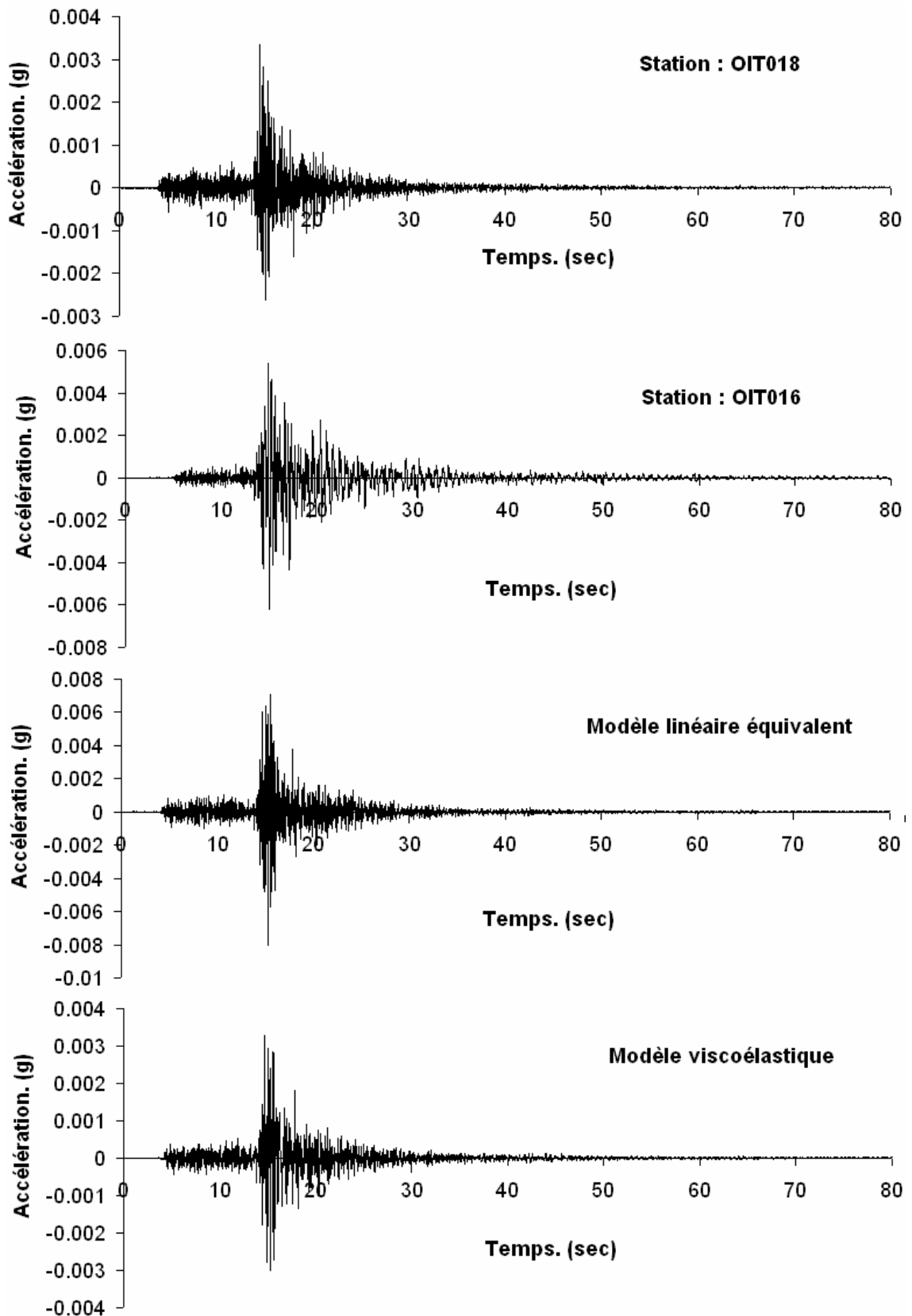


Figure.III. 15. Accélérogrammes enregistrés par la station OITO18 et OITO16 et obtenus par les deux modèles viscoélastique et linéaire équivalent.

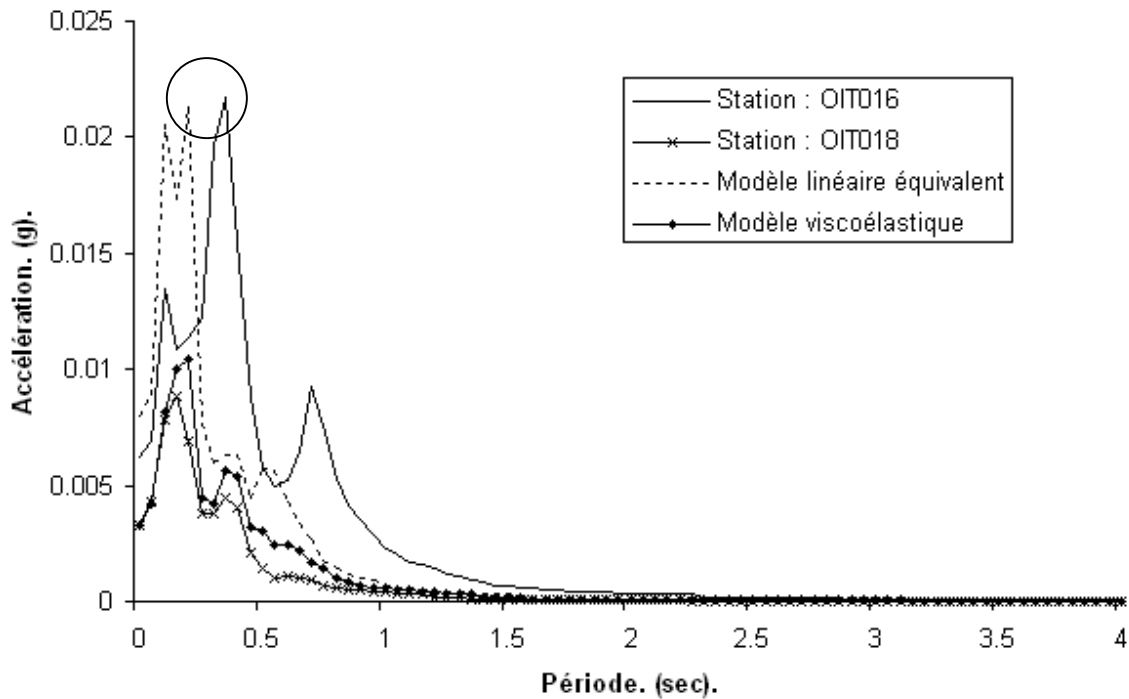


Figure.III. 16. Spectres de réponses en accélération (5% d'amortissement).

III.4.1.3. Analyse des résultats

Un examen détaillé des figures.III.15 et 16 montre que :

- Pour ce qui y des histoires du temps générées, il sont pratiquement identiques dans leurs allures générales avec celle enregistrée à la stations OITO16. Cependant, les valeurs des pics d'accélération (PGA) sont différents: les PGA du modèle viscoélastique et linéaire équivalent = 0.0035g et 0.0066g respectivement et celui enregistré à la station OITO16 vaut 0.0062g, tandis qu'à la station OITO18 le PGA est égal à 0.0033g. Donc, la comparaison entre les différentes valeurs, montre que le modèle linéaire équivalent converge vers l'événement enregistré à la station OITO16, contrairement au modèle viscoélastique qui a sous-estimé le PGA.
- Ce qui concerne les spectres de réponses obtenus par les deux modèles et enregistrés sur les deux stations, les remarques sont les suivantes: le modèle viscoélastique présente une faible amplification d'accélération en comparaison avec celle du cas réel (station OITO16), tandis que la valeur d'accélération spectrale maximale générée par le modèle linéaire équivalent converge vers la réponse maximale réelle (station OITO16), néanmoins, une différence réside au niveau de la période correspondante au pic; cette valeurs est égale à 0.35s dans la station OITO16 et 0.2s simulé par le modèle linéaire

équivalent. Cependant, le modèle linéaire équivalent a conservé la même période d'entrée qui est celle enregistrée à la station OITO18 (mouvement d'entrée).

D'autre part, un calcul supplémentaire a été effectué sur la durée significative des quatre réponses (Chapitre.V paragraphe V.4) (voir figure.III.15). Cette durée est égale à 8.74s pour le modèle linéaire équivalent et 9.52s sous le modèle viscoélastique. Pour les deux mouvements d'entrée et de sortie la durée significative vaut respectivement 4.96s et 13.94s. Ce calcul permet d'évaluer le comportement des deux modèles vis-à-vis de la durée de l'événement sismique. Les résultats obtenus montrent qu'il y a une grande différence entre la durée enregistrée à la sortie et les deux durées obtenues par les deux modèles. Ainsi, cette différence semble montrer que les deux modèles modélisent mal la durée de l'événement sismique.

III.4.2. Test sur le site de Shimane

III.4.2.1. Présentation du site

Le 06/10/2000 la région sud ouest du Japon sur l'île de Honshu a subi un violent séisme de magnitude 7.3 dont hypocentre est situé à une profondeur de 11 Km, le plan de la faille et la position géographique sont représentées sur la figure.III.18, le présent site possède deux accélérographes, le premier en surface et le deuxième en profondeur à -100m, le profil de la station SMNH01 est tiré de la base de donnée KIK-NET, figure.III.17.

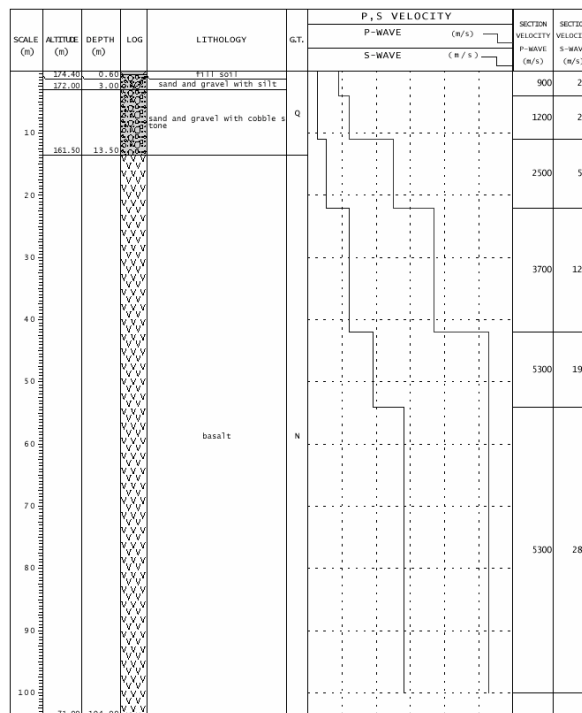


Figure.III. 17. Profil de sol de la station SMNH01

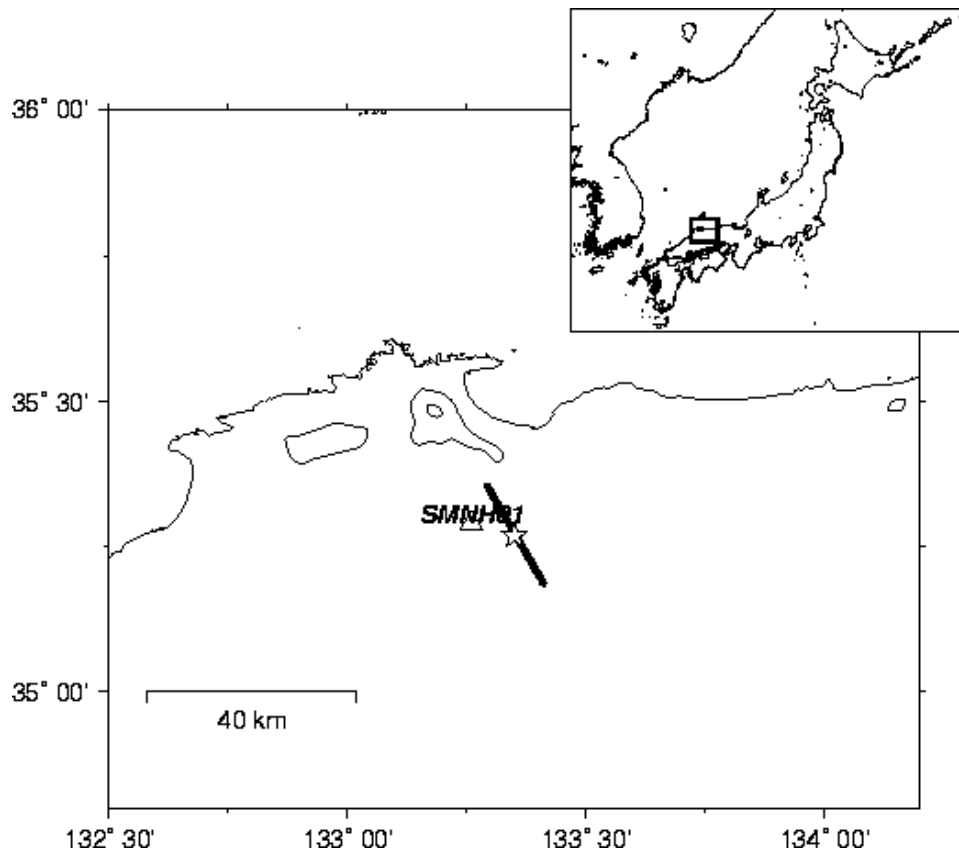


Figure.III. 18. Position géographique de la station et de l'épicentre.

III.4.2.2. Calcul effectué

Dans cette section les réponses sismiques d'un profil de sol (excité à sa base par une forte sollicitation) calculées par les deux modèles linéaire équivalent et viscoélastique sont comparées avec la réponse enregistrée à la surface. Pour ce faire, le profil représenté sur la figure.III.17 et le mouvement sismique enregistré en profondeur (figure.III.19) ont été utilisés. Le mouvement d'entrée présenté sur la figure.III.19 correspond à la composante nord-sud du mouvement sismique enregistré à 100 mètres de profondeur. Cette sollicitation est injectée dans les deux modèles.

Les accélérogrammes générés et enregistrés à la station SMNH01 (en surface et en profondeur) sont présentés sur la figure.III.19.

Les spectres de Fourier en accélération obtenues en profondeur (-100m), en surface, par le modèle linéaire équivalent et par le modèle viscoélastique sont illustrés sur la figure.III.20.

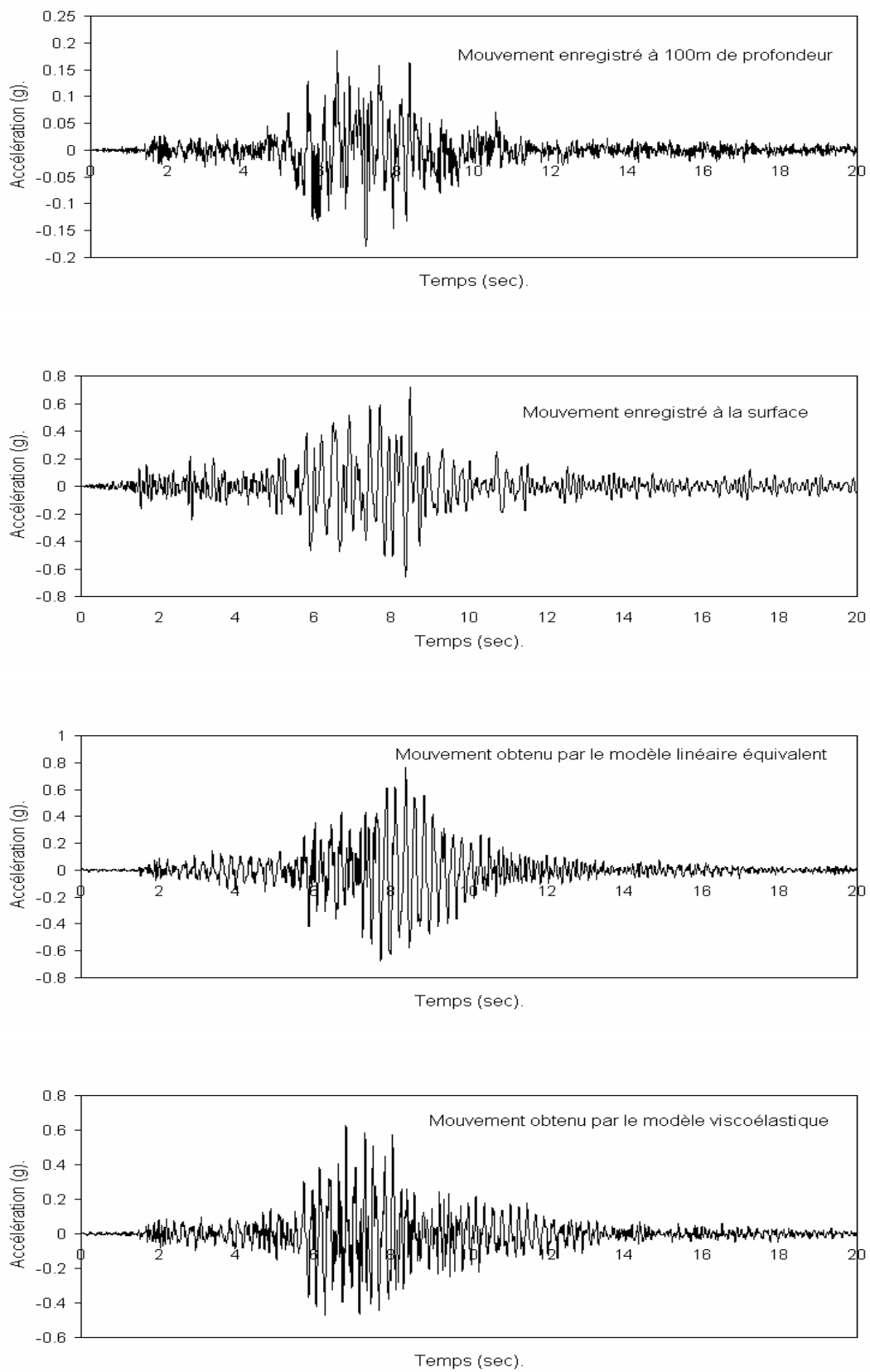


Figure.III. 19. Accélérogrammes enregistrés en profondeur (-100m) à la surface et obtenus par le modèle linéaire équivalent et par le modèle viscoélastique

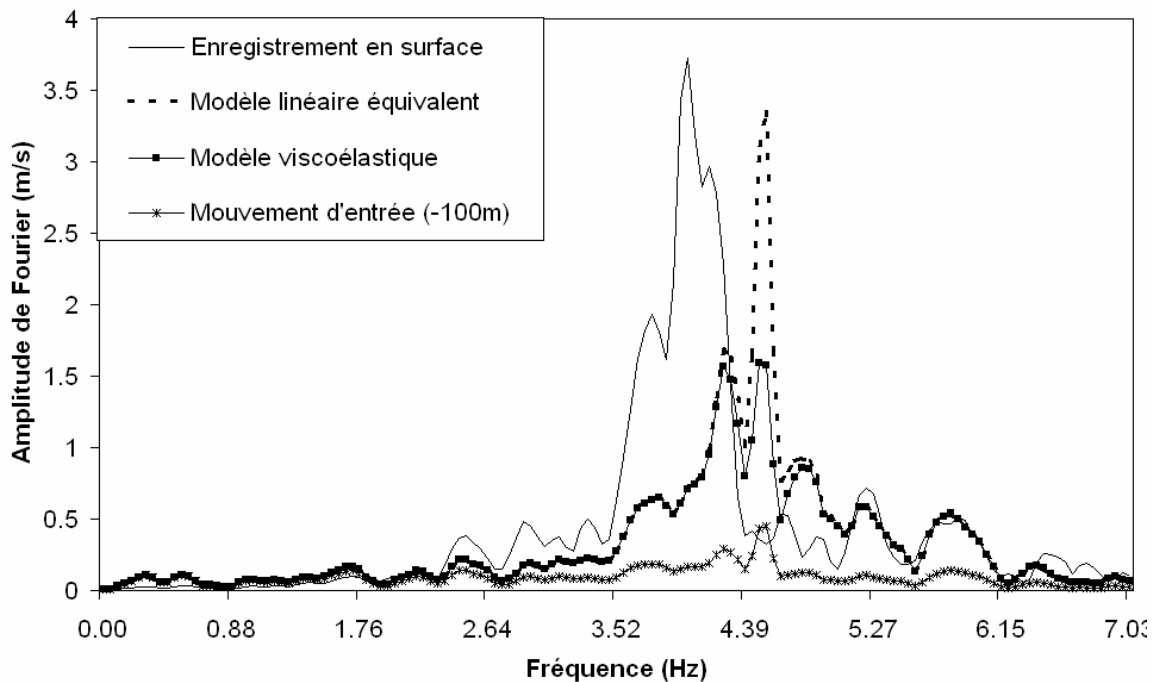


Figure.III. 20. Spectres de Fourier en accélération obtenues en profondeur (-100m), en surface, par le modèle linéaire équivalent et par le modèle viscoélastique.

III.4.2.3. Analyse des résultats

A partir de la figure.III.19 les remarques suivantes sont précisées :

L'accélérogramme enregistré en surface et ceux calculés par les deux modèles (viscoélastique et linéaire équivalent) semblent identiques dans leurs allures générales. En revanche, ils sont différents en détail. Par ailleurs, la comparaison entre les PGA montre que le modèle linéaire équivalent a bien réussi à estimer le PGA enregistré à la station SMNH01 (PGA=0.72g), et a donné une valeur de 0.76g, tandis que le modèle viscoélastique a sous-estimé le PGA, la valeur générée est égale à 0.61g.

Outre le succès obtenu par le modèle linéaire équivalent dans l'estimation du PGA, l'amplitude maximale de Fourier obtenue par ce modèle converge vers celle enregistrée à la surface, à savoir qu'elle est égale à 3.7m/s à la surface libre de la terre et 3.4m/s obtenu par le modèle linéaire équivalent (figure.III.20). En revanche, le modèle viscoélastique montre une grande sous estimation: la valeur générée est de 1.6m/s. Toutefois, le modèle linéaire équivalent a conservé le même contenu fréquentiel donné en profondeur; la figure.III.20

donne la similitude entre les deux. Elle montre également la différence entre le contenu fréquentiel de l'événement enregistré à la surface et celui généré par les deux modèles.

Par ailleurs, et pour mieux comprendre l'influence des deux modèles sur la durée de l'événement, un calcul basé sur la détermination de la durée significative de l'événement sismique est effectué, les résultats montrent que la durée significative des deux modèles est de 4.26sec pour le modèle linéaire équivalent et 5.56sec pour le modèle viscoélastique. Par contre, pour l'événement enregistré en surface la durée vaut 6.47sec. Donc cette différence est une faiblesse pour les deux modèles vis-à-vis de l'estimation de la durée de sortie, à savoir que la durée du mouvement d'entrée à 100m de profondeur est égale à 4.96sec.

Donc à la lumière de toutes ces remarques, les deux tests effectués semblent montrer que le modèle linéaire équivalent contrairement au modèle viscoélastique, parvient à reproduire les modifications du mouvement sismique; en terme de pic d'accélération du mouvement sismique et d'amplitude de Fourier. Seulement, il n'est sensible ni au contenu fréquentiel ni à la durée du mouvement d'entrée. A ce titre, Lussou (2001) a trouvé les mêmes conclusions.

III.5. Conclusion

Ce chapitre a permis de montrer que la présence de l'amortissement effectif dans le modèle viscoélastique et linéaire équivalent influe sur l'amplification sismique en l'atténuant et que le modèle linéaire équivalent est bien adapté pour traiter des problèmes de propagation des ondes. Il a également permis de montrer que le modèle linéaire équivalent porte bien son nom de " linéaire-équivalent " car il n'est sensible ni au contenu fréquentiel ni à la durée du mouvement d'entrée. Seule l'amplitude du mouvement d'entrée influe de manière significative sur la réponse du modèle. Donc, ce chapitre s'achève pour enclencher les chapitres qui viennent, du fait que, le modèle linéaire équivalent va être utilisé dans ce qui suit pour générer les événements sismiques à la surface libre de la terre.

CHAPITRE IV :

PARAMETRES DE LA CLASSIFICATION DES SITES

IV.1. Introduction

Dans les codes parasismiques l'effet de site est pris en considération par l'intermédiaire de l'introduction de certaines catégories de sol basées sur certains paramètres. Les paramètres géotechniques souvent utilisés sont : la vitesse de cisaillement moyenne sur toute la profondeur utilisée dans le RPA99 « Règlement parasismique algérien, 1999 » (DTR, 2003), la vitesse de cisaillement moyenne sur trente mètres de profondeur est considérée dans le code de bâtiments UBC97 « Uniform Building Code, 1997 » (Klimis.N.S,1998), est utilisé également dans « Eurocode8,1994 » (Bard. P.-Y,2000) et la fréquence caractéristique de sol, donnée par Arias (Saragoni. G.R, et al, 1998).

Dans le présent chapitre, une étude critique est présentée pour mettre en évidence l'utilisation de la vitesse de cisaillement moyenne sur trente mètres de profondeur V_{s30} comme un seul paramètre de classification des sites en examinant l'influence des structures géologiques profondes sur l'effet de site. Comme conséquence de cette étude, le couplage entre V_{s30} et la fréquence caractéristique de site F_0 .

IV.2. Définition des deux paramètres V_{s30} et F_0

Les deux paramètres V_{s30} et F_0 sont définis comme suit :

La vitesse de cisaillement moyenne sur trente mètres de profondeur :

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_i^n \frac{h_i}{V_{si}}} \quad (\text{lussou. P.2001}) \quad \text{IV.2.1}$$

La fréquence caractéristique du site : $F_0 = \frac{V_m}{4 \times H}$ (Das, 1983) IV.2.2

Avec : H : Épaisseur totale du profil.

V_m : Vitesse moyenne de cisaillement défini par la relation :

$$V_m = \frac{\sum_i^n h_i}{\sum_i^n \frac{h_i}{V_{si}}} \quad (\text{DTR, 2003}) \quad \text{IV.2.3}$$

h_i : Épaisseur de la couche i .

V_{si} : Vitesse de cisaillement à travers la couche i

IV.3. Classification de site suivant V_{s30}

Les trois événements (Chenoua 98 (Algérie), Tabas 78 (Iran) et Northridge 94 (USA)) enregistrés sur des sites rocheux et les quatre profils (Quyung (Chine), Fukiai (Japon) Kirovakan2 (Arménie) et Imperial (USA)) qui possèdent chacun des propriétés élastiques différentes sont utilisés pour obtenir les rapports spectraux (Figure.IV.1,2 et 3) et ce par le biais de EERA (Annexe 2).

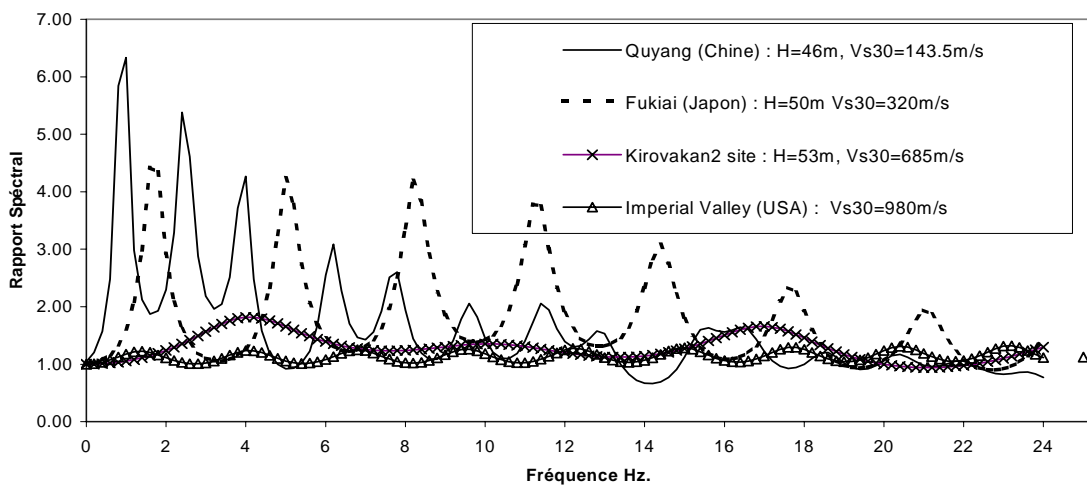


Figure.IV. 1. Rapports spectraux des sites sollicités par l'événement de Chenoua (Algérie) dont la fréquence caractéristique de l'événement $F_{s0}=3.71\text{Hz}$, $\text{PGA}=0.036\text{g}$

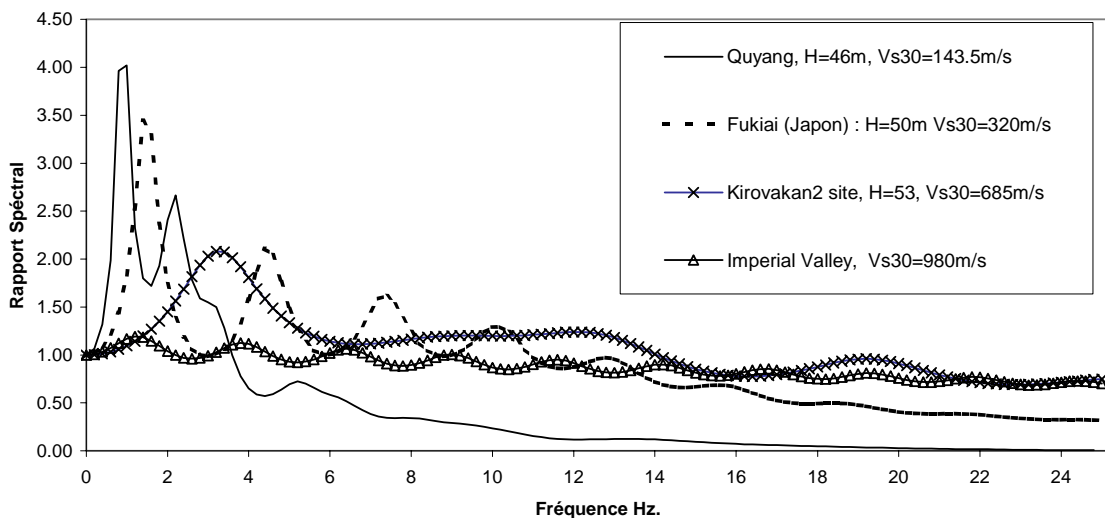


Figure.IV. 2. Rapports spectraux des sites, sollicités par l'événement de Tabas (Iran) dont $F_{s0}=1.29\text{Hz}$, $\text{PGA}=0.378\text{g}$

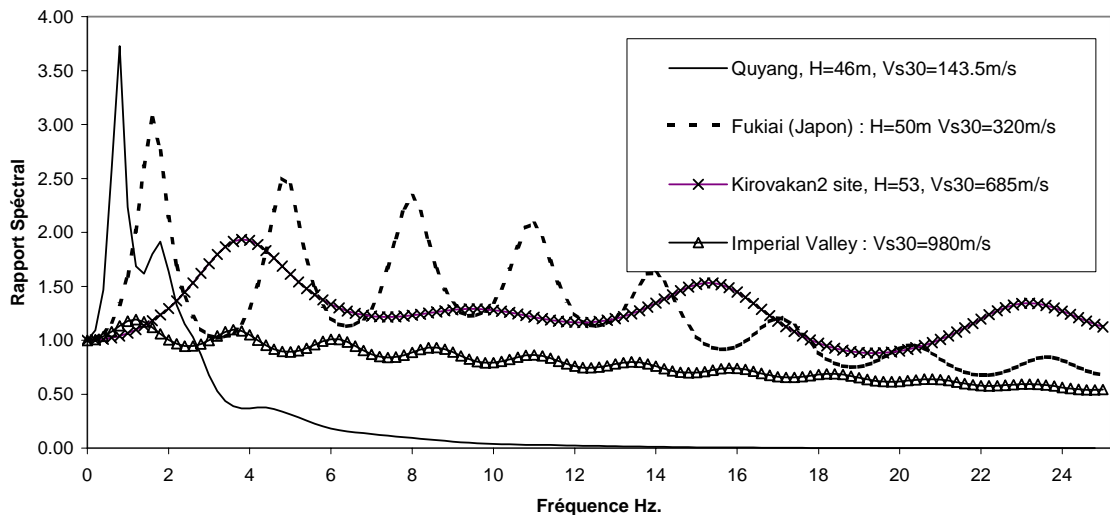


Figure.IV. 3. Rappports spectraux des sites, sollicités par l'événement de Northridge dont USA
 $F_{s0}=3.36\text{Hz}$, $\text{PGA}=1.58g$

Les figures IV.1, 2 et 3 représentent les rapports spectraux des quatre sites en fonction de la fréquence. l'examen de ces trois figures montre que:

1. Les fréquences ne sont pas amplifiées de la même façon, on observe une atténuation des amplitudes des pics de résonance, ce phénomène est dû à la nature visqueuse des frottements introduite dans le code de calcul EERA; cette nature implique que les pics de résonance soient d'autant plus atténués et filtrés que la fréquence de résonance (où la fréquence du sol coïncide avec la fréquence du signal) est élevée. Ceci conduit naturellement à considérer comme caractéristique du sol le premier pic.
2. La comparaison entre les premiers pics de résonance des quatre sites, montre que les sites de Quayang ($V_{s30}=143.5\text{m/s}$) et Fukiai ($V_{s30}=320\text{m/s}$) ont engendré une grande amplification qui est plus remarquable sur le site de Quayang que sur Fukiai. En revanche, elle est moins significative dans le cas de Kirovakan2 ($V_{s30}=685\text{m/s}$) et faible au niveau de Imperial ($V_{s30}=980\text{m/s}$). Cette remarque est valable pour les trois figures. Par conséquent, la classification de site par le paramètre V_{s30} est très significative pour les premiers pics de résonances. V_{s30} est inversement proportionnelle à la valeur de l'amplification des premiers pics de résonance.

IV.4. Étude critique et analyse des résultats :

La question suivante se pose :

- V_{S30} est-il le meilleur paramètre possible pour décrire l'effet de site ?

Pour répondre à cette question, un cas réel tiré de la base de données KIK-NET (Japon) a été utilisé. Il s'agit de l'événement du 23/05/1998 qui a une magnitude de 5.3. Dans cette analyse deux sites ont été choisis SIGH01 et OSKH01: les quatre histoires du temps enregistrées en surface et en profondeur au niveau des deux sites sont représentées sur Les figures.IV.4, 5 respectivement. Les sites SIGH01 et OSKH01 ont à peu près la même vitesse de cisaillement V_{S30} 562m/s et 500m/s respectivement avec des fréquences caractéristiques différentes 0.2Hz pour OSKH01 et 2.58Hz pour SIGH01

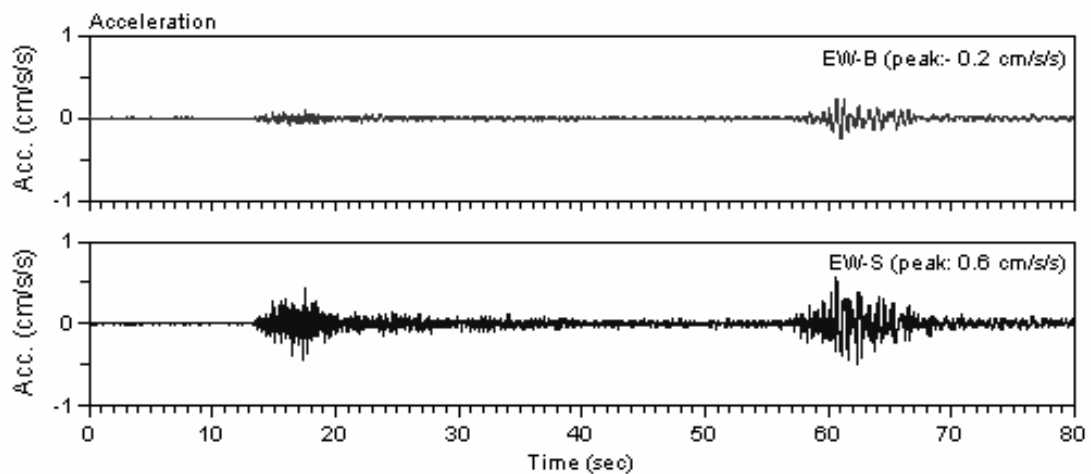


Figure.IV. 4. Les deux signaux enregistrés en surface (en bas de la figure) et en profondeur (-100m) sur le site de SIGH0, l'épaisseur du profil sédimentaire est de 32.5m (sable et gravier avec argile)

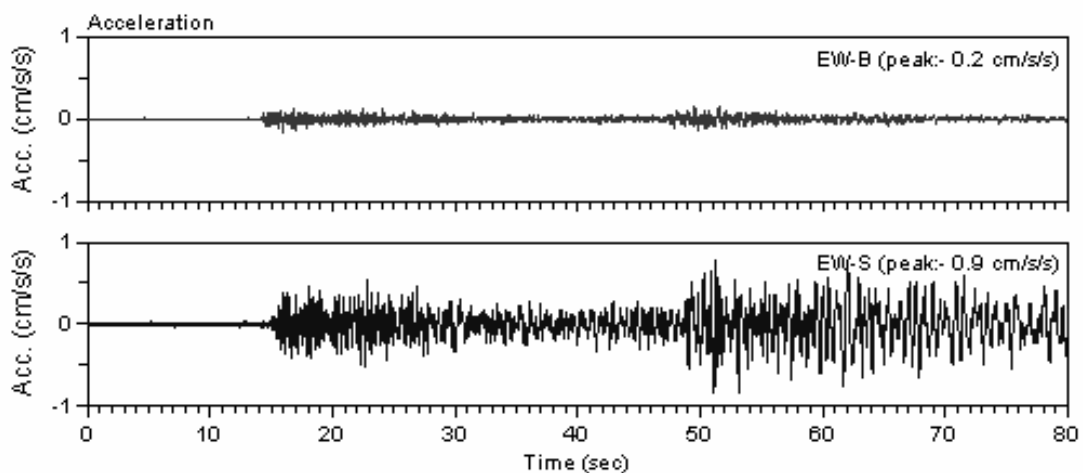


Figure.IV. 5. Les deux signaux enregistrés en surface (en bas de la figure) et en profondeur (-1505m) sur le site de OSKH0, l'épaisseur du profil sédimentaire est de 556m (argile avec sable fin)

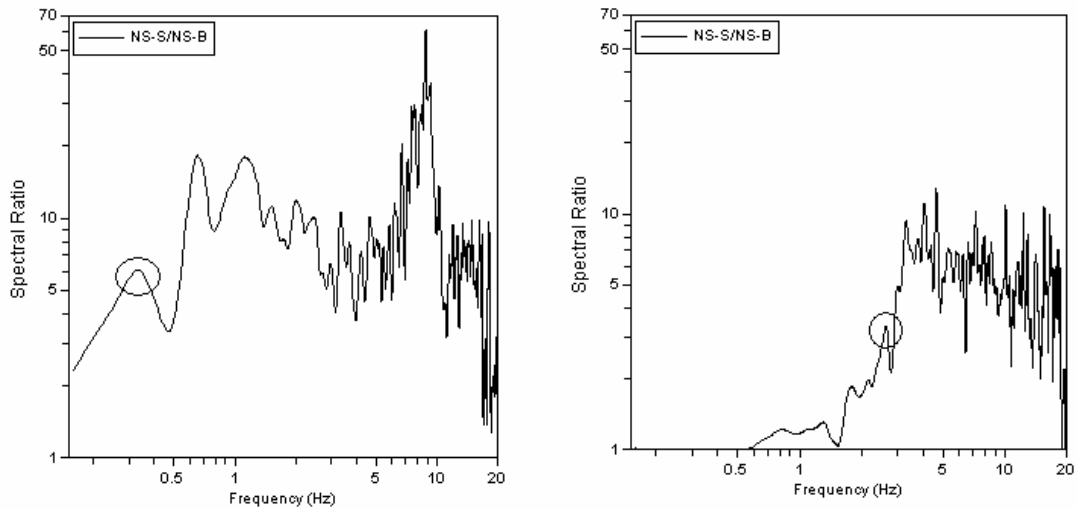
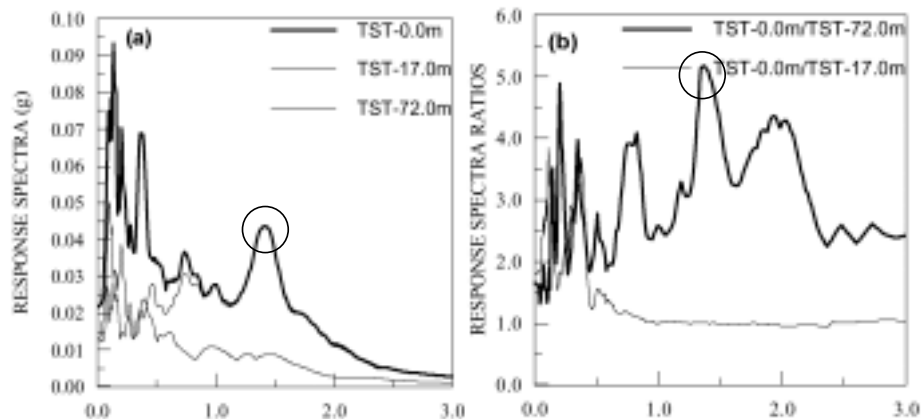


Figure.IV. 6. Rapports spectraux des deux sites OSKH01(à gauche) et SIGH01(à droite)

La figures.IV.6 représente les deux rapports spectraux des deux sites en fonction de la fréquence. Elle montre clairement ce point : malgré que les deux vitesses de cisaillements moyennes V_{s30} des deux sites OSKH01 et SIGH01 sont à peu près semblables (500 m/s et 562 m/s respectivement) les amplifications engendrées par les deux profils sont très différentes : pour le profil de sol OSKH01 l'amplification spectrale vaut 6.0 au niveau de la fréquence caractéristique de site (0.2Hz) et est égale à 3.4 pour le profil du sol SIGH01 à la fréquence caractéristique de site (2.85Hz). En raison de cette forte différence de la fréquence, les effets de site sur ces deux sites sont tout à fait différents.

Dans ce contexte, Pitilakis et al (1997) ont présenté une étude critique dans la quelle ils montrent que l'utilisation seulement des trente premiers mètres pour estimer l'effet de site peut mener aux résultats ambigus :

Le premier exemple est pris du réseau d'accélérographes d'Euroseistest (figures.IV.7 a,b) et ce pour le même évènement; le second est un évènement du mouvement fort enregistré à Port Island pendant le séisme de Kobe 1995 (figures.IV.7 c,d). La réponse spectrale à différente profondeur et son rapport spectral sont présentés.



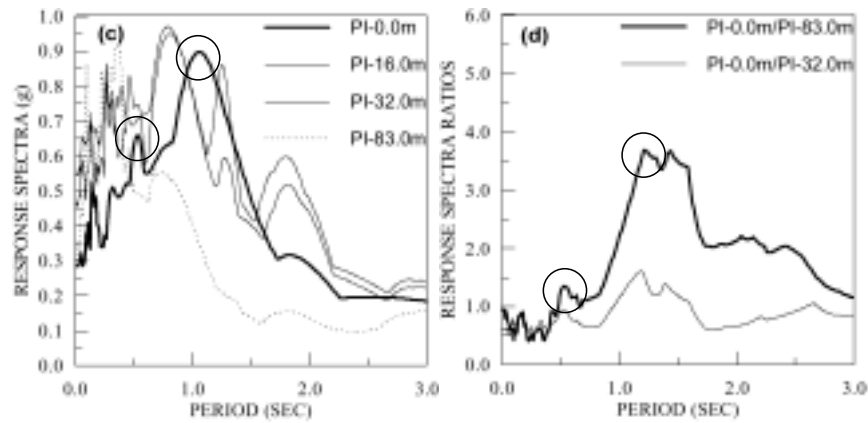


Figure.IV. 7. Euroseistest (en haut), Port Island (en bas), spectre de réponse à gauche, le rapport spectral à droite.

Dans le cas de Euroseistest, une claire amplification au niveau des hautes fréquences ($T < 0.5 \text{ sec}$) est observée et une présence d'une amplification significative dans les faibles fréquences ($1.0 < T < 2.0 \text{ sec}$) et ce pour le rapport spectral obtenu entre la surface et à 72m de profondeur. Au contraire, aucune amplification n'est enregistrée entre la surface et 17m de profondeur dans la plage des faibles fréquences. Le phénomène de la résonance 1D à la fréquence caractéristique de site (0.7 Hz , $T = 1.43 \text{ sec}$) combiné avec la contribution des ondes de surface générées localement disparaissent quand les couches superficielles sont seules prises en compte.

Concernant les stations de Port Island, due à la liquéfaction et au comportement non linéaire fort de la couche superficielle de sol que le mouvement du sol est déamplifié et la plus grande réponse est observée à la fréquence caractéristique du dépôt (1.0 Hz , 1.0 sec). Le rapport spectral enregistré entre la surface et -32.0m présente une faible amplification pour $T > 0.5 \text{ sec}$, tandis que l'amplification du rapport spectral entre la surface et -83.0m (sol ferme et dur) est tout à fait importante.

A la lumière de toutes ces remarques, on peut conclure que la vitesse de cisaillement V_{s30} est un paramètre qui représente un niveau de confiance acceptable vis-à-vis de la classification de site, mais sa faiblesse réside dans le cas où l'effet de site est dû à des structures profondes telles que les bassins sédimentaires.

Pour palier cette gêne et augmenter le niveau de confiance vis-à-vis de la classification de site, Lussou (2001) a ajouté un autre paramètre: la fréquence fondamentale de résonance de site déduite à partir de la méthode H/V représenté dans le chapitre II. De son côté, Bard et al (2003) ont montré que la fréquence calculée à partir de la méthode H/V est similaire à celle obtenue par la formule $F_0 = V_m / 4H$.

Donc, sur la base des deux travaux réalisés par Iussou (2001) et Bard et al (2003) et en raison des imperfections principales de la classification V_{s30} un système a été développé pour caractériser un site : basé sur les deux paramètres V_{s30} et F_0 où :

- V_{s30} : Vitesse de cisaillement moyenne sur trente mètres de profondeur (équation IV.2.1) .
- F_0 : Fréquence caractéristique de site (équation IV.2.2).

IV.5. Conclusion

Le but principal de ce chapitre est de trouver des paramètres simples et efficaces pour classer un site. L'analyse des différents résultats obtenus a permis de conclure que la vitesse de cisaillement moyenne sur trente mètres de profondeur V_{s30} est un paramètre qui représente un meilleur niveau de confiance vis-à-vis de la classification de site lorsqu'il s'agit d'une structure peu profonde. En revanche, une structure géologique plus profonde telle que les bassins sédimentaires, peut avoir une forte influence sur les effets de site qui ne sont pas pris en considération si une classification simple de site est basée uniquement sur des mesures dans les couches supérieures.

Pour surmonter cette gêne, un système a été développé pour caractériser un site : basé sur les deux paramètres V_{s30} et F_0 . Désormais, dans le prochain chapitre, ces deux paramètres vont être utilisés dans la nouvelle approche «réseaux de neurones» qui va contribuer à l'étude de l'effet de site.

CHAPITRE V :

ESTIMATION DU RISQUE LIE A L'EFFET DE SITE

ET GENERATION D'UN SPECTRE DE REPONSE A LA SURFACE

V.1. Introduction

Dans le chapitre II plusieurs méthodes d'estimation de l'effet de site ont été présentées. La plupart de ces méthodes nécessitent des dispositifs très sophistiqués «exemple des deux réseaux d'accélérographes K-NET et KIK-NET», ce qui rend l'opération très coûteuse. Pour surmonter cette gêne, la méthode de réseaux de neurones artificiels est utilisée dans le présent chapitre. Dans ce contexte, deux systèmes de réseaux de neurones sont développés. Le premier pour quantifier le risque lié à l'effet de site susceptible d'être néfaste à la construction et le deuxième pour générer le spectre de réponse à la surface libre de la terre.

Pour ce faire, les réseaux de neurones de type perceptron multicouche, avec la règle de Widrow-Hoff pour l'apprentissage (voir Annexe 1) sont utilisés. Les entrées du premier système neuronal sont les paramètres caractérisant le profil de sol, à savoir sa fréquence caractéristique, son épaisseur totale et sa vitesse de cisaillement sur trente mètres de profondeur et les sorties sont: le facteur moyen d'amplification spectrale en accélération entre [0,0.5]s et le facteur d'amplification spectrale en accélération à 1.0s. De ce fait, le niveau de risque est classé en trois catégories: faible risque, moyen risque et haut risque (Paolucci. R et al, 2000). Pour le deuxième système neuronal, la simulation d'un spectre de réponse d'accélération en surface à partir de celui enregistré en profondeur par la méthode neuronale est effectuée avec l'utilisation des données du réseau d'accélérographes KIK-NET. Les inputs sont : L'accélération spectrale enregistrée en profondeur et la période correspondante, ainsi que l'output est l'accélération spectrale enregistrée à la surface libre de la terre.

V.2. Classification des sites

A la lumière des résultats trouvés dans le chapitre précédent, une classification de site basée sur les deux paramètres V_{s30} et F_0 est adoptée. Dans ce contexte, la question suivante peut être posée: est-ce que la classification couplée V_{s30} - F_0 est possible :

Pour répondre à cette question, 13 profils de sols regroupés dans le tableau.V.2 ont été choisis:

La classification des profils de sols basée sur V_{s30} est représentée sur la figure V.1. Dans ce contexte, quatre classes sont définies, à savoir :

- ✓ Classe « A » profils représentant une V_{s30} inférieur à 200m/s.
- ✓ Classe « B » profils représentant une V_{s30} comprise entre 200m/s et 400m/s.
- ✓ Classe « C » profils représentant une V_{s30} comprise entre 400m/s et 800m/s.
- ✓ Classe « D » profil représentant une V_{s30} supérieur ou égale à 800m/s.

En outre, la Figure V.1 illustre aussi la classification des profils de sols suivant F_0 . Il en résulte la classification suivante :

- ✓ Classe « 1 » profils représentant une F_0 inférieur à 1.67Hz,
- ✓ Classe « 2 » profils représentant une F_0 comprise entre 1.67Hz et inférieure à 3.33Hz,
- ✓ Classe « 3 » profils représentant une F_0 comprise entre 3.33Hz et inférieure à 6.67Hz
- ✓ Classe « 4 » profil représentant une F_0 supérieur ou égale à 6.67Hz.

Par voie de conséquence, la loi empirique représentée dans la figure V.1 combine les deux classifications V_{s30} et F_0 tout en gardant les mêmes valeurs limites. Ainsi, la classification illustrée dans le tableau V.1 est désormais utilisée. La remarque principale à souligner est que la relation entre V_{s30} et F_0 est linéaire, c'est-à-dire F_0 augmente en fonction de V_{s30} d'une façon plus au moins constante, ce qui amené à conclure que le couplage entre F_0 et V_{s30} est possible.

Toutefois, attention aux sites où le couple (V_{s30} , F_0) est très éloigné de la relation empirique observée (figure.V.1), ces sites réclament une analyse particulière. Une grande épaisseur de sédiments provoque un effet de site caractéristique avec une fréquence caractéristique F_0 faible. Pour prendre en compte l'effet de site dans un tel cas, il vaut mieux utiliser la classification F_0 que la classification V_{s30} .

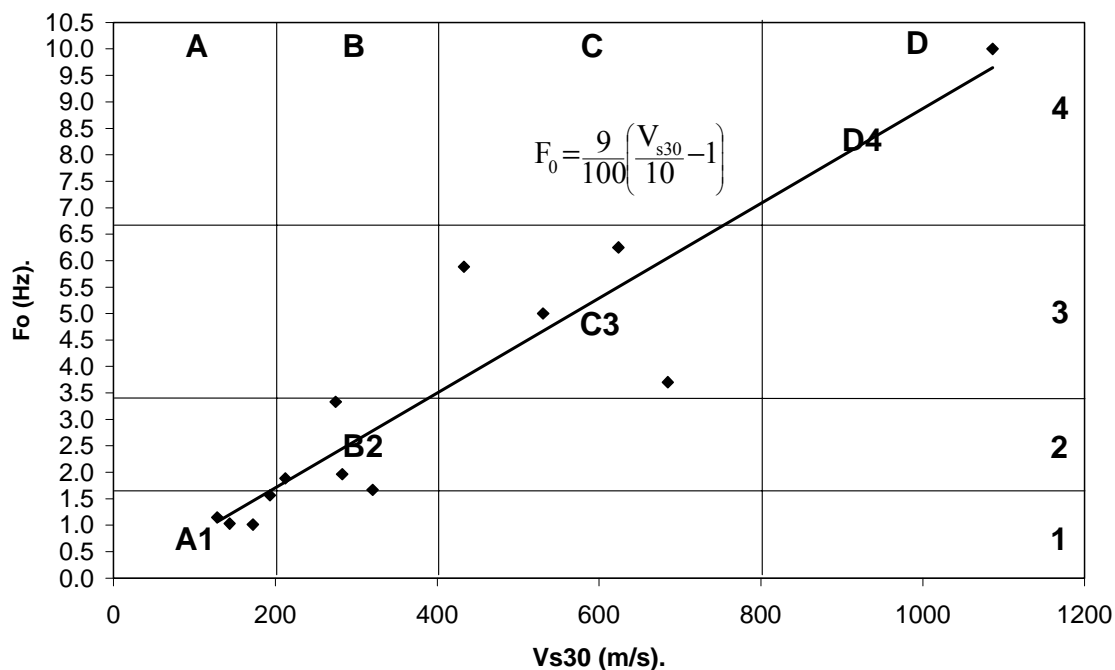


Figure.V.1. Distribution des données accordées avec leurs V_{s30} et F_0 . Les lignes horizontales et verticales représentent la classification de site suivant le couple F_0 - V_{s30} .

| Type de sol | Vitesse de cisaillement V_{s30} (m/s) | La fréquence caractéristique F_0 (Hz) |
|------------------|---|---|
| A1 : très meuble | <200 | <1.67 |
| B2 : meuble | $200 \leq V_{s30} < 400$ | $1.67 \leq F_0 < 3.33$ |
| C3 : Ferme | $400 \leq V_{s30} < 800$ | $3.33 \leq F_0 < 6.67$ |
| D4 : rocheux | ≥ 800 | ≥ 6.67 |

Tableau.V. 1. Classification de site adoptée.

Dans cette étude, les sites sont classés en quatre groupes A1 (Très meuble), B2 (meuble), C3 (ferme) et D4 (rocheux) en fonction de deux paramètres : La vitesse de cisaillement moyenne sur trente mètres de profondeur V_{s30} et la fréquence caractéristique de site F_0 .

Par ailleurs, dans le tableau V.2 la fréquence caractéristique F_0 est comprise entre 1.01Hz et 10Hz, l'épaisseur totale du profil H appartient à l'intervalle [29-53]m et la vitesse de cisaillement moyenne sur trente mètres de profondeur V_{s30} est comprise entre 128.34m/s et 1086.21m/s. D'une manière générale, chaque classe est représentée par quatre profils hormis la classe D1 (un seul profil).

En outre, chaque profil comporte plusieurs couches, chacune possède des informations sur la nature, l'épaisseur, la densité et la vitesse de cisaillement. Ces informations ont permis de

calculer V_{s30} , F_0 et H qui vont être utilisés dans le modèle neuronal comme des paramètres d'entrées.

| Stations | Pays | F_0 (Hz) | H (m) | V_{s30} (m/s) | Classification de site |
|---------------|---------|------------|---------|-----------------|------------------------|
| KYT004 | Japon | 1.15 | 30 | 128.34 | A1 |
| Quyng | Chine | 1.03 | 46.2 | 143.5 | |
| Great Hanshin | Italie | 1.01 | 55 | 172.13 | |
| Port Island | Japon | 1.56 | 32 | 193.28 | |
| Friaul | Italie | 1.89 | 29 | 212.36 | B2 |
| FKO004 | Japon | 3.33 | 30 | 274.67 | |
| Kirovaka3 | Arménie | 1.96 | 50 | 282.69 | |
| Fukiai | Japon | 1.67 | 50 | 320.15 | |
| MAT | Japon | 5.88 | 30 | 433 | C3 |
| MYZ002 | Japon | 5.00 | 30 | 530.89 | |
| KBU | Japon | 6.25 | 29.5 | 624 | |
| Kirovaka2 | Arménie | 3.70 | 53 | 685 | |
| IWT008 | Japon | 10.00 | 30 | 1086.21 | D4 |

Tableau.V. 2. Informations sur les profils de sols utilisés dans le modèle

V.3. Génération de l'accélération à la surface libre

Les événements d'entrées (tableau.V.3) sont enregistrés sur des sites rocheux et le logiciel EERA est utilisé pour générer les événements à la surface libre des sites considérés (tableau V.2). Il s'agit ici de 390 événements obtenus par génération, soit :

$$30_{\text{événements d'entrées}} \times 13_{\text{profils}} = 390_{\text{événements de sites}}$$

Le choix et le tri des événements d'entrées illustrés dans le tableau.V.3 sont basés sur deux critères :

- ✓ L'accélération maximale PGA : Il est déjà précisé dans le chapitre III que seule l'amplitude du mouvement d'entrée influe de manière significative sur la réponse du modèle linéaire équivalent et cela justifie le choix d'un tel paramètre.

- ✓ Le site d'enregistrement : Les mouvements d'entrées sont enregistrés sur un site de type D4 (considéré dans cette étude comme site de référence).

| N° | Séisme | Pays | date | Comp. | Mag. | PGA (g) |
|----|----------------------|------------|------------|-------|------|---------|
| 1 | Tabas | Iran | 16/09/1978 | N10E | 7.4 | 0.378 |
| 2 | Whittier Narrows | U.S.A | 01/10/1987 | N08W | 6.1 | 0.179 |
| 3 | Petrolia | U.S.A | 26/04/1992 | 360 | 6.6 | 0.255 |
| 4 | Morgan Hill | U.S.A | 24/04/1984 | 230 | 6.1 | 0.058 |
| 5 | Sierra Madre | U.S.A | 28/06/1991 | 0 | 5.8 | 0.271 |
| 6 | New Zeland | New Zeland | 29/11/1997 | N08E | 5.7 | 0.004 |
| 7 | Northridge | U.S.A | 17/01/1994 | 90 | 6.7 | 0.104 |
| 8 | Lama prieta | U.S.A | 18/10/1989 | 0 | 7 | 0.427 |
| 9 | Landers | U.S.A | 28/06/1992 | 90 | 7.3 | 0.278 |
| 10 | Big Bear | U.S.A | 28/06/1992 | 90 | 6.5 | 0.042 |
| 11 | New Zeland | New Zeland | 25/10/1999 | S11E | 6 | 0.013 |
| 12 | Petrolia | U.S.A | 25/04/1992 | 90 | 7 | 1.039 |
| 13 | Chalfant Valley | U.S.A | 20/07/1986 | 70 | 5.9 | 0.165 |
| 14 | Coalinga | U.S.A | 02/05/1983 | 0 | 6.5 | 0.061 |
| 15 | Chalfant Valley | U.S.A | 21/07/1986 | 160 | 6.4 | 0.095 |
| 16 | Big Bear | U.S.A | 28/06/1992 | 360 | 6.5 | 0.534 |
| 17 | Chenoua | Algérie | 29/10/1989 | N90E | 5.9 | 0.036 |
| 18 | Victoria Cerroprieto | Italie | 09/06/1980 | 45 | 6.4 | 0.621 |
| 19 | El Asnam | Algérie | 10/11/1980 | NS | 4.2 | 0.048 |
| 20 | Straitof Gibralta | Spain | 10/11/1980 | EW | 5.2 | 0.025 |
| 21 | Ardal | Iran | 06/04/1977 | long | 6 | 0.891 |
| 22 | Valnerina | Italie | 19/09/1979 | EW | 5.8 | 0.087 |
| 23 | Gazli | U.S.S.R | 17/05/1976 | 90 | 6.8 | 0.717 |
| 24 | Nahanni | Italie | 23/12/1985 | 10 | 6.8 | 0.977 |
| 25 | Tottori | Japon | 06/10/2000 | NS | 7.3 | 0.357 |
| 26 | Japon | Japon | 26/05/2003 | NS | 7 | 0.213 |
| 27 | Japon | Japon | 24/03/2001 | EW | 6.4 | 0.02 |
| 28 | CHICHI | Taiwan | 09/20/1999 | EW | 7.6 | 0.11 |
| 29 | Hokkaido | Japon | 26/09/2003 | EW | 7.8 | 0.126 |
| 30 | Japon | Japon | 08/03/1998 | EW | 4.4 | 0.019 |

Tableau.V. 3. Événements enregistrés sur un site de type D4 (événements d'entrées)

V.4. Influence des deux paramètres V_{s30} et F_0 sur l'accélération horizontale maximale

L'effet de site peut être obtenu en comparant l'accélération maximale obtenue sur un site rocheux et l'accélération maximale mesurée (ou calculée) sur des différents sites.

Pour ce faire, une comparaison a été effectuée entre les PGAb enregistrés sur des sites de type D4 et les PGAs générés par EERA sur les sites de Qyung (type A1), Garner (type B2) et Kiravaka2 (type C3).

Les figures.V.2, 3 et 4 représentent les accélérations maximales horizontales illustrées sur le tableauV.3 en fonction des accélérations maximales horizontales calculées respectivement sur les sites de Qyung, Garner et Kiravaka2. Avec les courbes de tendance correspondantes.

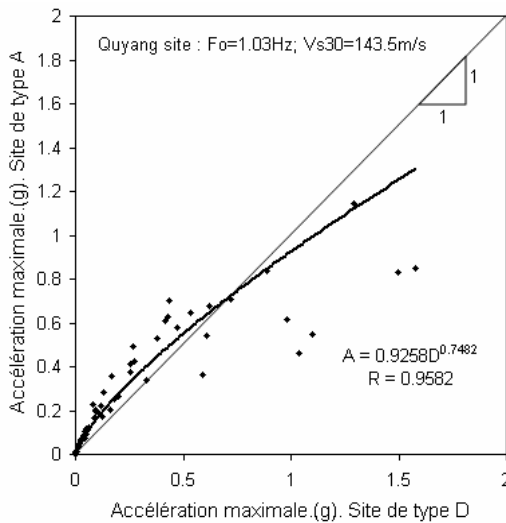


Figure.V. 2.PGA entre A1-D4

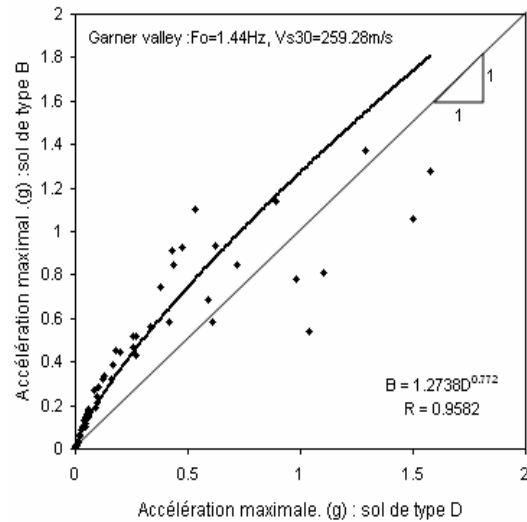


Figure.V. 3. PGA entre B2-D4

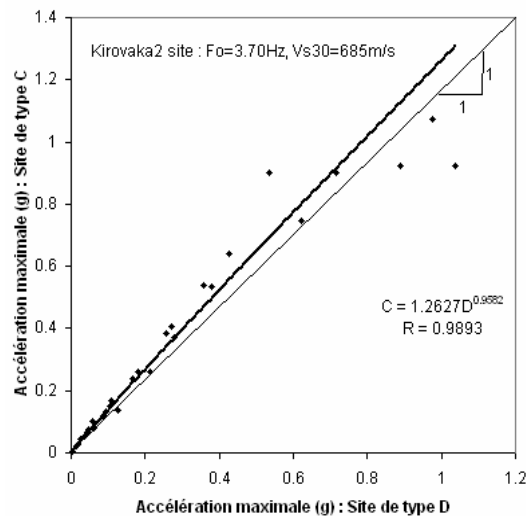


Figure.V. 4. PGA entre C3-D4

Les interprétions des trois figures montrent :

1. Premièrement, pour la figure.V.2 représentant Les PGA de A1 en fonction des PGA de D4, montre que si les $PGA_b < 0.6g$ les $PGA_s > PGA_b$. Tandis que, dans le cas où les $PGA_b > 0.6g$ les $PGA_s < PGA_b$. En outre, la courbe de tendance trouvée par régression non linéaire modélise bien la distribution des PGA (le coefficient de corrélation R de cette courbe est égale à 0.96), et ce, hormis les valeurs qui sont supérieures à 0.2g.
2. Concernant la figure.V.3 représentant les PGA de B2 en fonction des PGA de D4, semble montrée que pour les $PGA_b < 0.9g$, les $PGA_s > PGA_b$. En revanche, si les $PGA_b > 0.9g$, les $PGA_s < PGA_b$ et la courbe de tendance trouvée par régression non linéaire représente bien les PGA (R=0.96), excepté les valeurs qui sont supérieurs à 0.5g.
3. Dans la figure.V.4 qui illustre Les PGA de C3 en fonction des PGA de D4, la variation entre PGA_s et PGA_b est linéaire et est confirmée par la courbe de tendance linéaire qui représente bien les valeurs de PGA. R=0.97, sauf pour les $PGA_b > 0.8g$

D'une façon générale, le comportement d'un profil de sol est non linéaire pour des mouvements forts, cette non linéarité est observée dans les sites très meubles et meubles (figure.V.2 et 3) et le sol amplifie le signal sismique qui arrive de la source. Plus l'accélération d'entrée est grande, plus le sol présente un comportement non linéaire.

Pour confirmer cette non-linéarité, un cas réel est étudié. Il s'agit du séisme de CHICHI (Taiwan) du 20/09/1999 sa magnitude est de 7.6 (Idriss. I.M, et al 2000). Les PGA sont tirés de la base de données du *Central Weather Bureau*.

La figure.V.5 représente les valeurs des PGA enregistrés au niveau d'un site meuble (type1) en fonction des ceux enregistrés dans un site raide (type2). Pour les valeurs des PGA (type2) inférieurs à 0.13g les PGA (type1) sont supérieurs à ceux de type 2. En revanche, pour les valeurs de PGA (type 2) supérieurs à 0.13g les PGA (type 1) sont inférieurs à ceux de type 2, et la courbe de tendance calculée par régression non linéaire représente bien les valeurs de PGA et R= 0.96.

Il est à conclure que le sol amplifie le signal sismique qui arrive de la source. Cette amplification n'est cependant non linéaire avec l'intensité du séisme: plus l'accélération au rocher est élevée, plus le sol présente un comportement non linéaire; ce qui augmente l'amortissement effectif et diminue l'amplification.

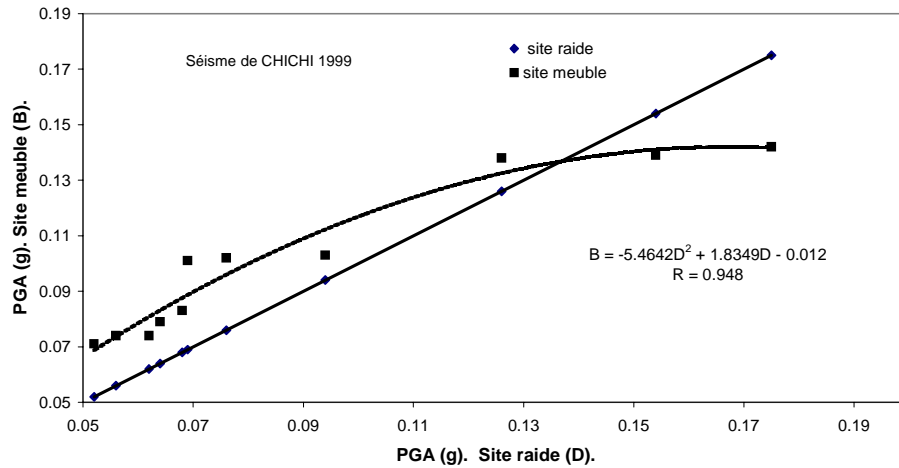


Figure.V. 5. PGA entre 1-2

V.5. Choix d'un critère de classification pour le mouvement sismique en surface

Quatre paramètres sont sélectionnés en premier lieu pour évaluer la sévérité du mouvement sismique à la surface libre. Deux d'entre eux ont été choisis et ce sur la base de la définition de la conception des spectres de réponse dans UBC 1997 (Paolucci. R et al,2000). Nommés sur la figure V.6, à savoir:

S₁ : La réponse spectrale d'accélération moyenne entre [0,0.5]s.

S₂ : La réponse spectrale d'accélération à la période T=1s.

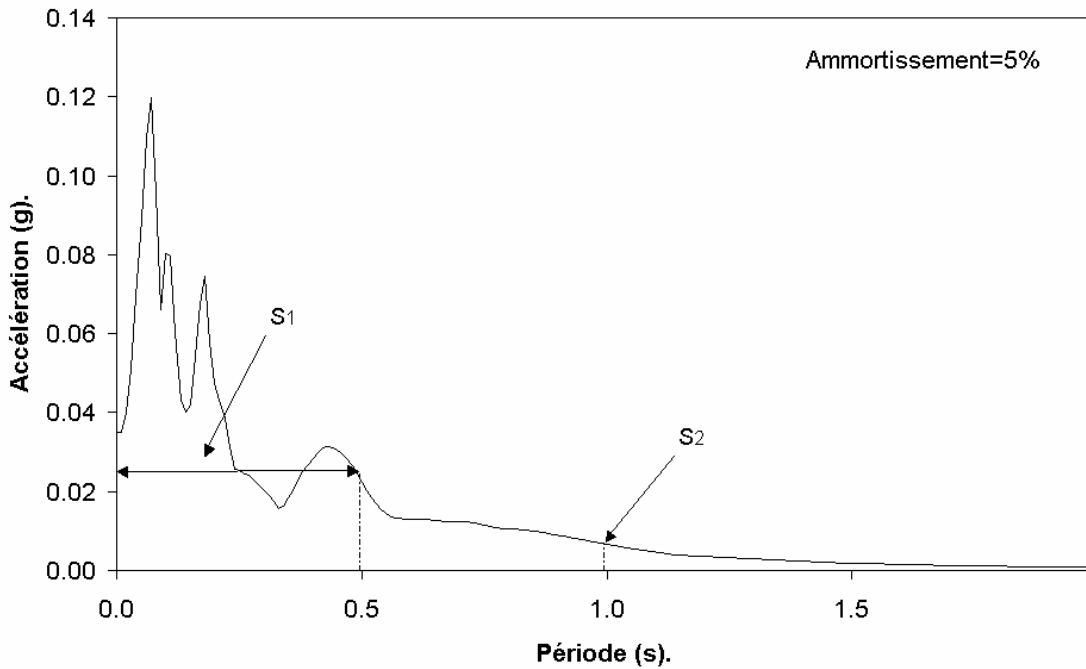


Figure.V. 6. Spectre de réponse d'accélération avec les deux paramètres S₁ et S₂

Les autres paramètres représentent la durée et l'intensité d'Arias (figure V.7) définie par la relation suivante :

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} a^2(t) dt;$$

a : histoire du temps de l'événement.

g : la force de pesanteur.

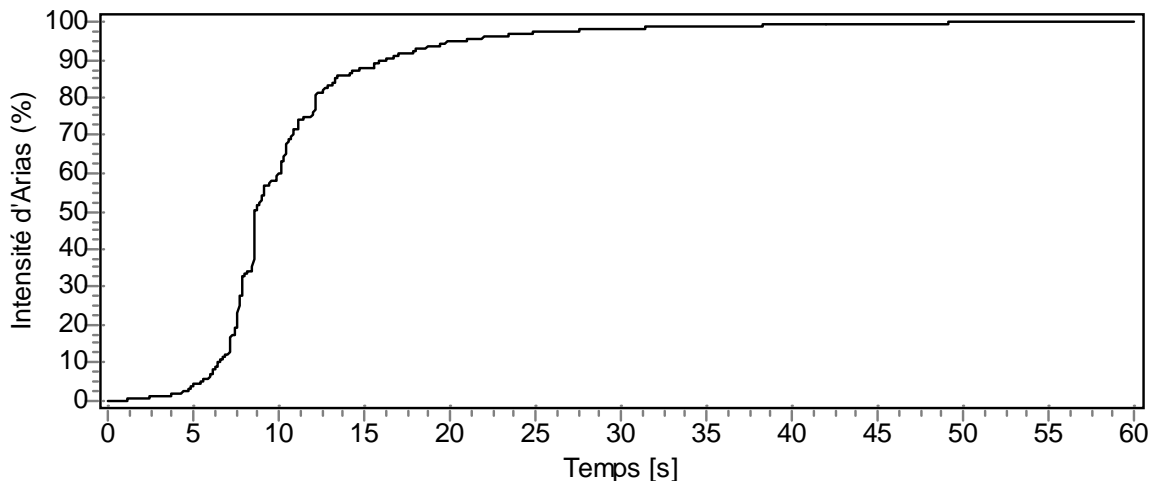


Figure.V. 7. Intensité d'Arias.

Concernant la durée du mouvement sismique, il n'existe pas de méthode universellement reconnue pour la définir. Parmi de nombreuses définitions, trois familles sont constituées : "bracketed durations", "uniform durations" et "significant durations". Les trois sont basées sur l'enregistrement du mouvement sismique :

- La "bracketed duration" D_b est définie comme l'intervalle de temps écoulé entre le premier et le dernier dépassement d'un niveau d'accélération a_0 (figure V.8).
- La "uniform duration" D_u utilise également la notion de seuil, mais la durée est ici la somme des intervalles de temps pendant lesquels le seuil a_0 est dépassé (figure V.9).
- La définition de la "significant duration" D_s est basée sur l'énergie cumulée représentée par l'intégrale du carré de l'accélération, de la vitesse ou du déplacement. La durée la plus utilisée parmi ces définitions est basée sur l'intensité d'Arias. Les seuils A_{10} et A_{1f} sont en général 5% et 95% de l'énergie totale (figure V.10).

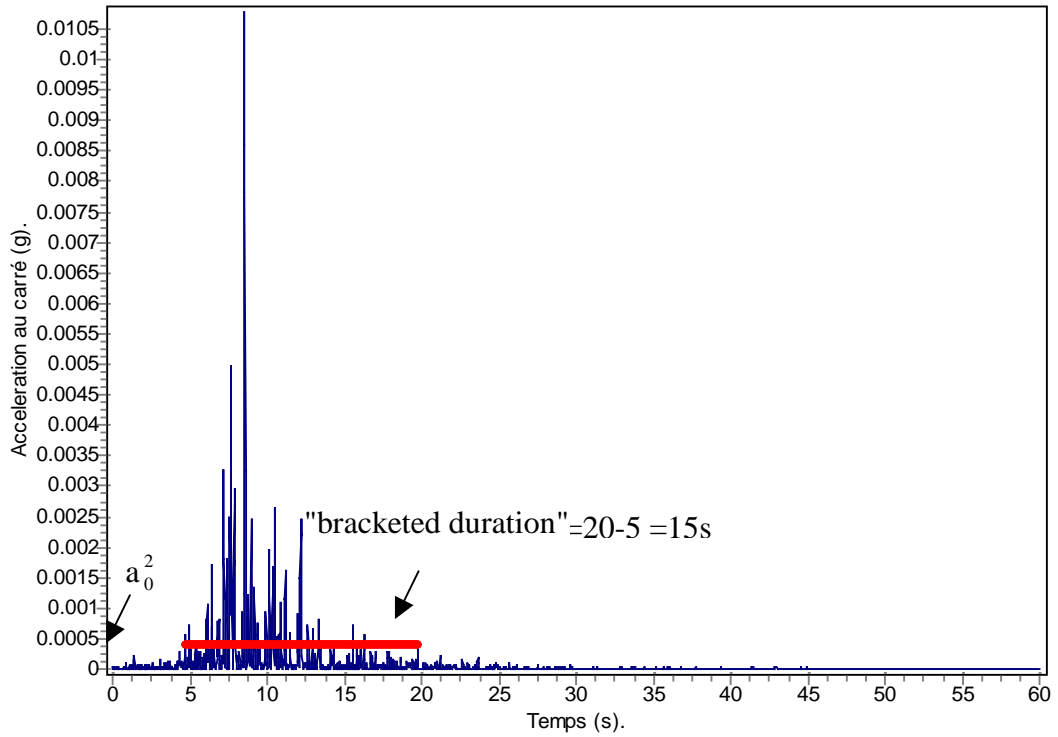


Figure.V. 8. "Bracketed duration"

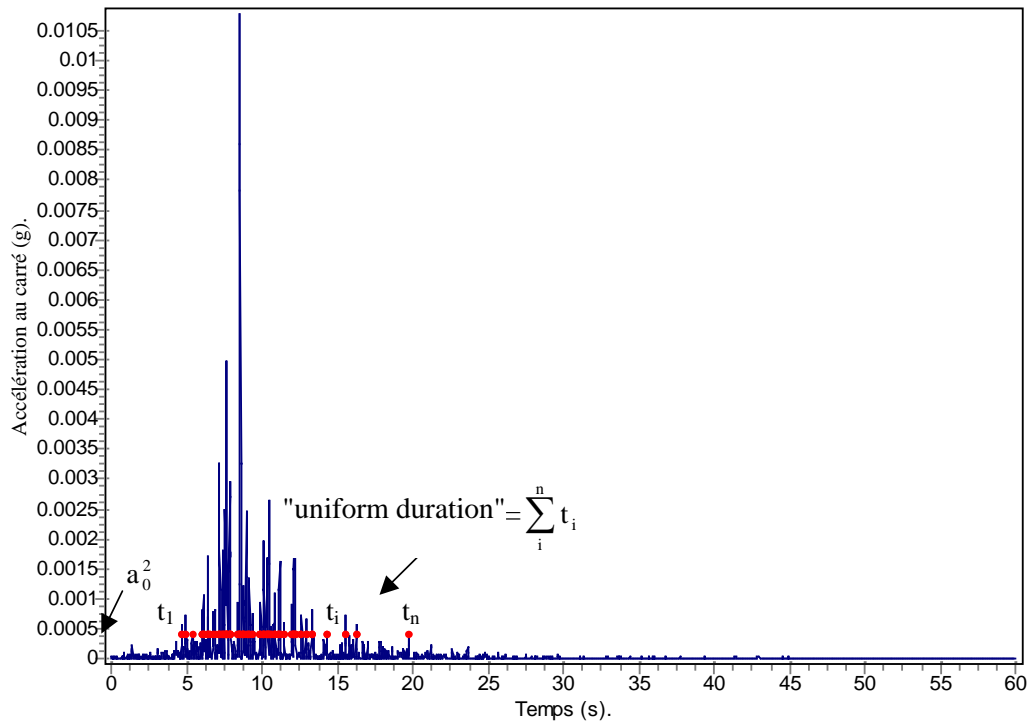


Figure.V. 9. "Uniform duration"

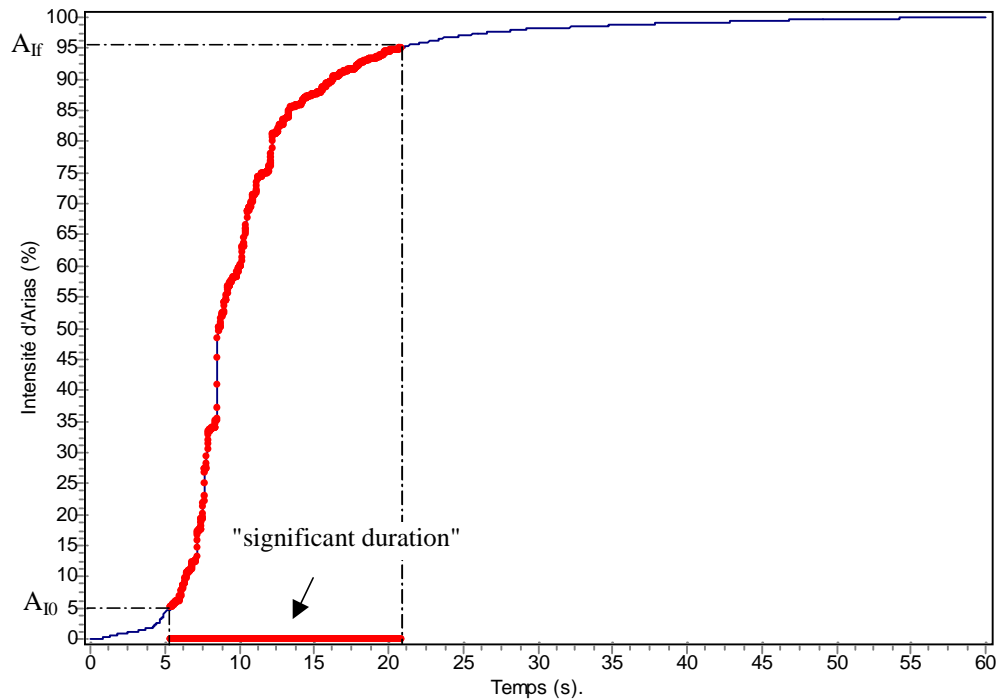


Figure.V. 10. "Significant duration"

Pour que les paramètres (S_1 , S_2 , I_A , D_b , D_u et D_s) cités auparavant soient indépendants du mouvement d'entrée, ils sont normalisés par les paramètres d'entrées qui leurs correspondent. A présent, les paramètres sont définis. Il reste à désigner un couple parmi eux. Pour ce faire, les coefficients de corrélation de l'ensemble ont été calculés.

A cet égard, le choix est visé sur le couple qui possède le coefficient de corrélation le plus faible, et ce pour éviter d'utiliser des paramètres qui possèdent les mêmes variations.

Dans ce contexte, un test a été effectué sur les six paramètres cités auparavant. Douze profils du sol ont été excités par l'événement de Hokkaido (Japon) 26/09/2003 $M=7.8$ enregistré sur un substratum rocheux. Les résultats obtenus sont regroupés sur le tableau V.4 et 5 :

| Profils | S ₁ (g) | S ₂ (g) | I _A (m/s) | D _u (s) | D _b (s) | D _s (s) |
|---------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| KYT004 | 0.315 | 0.117 | 0.976 | 54.480 | 132.080 | 67.200 |
| Quyang | 0.343 | 0.117 | 1.024 | 64.720 | 136.080 | 67.200 |
| Great Hanshin | 0.178 | 0.122 | 0.510 | 84.800 | 156.560 | 83.280 |
| Friaul | 0.505 | 0.087 | 1.933 | 44.320 | 103.680 | 40.160 |
| FKO004 | 0.554 | 0.086 | 2.132 | 46.240 | 107.280 | 32.880 |
| Kirovaka3 | 0.454 | 0.075 | 1.515 | 55.520 | 136.080 | 42.880 |
| Fukiai | 0.275 | 0.107 | 0.780 | 65.600 | 136.400 | 67.600 |
| MAT | 0.368 | 0.070 | 1.625 | 40.160 | 105.200 | 35.600 |
| MYZ002 | 0.275 | 0.066 | 0.691 | 59.840 | 137.840 | 73.680 |
| KBU | 0.219 | 0.064 | 0.467 | 66.560 | 138.080 | 84.160 |
| Kirovaka2 | 0.250 | 0.067 | 0.551 | 62.200 | 136.720 | 79.200 |
| IWT008 | 0.184 | 0.062 | 0.328 | 69.360 | 136.880 | 87.360 |

Tableau.V. 4. Paramètres sensibles à la classification du mouvement sismique

| | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| S ₁ -S ₂ | S ₁ -I _A | S ₁ -D _U | S ₁ -D _B | S ₁ -D _S |
| 0.001 | 0.970 | 0.798 | 0.781 | 0.930 |
| | | | | |
| S ₂ -I _A | S ₂ -D _u | S ₂ -D _b | S ₂ -D _s | I _A -D _u |
| 0.029 | 0.304 | 0.256 | 0.033 | 0.825 |
| | | | | |
| I _A -D _b | I _A -D _s | D _b -D _u | D _b -D _s | D _u -D _s |
| 0.843 | 0.977 | 0.927 | 0.831 | 0.852 |

Tableau.V. 5. Coefficients de corrélations de chaque couple

La comparaison entre les coefficients de corrélations calculés, montre que le couple S₁-S₂ normalisé se caractérise par le coefficient de corrélation le plus faible. Ainsi S₁-S₂ est le meilleur couple de classification de la sévérité du mouvement sismique à la surface libre.

Par ailleurs, le niveau du risque lié à l'effet de site est classé en trois catégories (Paolucci. R et al,2000):

Faible risque S₁≤1.3 et S₂≤1.3

Haut risque S₁≥2.0 et S₂≥2.0

V.5.1

Moyen risque : les autres intervalles

$$\text{Avec } S_1 = \frac{S_{1s}}{S_{1r}}; \text{ et } S_2 = \frac{S_{2s}}{S_{2r}};$$

Dont S_1 : Le facteur d'amplification spectrale entre [0,0.5]sec.

S_2 : Le facteur d'amplification spectrale à 1s.

S_{1s} : La réponse spectrale d'accélération moyenne entre [0,0.5]s à la surface libre de la terre.

S_{2s} : La réponse spectrale d'accélération à T=1s à la surface libre de la terre.

S_{1r} : La réponse spectrale d'accélération moyenne entre [0,0.5]s au niveau du site de référence.

S_{2r} : La réponse spectrale d'accélération à T=1s au niveau de site de référence.

V.6. Réseau de neurones artificiel (RNA)

V.6.1. Définitions

Un neurone artificiel est un opérateur mathématique très simple, possédant des entrées qui peuvent être les sorties d'autres neurones, des entrées de signaux extérieurs ou une sortie. La valeur de la sortie résulte du calcul de la somme des entrées, pondérées par des coefficients (dits poids de connexions ou poids synaptiques) et du calcul d'une fonction non linéaire (dite fonction d'activation) de cette somme pondérée.

L'état du neurone, appelé aussi activité, est défini comme la somme pondérée de ses entrées. L'information est ainsi transmise de manière unidirectionnelle. Un neurone se caractérise par trois concepts : son état, ses connexions avec d'autres neurones et sa fonction d'activation.

Pour le PMC (Perception MultiCouches), les fonctions d'activations souvent utilisées sont :

- La fonction identité : $f(x)=x$

Les neurones dont la fonction d'activation sont appelés neurones linéaires

- La fonction sigmoïde : $f(x)=\tanh(x)$

C'est la plus utilisée, car elle introduit de la non linéarité et est aussi une fonction continue, différentiable et bornée.

V.6.1.1. Réseau Perceptron multicouches (PMC) à rétropropagation du gradient

Le PMC a une structure bien particulière: Ses neurones sont organisés en couches successives (figure.V.11.). Chaque neurone d'une couche reçoit des signaux de la couche

précédente et transmet le résultat à la suivante, si elle existe. Les neurones d'une même couche ne sont pas interconnectés. Un neurone ne peut donc envoyer son résultat qu'à un neurone situé dans une couche postérieure à la sienne.

L'orientation du réseau est fixée par le sens unique de propagation de l'information, de la couche d'entrée vers la couche de sortie. Pour les réseaux considérés, les notions de couches d'entrée et de sortie sont donc systématiques. Ces dernières constituent l'interface du réseau avec l'extérieur. La couche d'entrée reçoit les signaux (ou variables) d'entrée et la couche de sortie fournissent les résultats. Enfin, les neurones des autres couches (couches cachées) n'ont aucun lien avec l'extérieur et sont appelés neurones cachés.

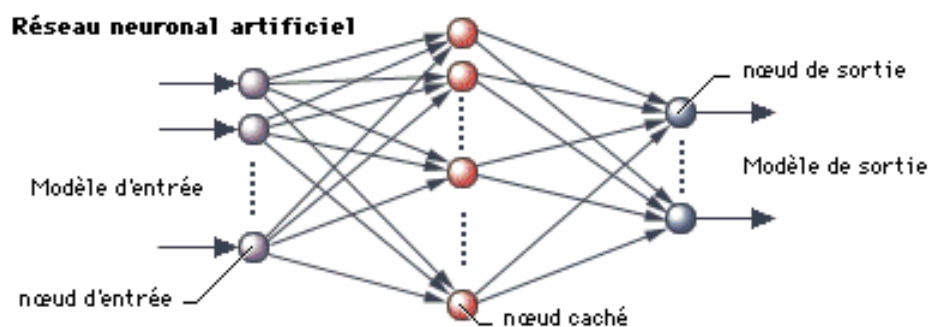


Figure.V. 11. Réseau de neurones de type Perceptron multicouche

V.6.1.2. Apprentissage du PMC

L'apprentissage de ces réseaux est supervisé. L'algorithme utilisé pendant cet apprentissage est connu sous le nom de méthode de rétropropagation du gradient ou encore "Backpropagation". Cette méthode d'apprentissage se divise en plusieurs étapes :

- Une phase de propagation, qui consiste à présenter une configuration d'entrée au réseau puis à propager cette entrée de proche en proche de la couche d'entrée à la couche de sortie en passant par les couches cachées.
- Une phase de rétropropagation, qui consiste, après le processus de propagation, à minimiser l'erreur commise sur l'ensemble des exemples présentés, erreur considérée comme une fonction des poids synaptiques. Cette erreur représente la somme de différences au carré entre les réponses calculées et celles désirées pour tous les exemples contenus dans l'ensemble d'apprentissage. Pour plus d'informations sur les réseaux de neurones récurrents voir à l'annexe 1.

V.6.2. Type et l'architecture du réseau de neurones utilisé

Le réseau de neurones artificiel qui a été choisi est de type Perceptron Multicouche PMC avec une connexion totale, ce dernier est le plus connu et le plus utilisé (70% des applications utilisent ce type de réseau).

Les paramètres adoptés pour la classification de site et la classification de l'événement sismique à la surface libre sont utilisés comme des couples entrées/sorties pour le présent modèle neuronal : la figure V.13 représente le procédé d'élaboration du modèle. La figure.V.12 illustre l'architecture du réseau ainsi que les paramètres caractérisant le modèle.

La première base de données utilisée dans l'apprentissage du premier RNA (nommé «1») est enregistré dans le fichier «1.mat» est caractérisé par le premier PGA du tableauV.3) est obtenu en excitant à la base les 13 profils de sol illustrés sur le tableau.V.2 avec le premier événement du tableau V.3.Il en résulte de ce calcul 13 configurations (couple entrée/sortie). Cette procédure est répétée par la suite pour les autres évènements, pour obtenir 30 réseaux de neurones.

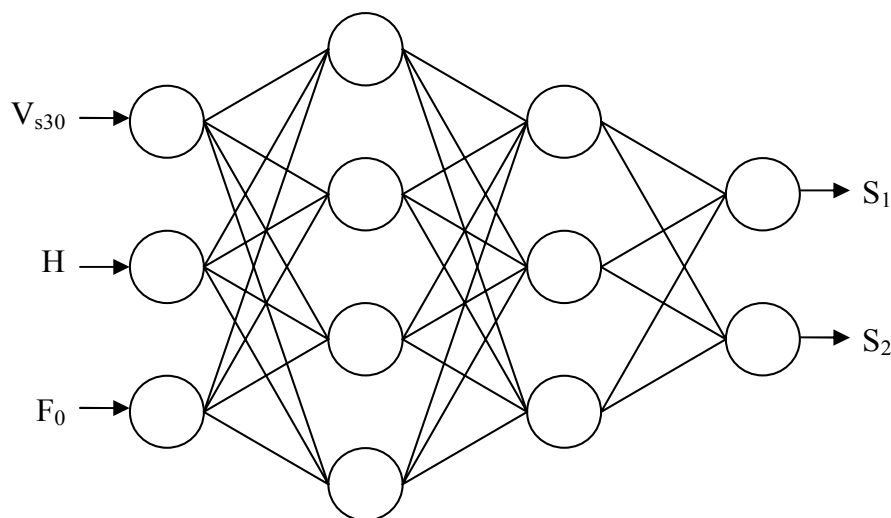


Figure.V. 12. Architecture du réseau de neurones utilisé

Le réseau contient donc une couche d'entrée avec trois neurones, deux couches cachées : la première regroupe quatre neurones et la deuxième trois et une couche de sortie avec deux neurones. La fonction d'activation pour les deux couches cachées est sigmoïdale: $f(x)=\tanh(x)$ et celle de la couche de sortie est linéaire $f(x)=x$.

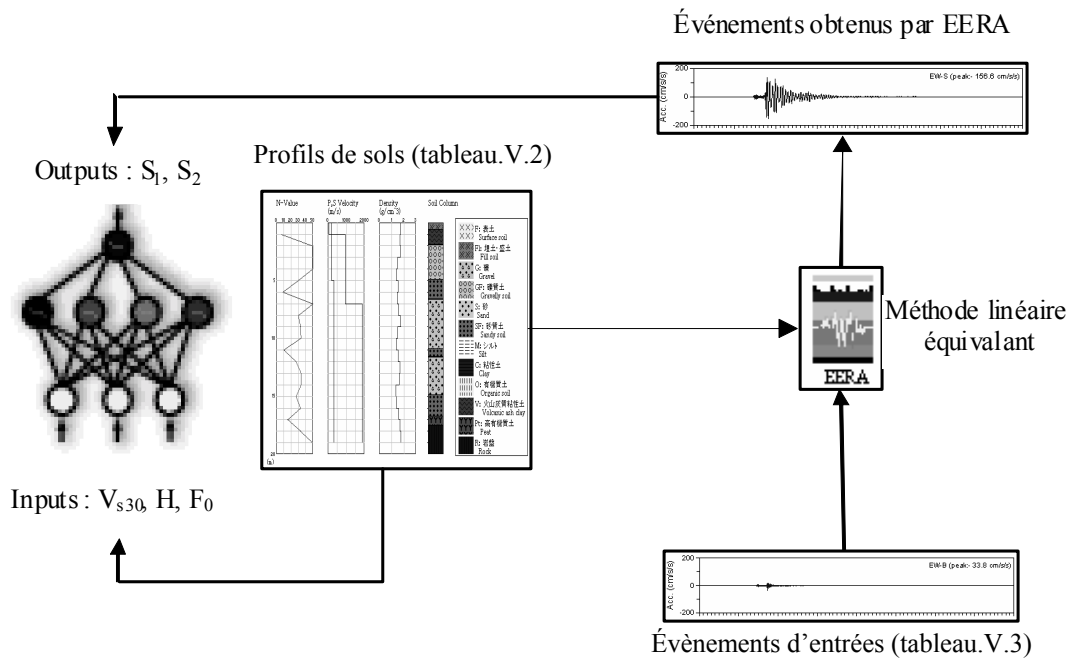


Figure.V. 13. Procédure d'élaboration du modèle

Cette architecture est adoptée après plusieurs essais qui consistent à faire varier le nombre de couches et de neurones par couche cachée dans le souci de diminuer l'erreur quadratique (MSE : mean square error) (figure V.14) pour avoir un coefficient de corrélation (R) au voisinage de 1 (figure V.15). La figure V.14 regroupe les informations concernant le processus d'apprentissage du RNA numéro : « 29 », dont MSE= $1.13.10^{-13}$ et R=1 et ce après 1580 époques. La figure V.15 présente une comparaison entre la sortie désirée (T) et la sortie obtenue (A) par le réseau de neurones.

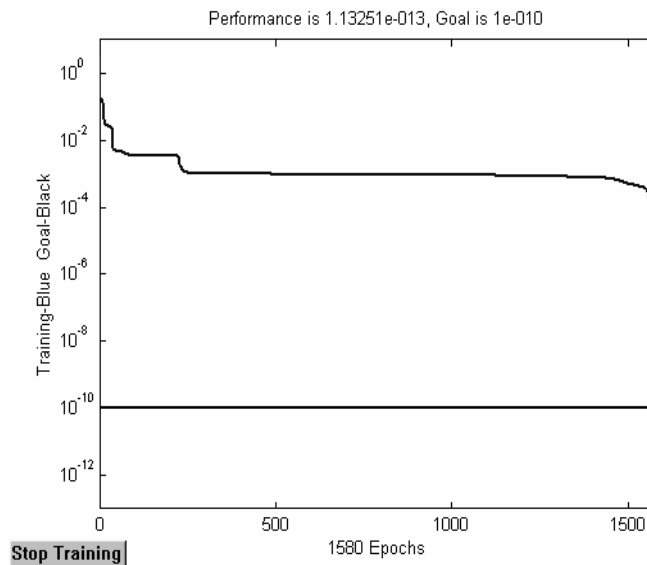


Figure.V. 14.Processus d'apprentissage

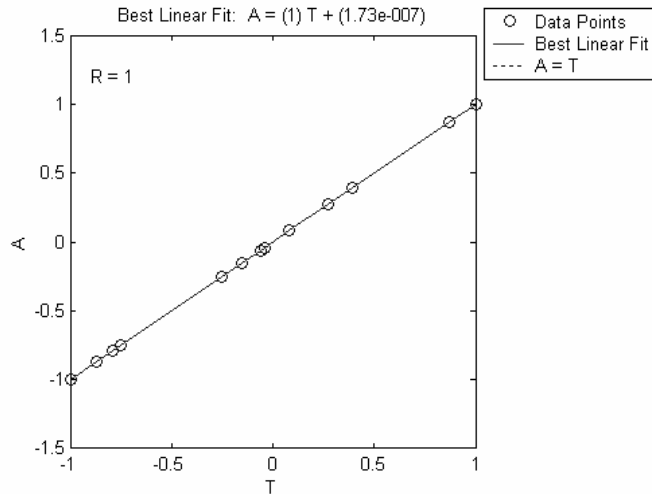


Figure.V. 15.Comparaison entre A et T

L’environnement Matlab 6 (Demuth. H, et al 2000) est utilisé pour l’élaboration du modèle neuronal. Le programme établi par le langage Matlab est appelé VHFSS.m et les 30 RNA résultant de ce programme sont stockés dans 30 fichiers séparément représentant la base de donnée du modèle.

Pour que la base de donnée soit aisément utilisée, un code de calcul sous Windows, nommé SRISQ (toujours en utilisant l’environnement Matlab6) a été élaboré (annexe 5).

V.6.3. Test et analyse des résultats

L’objectif est de tester l’aptitude de SRISQ à estimer le niveau de risque lié à l’effet de site à partir des quatre paramètres du modèle : V_{s30} , H, F_0 et PGA. Les paramètres des quatre sites utilisés et les PGA enregistrés à la base de chaque site sur un substratum rocheux sont mentionnés sur les deux tableaux V.6 et V.7. Les sites sont tirés de la base de données KIK-NET. Après exécution SRISQ a donné les niveaux de risques présentés sur les tableaux V.6 et V.7.

| Code des stations | V_{s30} (m/s) | H (m) | F_0 (Hz) | PGA substratum | S_1 réel | S_2 réel | Niveau de risque réel | S_1 SRISQ | S_2 SRISQ | Niveau de risque par SRISQ |
|-------------------|-----------------|-------|------------|----------------|------------|------------|-----------------------|-------------|-------------|----------------------------|
| OSKH03 | 392 | 40 | 3.5 | 0.0008 | 2.6 | 1.1 | moyen risque | 2.0 | 1.8 | moyen risque |
| YMGH02 | 398 | 20 | 2.58 | 0.008 | 2.0 | 1.4 | Moyen risque | 2.8 | 1.4 | Moyen risque |

Tableau.V. 6. Paramètres des deux sites OSKH03(Événement du 02/08/99, $M=3.9$) et YMGH02 (Événement du 16/09/02, $M=5.3$) et les niveaux de risques obtenus par SRISQ et à partir des enregistrements.

| Code des stations | V_{s30} (m/s) | H (m) | Fo (Hz) | PGA substratum | S_1 réel | S_2 réel | Niveau de risque réel | S_1 SRISQ | S_2 SRISQ | Niveau de risque par SRISQ |
|-------------------|--------------------|----------|------------|-------------------|---------------|---------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------------------------|
| TTRH03 | 197 | 74 | 1.14 | 0.03 | 2.8 | 8.3 | Haut risque | 3.8 | 2.4 | Haut risque |
| TTRH02 | 310 | 100 | 1.38 | 0.360 | 2.0 | 5.4 | haut risque | 1.4 | 0.14 | moyen risque |

Tableau.V.7.Paramètres des deux sites TTRH03(Événement du 16/09/02, $M=5.3$) et TTRH02(Évènement du 16/10/2000, $M=7.3$) et les niveaux de risques obtenus par SRISQ et à partir des enregistrements.

Les interprétations des résultats obtenus par SRISQ et la comparaison avec ceux calculés directement à partir des enregistrements (surface/substratum) peut révéler que les couples $\{S_1, S_2\}$ estimés par le modèle neuronal des deux sites OSKH03 et YMGH02 sous des sollicitations faibles (tableaux V.6) sont très proches des deux couples calculés par les enregistrements réels ; ces deux cas donnent le même niveau de risque.

En outre, SRISQ a donné un niveau de risque identique à celui calculer directement à partir de l'enregistrement de site TTRH03 (mouvement modéré), avec une différence dans les valeurs de S_1 et S_2 . En revanche, SRISQ a sous estimé le niveau de risque de la station TTRH02 sollicitée par un événement fort avec un S_2 très faible en comparaison avec la réalité. Un tel résultat s'explique par le fait que le modèle neuronal est basé dans sa phase d'apprentissage sur le modèle linéaire équivalent, dans lequel l'effet de site non linéaire (présent dans le cas d'un fort mouvement) est sous estimé, comme c'est le cas du site TTRH02 (PGA=0.360g au niveau de la station installée en profondeur).

Par ailleurs, SRISQ a donné le même niveau de risque pour les mouvements faibles à modérés, à savoir, le site OSKH03 avec un PGA à la base égale à 0.0008g et le site YMGH02 (PGA=0.008).

La faible estimation du risque lors d'un mouvement fort par le modèle neuronal formé par le modèle linéaire équivalent; a donné l'idée d'utiliser directement les données récoltées de KIK-NET et ce pour tracer le spectre de réponse à la surface à partir de celui enregistré en profondeur et pour estimer le risque lié à l'effet de site.

V.7. Génération d'un spectre de réponse à la surface libre

V.7.1. Description de la Base de données utilisées

Dans cette section la capacité de la méthode neuronale à tracer le spectre de réponse à la surface libre de la terre et à estimer le niveau de risque à partir de celui enregistré en profondeur est présentée. Pour ce faire, les données récoltées du réseau KIK-NET ont été utilisées et ce dans la phase d'apprentissage Tableau.V.8 et 9. Il est à noter que la classification de site adoptée est celle illustrée dans le tableau V.1 (couple: V_{s30} - F_0). La vitesse de cisaillement moyenne sur 30m de profondeur V_{s30} varie entre [180 à 1072]m/s et la fréquence caractéristique F_0 : [1.09 à 15.42]Hz, tandis que l'épaisseur totale H appartient à l'intervalle [6 à 64]m (tableau.V.8).

| Classes | Codes des Profils | V_{s30} (m/s) | H_T (m) | H_S (m) | F_0 (Hz) | Nombre total des enregistrements utilisés | Le nombre des enregistrements utilisé dans la phase d'apprentissage | Le nombre des enregistrements gardés pour le test |
|---------|-------------------|--------------------|--------------|--------------|---------------|---|---|---|
| A1 | KGWH02 | 180 | 200 | 54 | 1.09 | 22 | 21 | 1 |
| B2 | EHMNH04 | 254 | 200 | 64 | 1.41 | 14 | 13 | 1 |
| | SMNH07 | 318 | 209 | 60 | 1.74 | 12 | 11 | 1 |
| | EHMNH07 | 391 | 200 | 20 | 3.2 | 15 | 14 | 1 |
| C3 | SMNH03 | 445 | 101 | 34 | 3.35 | 12 | 11 | 1 |
| | SMNH02 | 503 | 101 | 25 | 4.6 | 12 | 11 | 1 |
| | KOCH03 | 668 | 100 | 32 | 5.30 | 16 | 15 | 1 |
| | SMNH05 | 711 | 101 | 14 | 7.5 | 12 | 11 | 1 |
| D4 | EHMNH03 | 802 | 101 | 10 | 11.42 | 13 | 12 | 1 |
| | KOCH05 | 1072 | 100 | 6 | 15.42 | 12 | 11 | 1 |

Tableau.V. 8. Les profils des sols choisis et les enregistrements utilisés

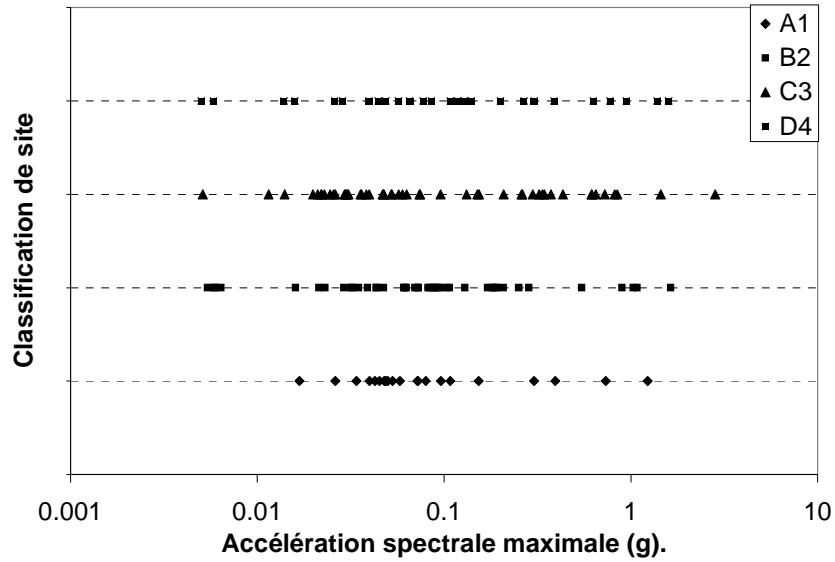
Par ailleurs, les spectres de réponses en accélération (S_a) adoptés sont de l'ordre de 140 couples entrées/sorties [les deux composantes NS (nord-sud) et EW (est-ouest) sont utilisées] c'est-à-dire 140 (S_a) à la surface libre de la terre et 140 (S_a) enregistrés à une profondeur variant entre -100m à -200m. Le nombre des (S_a) réservés à l'apprentissage est de 130 et 10 (S_a) sont conservés à la phase test.

| Pofils | Date de l'évènement. | Mag. | Distance focale (Km) |
|---------|----------------------|------|----------------------|
| KGWH02 | 25/03/2002 | 4.7 | 46 |
| | 04/07/2002 | 3.8 | 19 |
| | 30/10/1999 | 4.5 | 13 |
| | 22/12/1999 | 3.8 | 15 |
| | 25/01/2001 | 4.4 | 53 |
| | 24/03/2001 | 6.4 | 51 |
| | 25/03/2001 | 4.4 | 51 |
| | 26/03/2001 02:16 | 3.9 | 48 |
| | 26/03/2001 05:41 | 5 | 49 |
| | 03/04/2001 | 4.4 | 67 |
| EHMNH04 | 24/08/2001 | 4.3 | 48 |
| | 13/10/2002 | 4.7 | 43 |
| | 06/10/2000 | 7.3 | 111 |
| | 24/03/2001 | 6.4 | 51 |
| | 25/03/2001 | 4.4 | 51 |
| | 26/03/2001 | 5 | 49 |
| | 03/04/2001 | 4.4 | 67 |
| SMNH07 | 25/03/2000 | 4.7 | 46 |
| | 14/02/1999 | 3.3 | 12 |
| | 06/10/2000 | 7.3 | 11 |
| | 24/03/2001 | 6.4 | 51 |
| | 25/03/2001 | 4.4 | 51 |
| | 26/03/2001 | 5 | 49 |
| EHMNH07 | 27/03/2003 | 4.2 | 13 |
| | 25/03/2002 | 4.7 | 46 |
| | 13/10/2000 | 3.8 | 11 |
| | 09/01/2001 | 4.6 | 50 |
| | 24/03/2001 | 6.4 | 51 |
| | 26/05/2001 | 5 | 49 |
| | 09/05/2001 | 4.1 | 43 |
| | 09/04/2002 | 4.5 | 42 |
| | 06/10/2000 | 7.3 | 11 |
| SMNH03 | 02/04/2003 | 4.2 | 11 |
| | 06/10/2000 | 7.3 | 11 |
| | 07/10/2000 18 :32 | 3.8 | 13 |
| | 07/10/2000 07:49 | 3.9 | 8 |
| | 08/10/2000 | 5.5 | 8 |
| | 24/03/2001 | 6.4 | 51 |
| | | | |

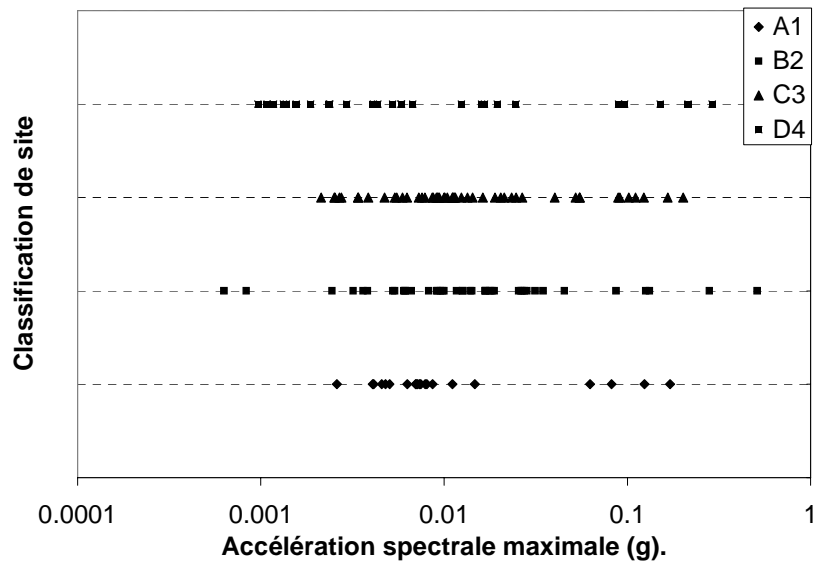
| Profils | Date de l'évènement. | Mag. | Distance focale (Km) |
|---------|----------------------|------|----------------------|
| SMNH02 | 08/10/2000 | 5.5 | 8 |
| | 12/11/2000 | 3.6 | 9 |
| | 07/10/2000 | 3.9 | 8 |
| | 07/11/2000 | 3.3 | 8 |
| | 27/02/2002 | 3.9 | 9 |
| | 08/10/2000 | 3.3 | 10 |
| | 06/10/2000 16:38 | 3.4 | 8 |
| | 06/10/2000 13:30 | 7.3 | 11 |
| | | | |
| KOCH03 | 18/11/1998 | 4.1 | 39 |
| | 13/01/2000 | 4.2 | 46 |
| | 24/03/2001 | 6.4 | 51 |
| | 25/04/2001 | 5.6 | 42 |
| | 25/03/2002 | 4.7 | 46 |
| | 06/04/2002 | 4.5 | 42 |
| SMNH05 | 13/10/2002 | 4.7 | 43 |
| | 10/11/1998 | 4.2 | 46 |
| | 10/10/2000 | 3.4 | 17 |
| | 27/03/2003 | 4.2 | 13 |
| | 23/02/1999 | 3.4 | 15 |
| | 16/07/1999 | 4.4 | 20 |
| EHMNH03 | 06/10/2000 | 7.3 | 11 |
| | 26/03/2001 | 5 | 49 |
| | 24/03/2001 | 6.4 | 51 |
| | 25/01/2001 | 4.4 | 17 |
| | 25/03/2002 | 4.7 | 13 |
| | 14/08/2003 | 4.6 | 15 |
| | 04/01/1999 | 4 | 20 |
| | 06/10/2000 | 7.3 | 11 |
| | 24/03/2001 | 6.4 | 49 |
| KOCH05 | 30/10/1999 | 4.5 | 51 |
| | 24/03/2001 15:28 | 6.4 | 51 |
| | 24/03/2002 15:28 | 4.2 | 46 |
| | 25/03/2002 | 4.7 | 46 |
| | 22/12/1999 | 3.8 | 15 |
| | 04/05/2002 | 4 | 55 |
| SMNH05 | 6/06/10/2002 | 7.3 | 11 |
| | 26/03/2001 | 5 | 49 |

Tableau.V. 9. Évènements sismiques utilisés dans le modèle neuronal.

D'autre part, le logiciel «ViewWave» version 1.3 (Kashima.T, 2002) a été utilisé pour calculer les spectres de réponse en accélérations; vu que ce dernier est compatible avec les données de KIK-NET, sinon l'intégral de Dyhamel (Clough. R, et al, 1980) peut être utilisé pour résoudre cette tâche. Le tableau V.9 donne les informations concernant les événements utilisés : date, magnitude et distance hypocentrale.



(a)



(b)

Figure.V. 16. Répartition des valeurs maximales spectrales enregistrées en surface (a) et en profondeur (b) et ce pour les quatre classifications de sites.

La figure V.16 représente les répartitions des deux types d'accélération spectrales maximales enregistrées en surface (a) et en profondeur (b) constituant la base de données qui va être utilisé dans la phase apprentissage de réseaux de neurones.

V.7.2. Type et architecture du réseau de neurones

Comme c'est déjà spécifié dans la section précédente, les profils de sols sont regroupés en quatre classes (A1, B2, C3 et D4), sur la base de cette classification la base de donnée est divisée. Elle constitue les spectres de réponses enregistrés en surface et en profondeur. Chaque partie de cette base de données appartient à une classe bien définie: tableau V.8. Pour le groupe 1 (classe A1) 22 couples d'enregistrements sont choisis, le groupe 2 classe B2 contient 41 couples d'enregistrements, concernant le groupe 3 (classe C3) les enregistrements sont de l'ordre de 52 et en fin le groupe 4 de la classe D4 contient 25 enregistrements. Il est à noter que le nombre de spectre de réponse de chaque classe est basé sur la disponibilité des données dans le site web KIK-NET. En outre, c'est ces quatre groupes qui forment les quatre bases de données d'apprentissage des quatre réseaux de neurones, donc finalement pour chaque classification de site un réseau de neurones est généré.

D'une manière générale, et pour apprendre aux réseaux de neurones à tracer le spectre de réponse à la surface libre à partir de celui obtenu en profondeur (figure V.17), deux entrées ont été choisies (Hurtado J.E et al 2000) à savoir :

- Le spectre de réponse d'accélération enregistré sur le substratum rocheux (site de référence) S_{ar} (amortissement=5%);
- La période propre (T) à chaque point du spectre de réponse d'accélération;

Et la seule sortie adoptée contient le spectre de réponse d'accélération obtenu à la surface libre de la terre S_{as} (amortissement=5%) .

Les réseaux de neurones contiennent donc une couche d'entrée avec deux neurones et deux couches cachées (figure V.18.) : La première regroupe quatre neurones et la deuxième deux. Enfin une couche de sortie avec un neurone. La fonction d'activation dans la couche de sortie est linéaire $f(x)=x$ et est non linéaire $f(x)=\tanh(x)$ dans les deux couches cachées.

Pour ce faire un réseau de neurones de type perceptron multicouches a été utilisé, avec la règle de Widrow-Hoff pour l'apprentissage.

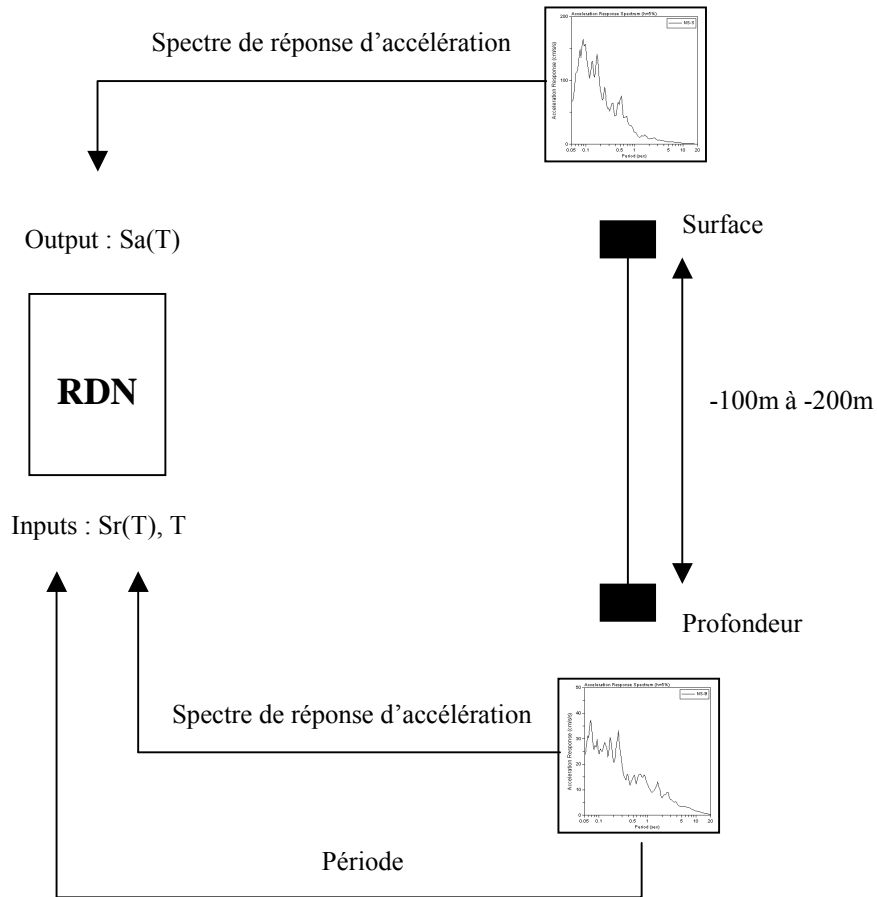


Figure.V. 17. Les entrées et la sortie du réseau de neurones

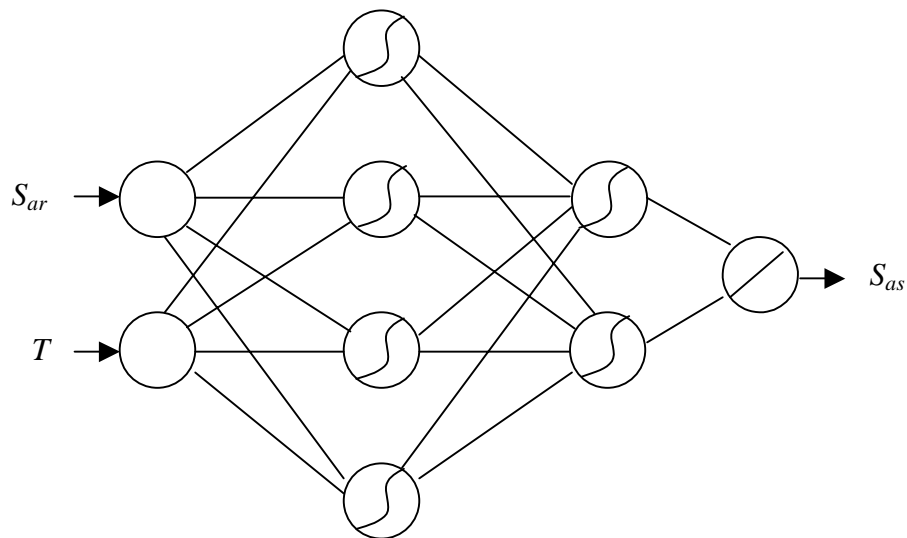


Figure.V. 18. Architecture du réseau de neurone

La figure V.19 et V.20 regroupent les informations concernant le processus d'apprentissage du RNA du premier groupe classe A1, dont $MSE= 9.7.10^{-4}$ et le coefficient de corrélation $R=0.986$ et ce après 668 époques.

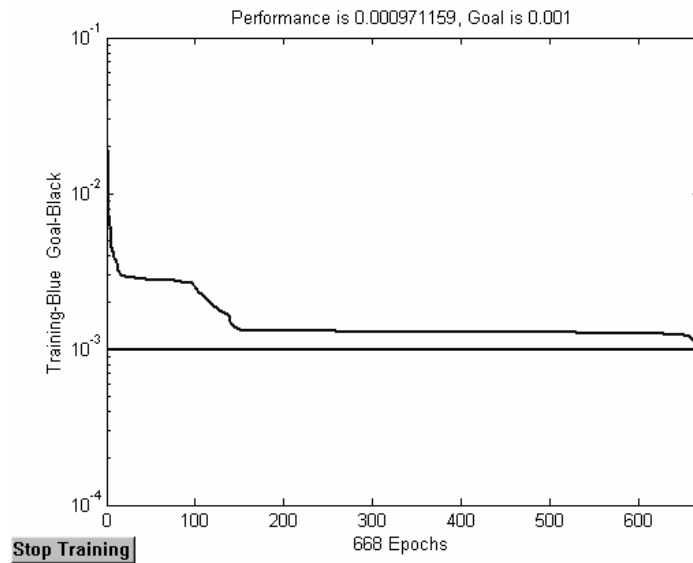


Figure.V. 19.Processus d'apprentissage

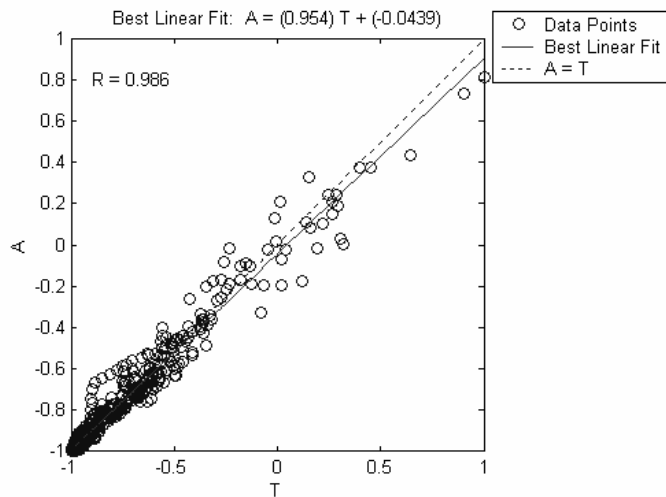
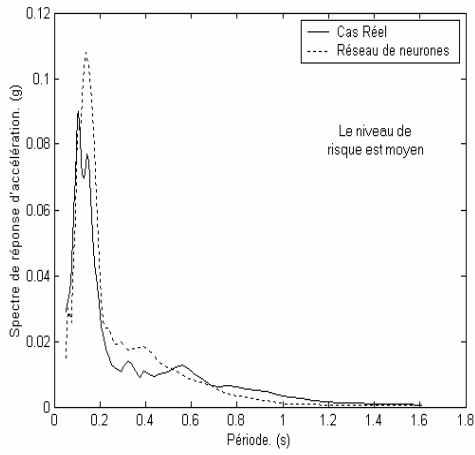


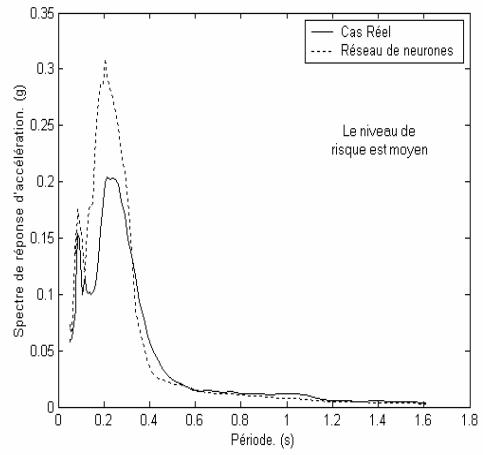
Figure.V. 20. Comparaison entre A et T

Après avoir conçu les quatre RNA des quatre classes, un teste a été mené avec 10 autres spectres de réponse d'accélération et ce, pour valider la capacité des RNA adoptés.

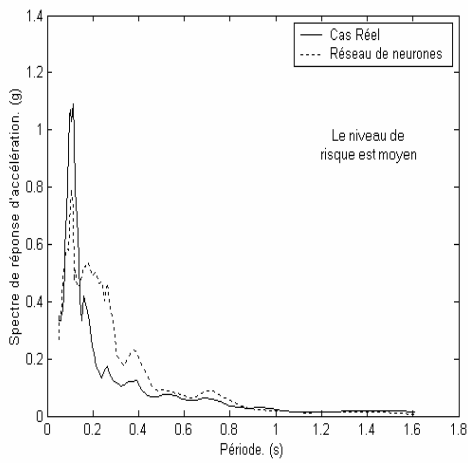
La figure.V.21 englobe les courbes S_{as} (accélération spectrale à la surface libre de la terre) générées par le RNA et les courbes S_{as} obtenus à partir des l'accélérogrammes avec l'estimations du risque lié à l'effet de site sur la base de la classification donnée par l'équation V.5.1.



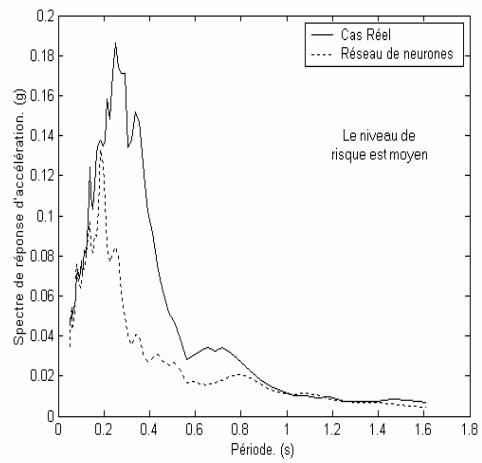
(a) KGWH02



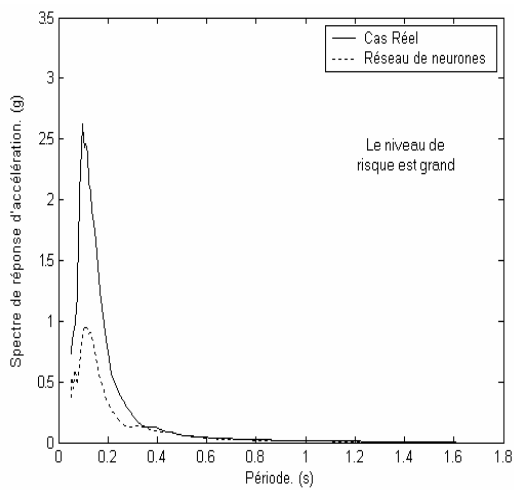
(b) EHMNH04



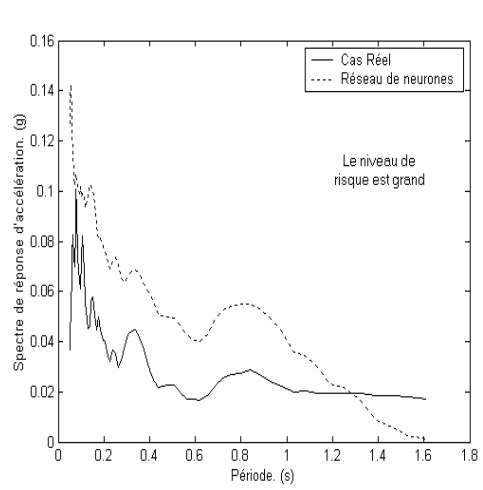
(c) EHMNH07



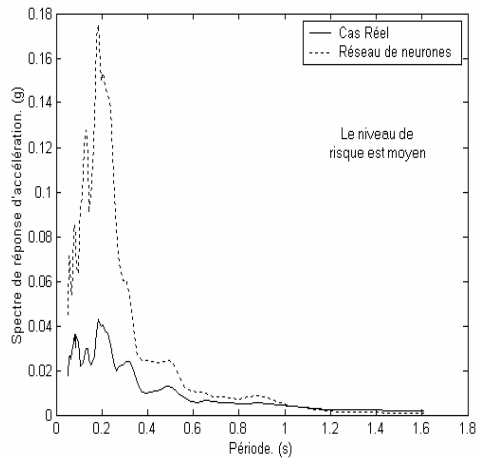
(d) SMNH07



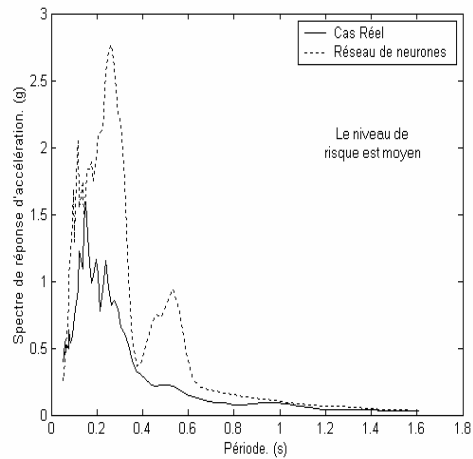
(e) SMNH02



(f) EHMNH03



(g) KOCH03



(h) KOCH05

Figure.V. 21. Spectres de réponse d'accélération estimés par RNA et calculés à partir des enregistrements réels

La génération qui semble la plus satisfaisante parmi les huit courbes de S_{as} générées par RNA est celle du site KGWH02 : le RNA estime bien le tracé du spectre si le maximum de ce dernier est près de celui de l'enregistrement utilisé dans l'apprentissage, ce maximum est une manifestation de la nature non-linéaire du tracé. Si cette condition est réunie, les évaluations données par le RNA sont satisfaisantes.

En revanche, pour les autres cas les amplitudes des accélérations sont différentes en comparaison avec les cas réels. Cette différence réside essentiellement au niveau des pics. A titre d'exemple, S_{as} maximale obtenue par le RNA (site SMNH02) de la classe C3 est de l'ordre de 1.0g or dans le cas réel elle est de 2.6g. L'augmentation de l'erreur d'estimation est liée à la procédure d'apprentissage du réseau qui est formé avec un bas degré de non-linéarité (le passage du bas pic vers le haut pic). Par conséquent, de tels réseaux ne peuvent pas être employés pour l'extrapolation en cas de degré plus élevé de non-linéarité.

Le même phénomène se produit en utilisant des réseaux formés avec des enregistrements spectraux qui représentent des pics élevés pour estimer les enregistrements spectraux avec des pics très bas comme c'est le cas de KOCH03.

Ceci suggère que plusieurs réseaux doivent être formés pour chaque gamme d'accélération maximale (Hurtado J.E et al 2000).

Pour ce faire, un code de calcul nommé SKRISQ (annexe 5) a été établi regroupant 130 réseaux de neurones formés avec les 130 couples (entrée/sortie) : la même architecture (figure.V.18) et les mêmes entrées/sortie sont conservées (figure.V.17).

La figure V.22 et V.23 représentent des informations sur le processus d'apprentissage du RNA numéro 106, dont $MSE= 9.9.10^{-4}$ et le coefficient de corrélation $R=0.998$ et ce après 921 époques.

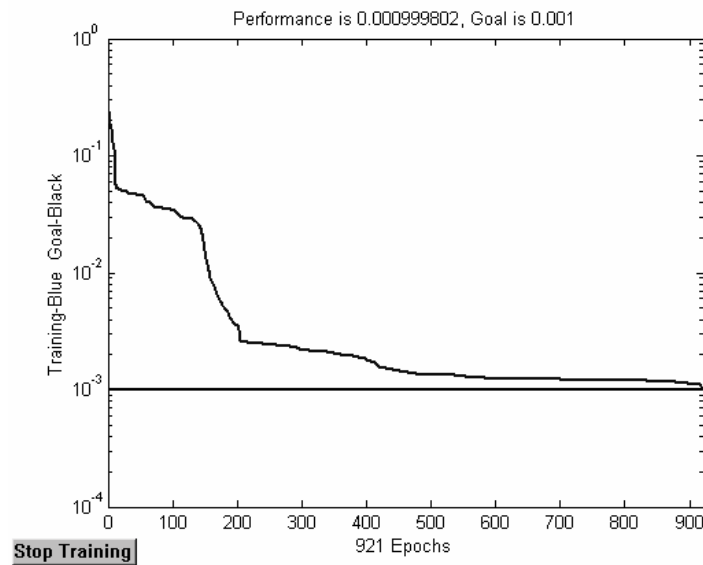


Figure.V.22..Processus d'apprentissage

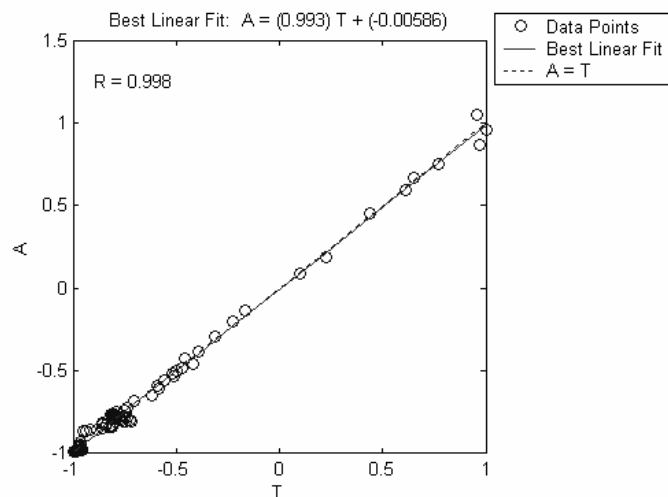


Figure.V.23.Comparaison entre A et T

V.7.3. Phase test

V.7.3.1. Tests sous d'autres enregistrements

Pour valider le code de calcul SKRISQ, il faut le tester avec des enregistrements non présentés auparavant. Le tableau.V.10 illustre les S_1 et les S_2 obtenus par SKRISQ et ceux calculés directement à partir des accélérographes installés à la surface de la terre.

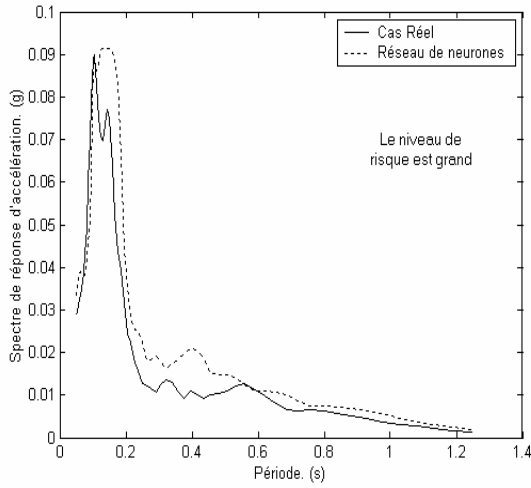
On remarque donc, que les valeurs de S_1 et S_2 estimées par SKRISQ convergent vers les valeurs réelles. En conséquence, SKRISQ donne des niveaux de risques similaires à ceux des cas réels.

| Classes | Codes des Profils | Spectre de réponse réel | | Niveau de risque | Par SKRISQ | | Niveau de risque |
|---------|-------------------|-------------------------|-------|------------------|------------|-------|------------------|
| | | S_1 | S_2 | | S_1 | S_2 | |
| A1 | KGWH02 | 7.3 | 3.6 | H | 8.7 | 5.4 | H |
| B2 | EHMNH04 | 3.4 | 2.9 | H | 3.6 | 3.9 | H |
| | SMNH07 | 6.6 | 1.6 | M | 6.0 | 1.8 | M |
| | EHMNH07 | 4.1 | 1.8 | M | 3.5 | 1.4 | M |
| C3 | SMNH03 | 5.0 | 1.8 | M | 6.2 | 1.5 | M |
| | SMNH02 | 8.8 | 1.6 | H | 8.8 | 1.5 | H |
| | KOCH03 | 2.3 | 1.0 | M | 2.0 | 1.2 | M |
| | SMNH05 | 7.9 | 4.7 | H | 7.9 | 4.4 | H |
| D4 | EHMNH03 | 3.3 | 1.1 | M | 3.1 | 1.0 | M |
| | KOCH05 | 4.7 | 1.1 | M | 4.7 | 0.8 | M |

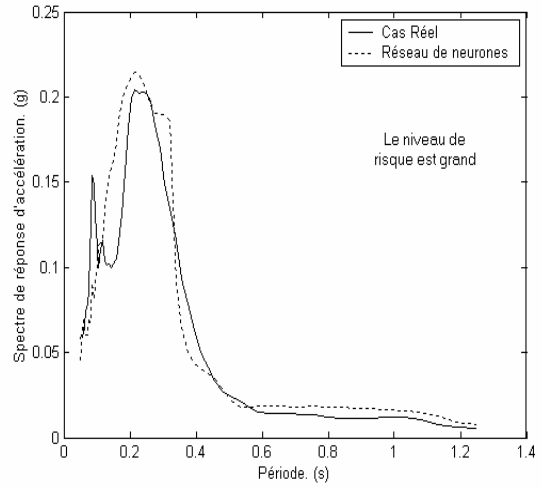
Tableau.V.10. Les résultats obtenus par SKRISQ; et celles tirés des enregistrements

(H : haut risque et M : moyen risque)

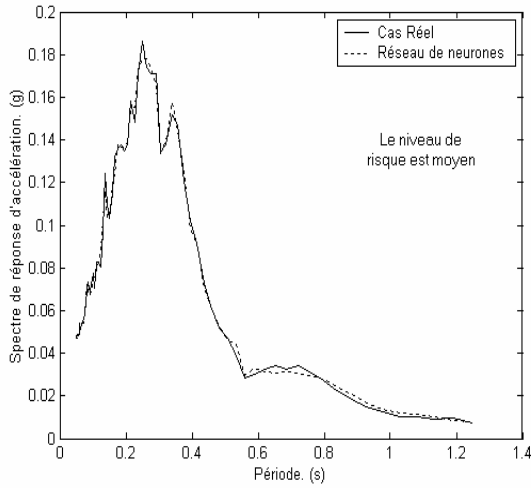
La figure.V.24 représente les graphes des spectres de réponses d'accélération estimées par SKRISQ et enregistrées en fonction de la période et ce pour les profils de sols illustrés dans le tableau V.10.



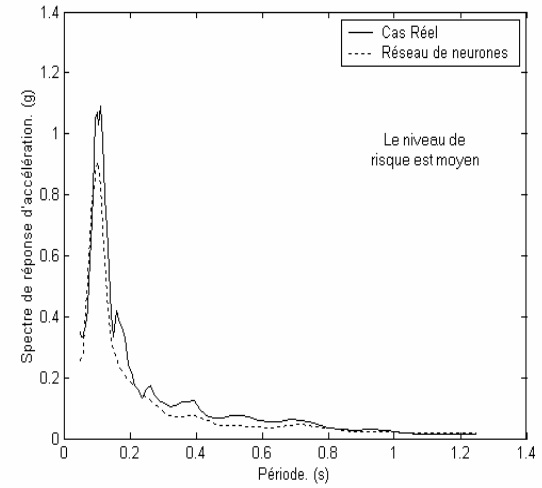
(a) KGWH02



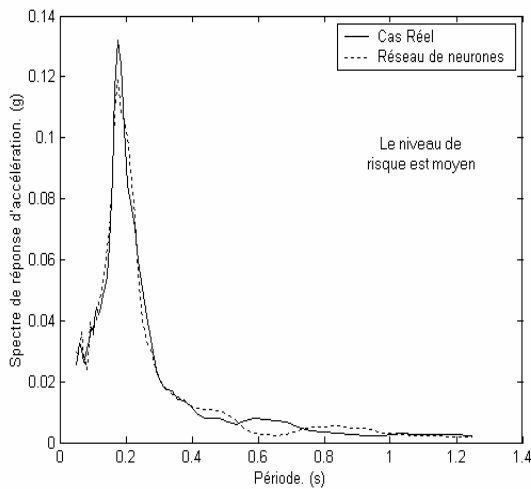
(b) EHMNH04



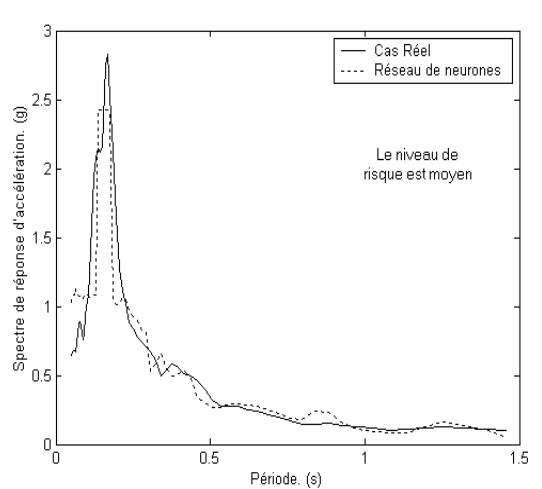
(c) SMNH07



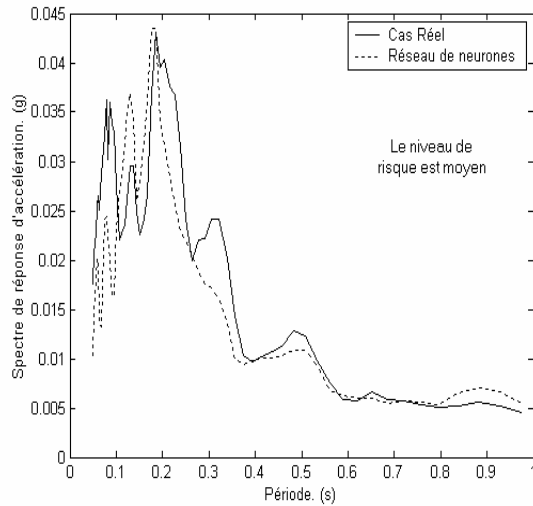
(d) EHMNH07



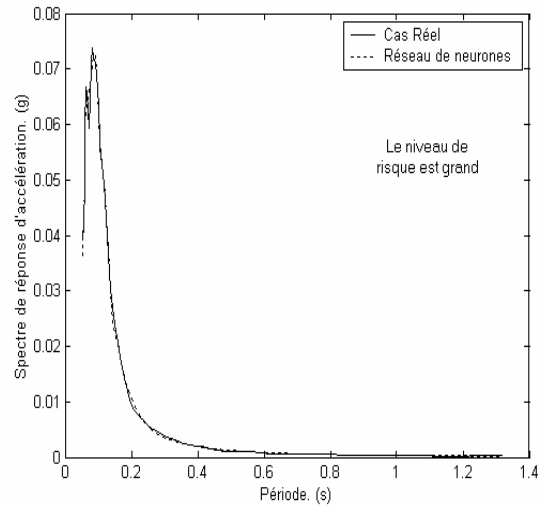
(e) SMNH03



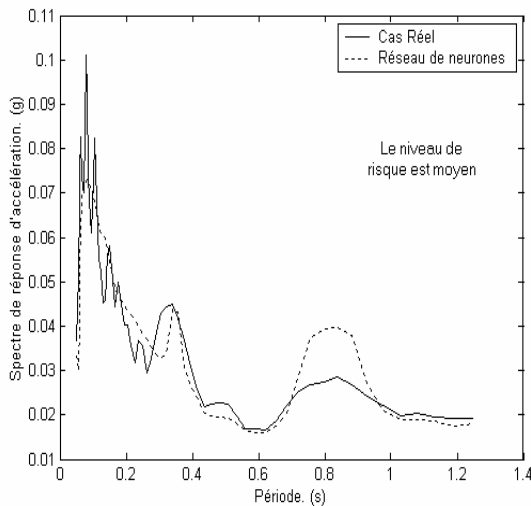
(f) SMNH02



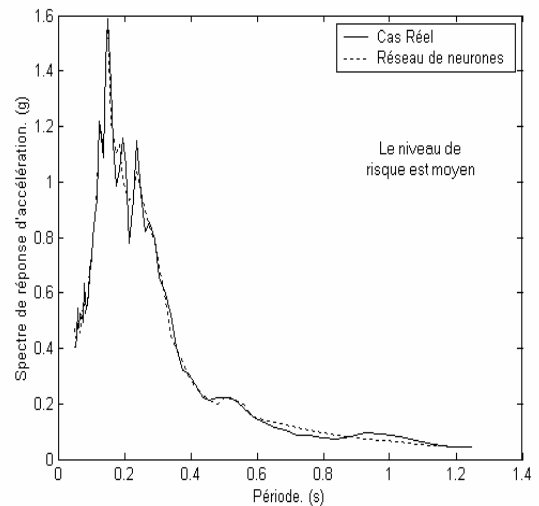
(g) KOCH03



(h) SMNH05



(i) EHMNH03



(j) KOCH05

Figure.V. 24. Spectres de réponse d'accélération estimés par RNA et calculés à partir des enregistrements réels.

Les remarques tirées de la figure.V.24, sont les suivantes :

1. Concernent les profils SMNH07, SMNH02, SMNH05 et KOCH05, les courbes générées par SKRISQ et celles des cas réels sont les mêmes.
2. Pour les profils KGWH02, EHMNH04, SMNH03, KOCH03 et EHMNH07 les courbes sont très proches des enregistrements, hormis pour les valeurs des pics de résonance qui sont un peu différentes par rapport aux pics réels.

3. L'allure de la courbe spectrale de EHMNH03 est proche du cas réel. Par contre, les amplitudes des pics sont peu différentes en comparaison avec la réalité.

Donc d'une manière générale, le SKRISQ a pallié pratiquement le problème du comportement non-linéaire au niveaux des pics (passage du bas pic vers le haut pic et inversement) et ce pour les mêmes sites présentés aux réseaux de neurones avec des enregistrements différents.

V.8. Conclusion

Ce chapitre se proposait d'atteindre les deux objectifs suivants :

- I. Fournir un moyen de modélisation du risque sismique lié à l'effet de site, efficace et moins coûteux dans un but d'utilisation pratique par l'ingénieur. C'est pourquoi, les réseaux de neurones artificiels sont utilisés. Les facteurs d'entrées et de sorties du réseau de neurones sont :

- Les facteurs liés au site : La vitesse de cisaillement moyenne sur trente mètres de profondeur, fréquence caractéristique de site ainsi que l'épaisseur totale du profil de sol.

- Les facteurs liés au mouvement sismique généré par EERA sont : le facteur d'amplification spectrale moyen en accélération entre [0,0.5]s et le facteur d'amplification spectrale en accélération à la période $T=1s$.

Dans ce contexte, le niveau de risque est classé en trois catégories éq.V.5.1. suivant les deux facteurs d'amplification générés par les réseaux de neurones encrés dans le code de calcul SRISQ: haut risque, faible risque et risque moyen.

Par la suite, un test a été effectué sur la base des deux différentes sollicitations (faible et forte). Il en résulte, que le SRISQ donne des bonnes approximations en les comparant avec les résultats réels. En revanche, il sous estime le risque lié à l'effet de site en cas d'une forte sollicitation, cela est dû au modèle linéaire équivalent utilisé dans la phase d'apprentissage. Cette conclusion va être confirmée avec d'autres exemples dans le chapitre suivant.

- II. Donner le spectre de réponse d'accélération d'un site à la surface libre à partir de celui de référence par la méthode des réseaux de neurones en utilisant dans la phase d'apprentissage les données du dense réseau d'accélérographe KIK-NET, en adoptant toujours la classification de site ($V_{s30}-F_0$). En outre, un code de calcul a été élaboré sous

l'environnement Matlab et ce pour mieux représenter les courbes spectrales et les deux facteurs d'amplification spectrale ainsi que le niveau de risque lié à l'effet de site.

Les paramètres d'entrées et de sortie du réseau sont :

- Entrées : le spectre de réponse d'accélération de référence et la période propre correspondante.
- Sortie : le spectre de réponse d'accélération à la surface libre de la terre.

La génération d'un spectre de réponse d'accélération par le modèle neuronal est effectuée en premier lieu avec une classification basée seulement sur le type de sol. Les résultats du test effectué sur des enregistrements ne faisant pas partie des spectres d'apprentissage mais appartenant aux mêmes sites, montrent une grande erreur d'estimation du pic d'accélération due au comportement non-linéaire aux niveaux des pics (passage du bas pic vers le haut pic et inversement). Pour palier cette gêne, les réseaux de neurones sont classés suivant le type de sol et suivant l'accélération spectrale maximale d'entrée.

Le même test suscitait, est utilisé pour conclure que SKRISQ a pallié pratiquement le problème du comportement non-linéaire au niveaux des pics et a généré des spectres de réponses semblables à ceux enregistrés, ce qui a engendré un niveau de risque authentique.

Toutefois, pour que les résultats trouvés dans ce chapitre ainsi que les remarques et les conclusions obtenues dans les chapitres précédents soient validés et exploités, un sixième chapitre est ajouté et qui sera consacré à tester les codes de calculs élaborés (SRISQ et SKRISQ) et ce, pour des mouvements modérés et forts.

CHAPITRE VI :

VALIDATION, EXPLOITATION DES MODELES ET ANALYSE DES RESULTATS

VI.1. Introduction

La première partie de ce chapitre est consacrée à analyser les résultats trouvés et valider les deux modèles neuronaux développés dans le chapitre précédent en utilisant les données d'un site qui possède sa vraie carte d'identité. C'est le cas des sites japonais. Le Japon est doté de quatre denses réseaux d'accélérographes, à savoir KIK-NET, K-NET (annexe 3), H-NET et FE-NET.

À cet égard, la base de données du réseau KIK-NET est utilisée dans cette première partie. Les stations sont équipées de deux accélérographes, le premier en surface et le deuxième en profondeur. La grande profondeur où les stations sont encrées, représentent l'avantage de la pureté: non affectées par les phénomènes de surface (Lussou.P, 2001); ce qui a permis d'analyser l'amplification sismique dans sa vraie grandeur. Cette profondeur peut atteindre -2300m dans certaines stations, comme celle de CHBH04 qui se situe dans la préfecture de CHIBA.

Par la suite, une exploitation de SRISQ et SKRISQ est menée sur la base des deux séismes : Chenoua 1989 et Boumerdès 2003. La base de données utilisées pour le premier séisme est tirée de: "Internet Site for European Strong-Motion", tandis que l'ensemble des travaux menés par le centre national de recherche appliquée en génie parasismique C.G.S sont exploités pour étudier le cas de Boumerdès 2003.

VI.2. Validations des deux modèles neuronaux et analyse des résultats

L'objectif ici, est de tester l'aptitude des deux codes de calcul SRISQ et SKRISQ à estimer le niveau de risque lié à l'effet de site et à tracer l'accélération spectrale en surface (par SKRISQ), sur la base des deux exemples : site de HYOGO sollicité par l'événement du 12/01/2001 M=5.4 (mouvement modéré), et le site de TOTTORI frappé par le séisme de Tottori M=7.3 (mouvement fort). Pour effectuer ce test en vraie grandeur calculs et enregistrements obtenus in-situ sont confrontés.

VI.2.1. Site de HYOGO (Japon)

VI.2.1.1. Présentation du site

Le Site de HYOGO se situe au sud ouest du Japon sur l'île de Honshu. Les propriétés élastiques des 11 profils utilisés et leurs classes sont résumées sur le tableau VI.1. Les positions des stations et les accélérations maximales enregistrées en surface PGAs et en profondeur PGAb sont illustrées sur le tableau.VI.2.

Les situations géographiques et topographiques sont représentées sur la figure VI.1. A cet égard, l'évènement du 12/01/2001 caractérisé par une magnitude de 5.4 et une profondeur focale de 10Km est désigné pour effectuer ce test.

| Station | V_{s30} (m/s) | H (m) | F_0 (Hz) | Classification de site |
|---------|-----------------|-------|------------|------------------------|
| HYGH01 | 370.06 | 74 | 1.43 | B1 |
| HYGH02 | 612.06 | 14 | 6.75 | C4 |
| HYGH03 | 443.28 | 6 | 5.46 | C3 |
| HYGH04 | 476.17 | 22 | 4.33 | C3 |
| HYGH05 | 527.86 | 13.5 | 5.45 | C3 |
| HYGH06 | 368.56 | 32 | 2.96 | B2 |
| HYGH07 | 506.41 | 14 | 5.85 | C3 |
| HYGH08 | 285.26 | 24 | 2.51 | B2 |
| HYGH09 | 364.43 | 52 | 2.25 | B2 |
| HYGH10 | 223.87 | 82 | 0.96 | B1 |
| HYGH11 | 270.66 | 50 | 1.82 | B2 |

Tableau.VI. 1.Classification des sites.

| Station | Latitude | Longitude | PGAb (g) | PGAs (g) |
|---------|----------|-----------|----------|----------|
| HYGH01 | 34.2904 | 134.7968 | 0.0025 | 0.0083 |
| HYGH02 | 35.0639 | 134.4261 | 0.003 | 0.0053 |
| HYGH03 | 35.2161 | 134.5264 | 0.0253 | 0.0917 |
| HYGH04 | 35.0676 | 135.2839 | 0.0023 | 0.0081 |
| HYGH05 | 34.8963 | 134.3311 | 0.0029 | 0.0134 |
| HYGH06 | 34.7903 | 134.4819 | 0.0022 | 0.0125 |
| HYGH07 | 35.0278 | 134.6736 | 0.0065 | 0.0314 |
| HYGH08 | 35.0978 | 134.9064 | 0.0071 | 0.03 |
| HYGH09 | 34.905 | 135.0872 | 0.0045 | 0.0247 |
| HYGH10 | 34.8132 | 134.8106 | 0.0028 | 0.0145 |
| HYGH11 | 35.2894 | 134.9098 | 0.0078 | 0.0214 |

Tableau.VI. 2. Situations géographiques des sites et leurs PGAs et PGAb.

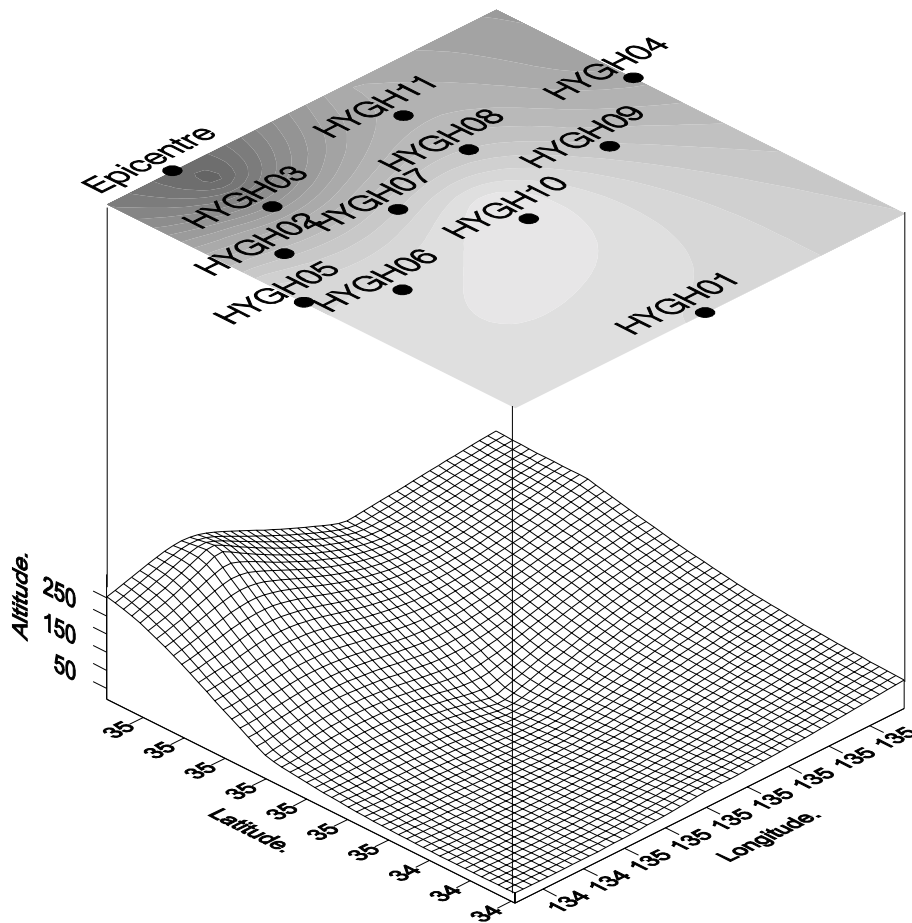


Figure.VI. 1. Positions géographiques et topographiques des stations

VI.2.1.2. Estimation du niveau de risque par SRISQ

Le SRISQ est utilisé dans ce contexte comme un moyen d'évaluation du risque lié à l'effet de site. Les 11 sites sont désignés pour effectuer ce test. Après calcul, les résultats résumés sur le tableau VI.3 et sur la figure.VI.2 ont été aboutis. Cette dernière représente le code et la position de chaque station avec son niveau de risque estimé par SRISQ (en bleu) et par l'accélération spectrale enregistrée sur site (en rouge, HR : Haut risque et MR : Moyen risque).

Les résultats de l'estimation du niveau de risque causé par l'effet de site montrent une concordance totale entre les niveaux de risques trouvés par les spectres de réponses d'accélération enregistrés et estimés par SRISQ. En revanche, la quantification du risque par les facteurs d'amplification spectrale S_1 et S_2 montre une différence entre les résultats

obtenus par SRISQ et à partir des calculs directs. Cette différence est due à la procédure d'apprentissage du modèle neuronal qui a été fait par le modèle linéaire équivalent dont les mouvements d'entrées sont supposés enregistrés sur un affleurement rocheux.

Les résultats obtenus montrent que, pour le cas des mouvements modérés, SRISQ estime bien le niveau de risque lié à l'effet de site local.

| Code des stations | S ₁ SRISQ | S ₂ SRISQ | Niveau de risque | S ₁ réel | S ₂ réel | Niveau de risque |
|-------------------|----------------------|----------------------|------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| HYGH01 | 2.2 | 2.3 | H | 2.4 | 2.4 | H |
| HYGH02 | 1.8 | 1.3 | M | 1.8 | 0.8 | M |
| HYGH03 | 8.1 | 1.7 | M | 4.5 | 1.1 | M |
| HYGH04 | 3.7 | 1.9 | M | 4.3 | 1.3 | M |
| HYGH05 | 2.3 | 1.4 | M | 4.0 | 1.1 | M |
| HYGH06 | 2.7 | 1.4 | M | 4.1 | 1.1 | M |
| HYGH07 | 2.5 | 1.5 | M | 6.5 | 1.3 | M |
| HYGH08 | 3.4 | 1.6 | M | 4.4 | 1.9 | M |
| HYGH09 | 2.6 | 0.8 | M | 5.7 | 1.6 | M |
| HYGH10 | 2.0 | 2.5 | H | 5.1 | 6.7 | H |
| HYGH11 | 3.0 | 1.9 | M | 5.7 | 1.4 | M |

Tableau.VI. 3. S₁ et S₂ obtenus par SRISQ et enregistrés sur sites. M : moyen risque, H : haut risque.

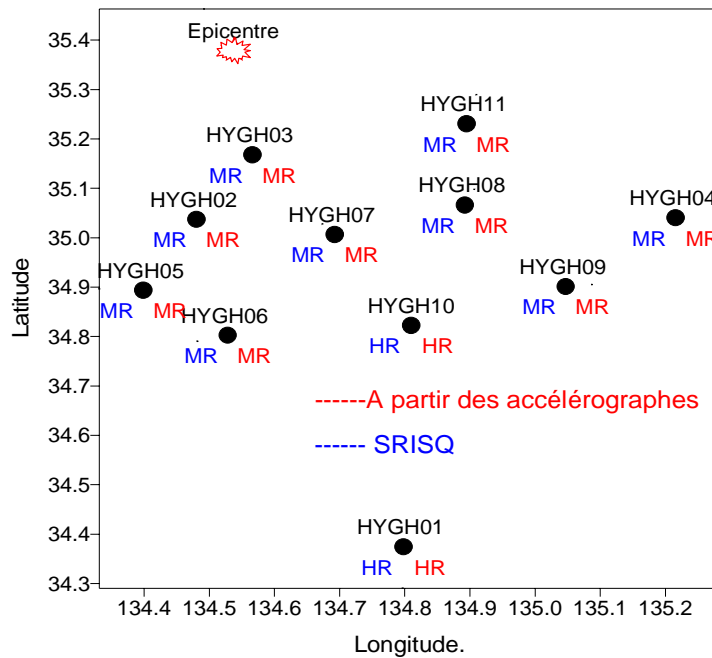
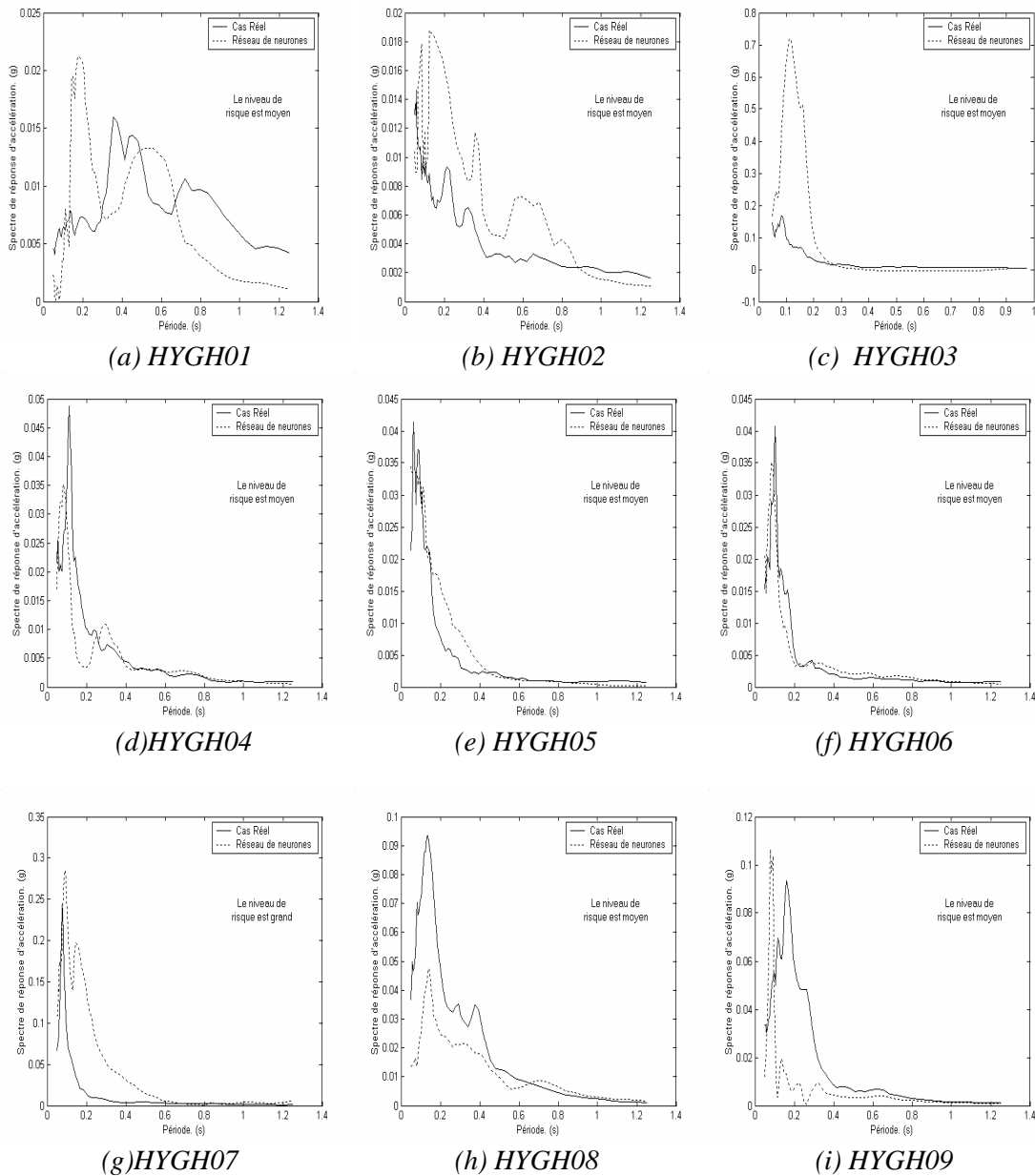


Figure.VI. 2. Niveaux de risques trouvés par SRISQ, et déduit en utilisant S₁ et S₂ calculés sur la base des enregistrements réels sur sites

VI.2.1.3. Génération des accélérations spectrales et estimation du risque en utilisant SKRISQ

Dans cette section, les spectres de réponses d'accélérations à la surface libre des 11 sites sont générés par SKRISQ à partir des ceux enregistrés en profondeur. Les courbes spectrales d'accélérations estimées par SKRISQ et celles obtenues à partir des enregistrements réels à la surface de chaque profil sont représentées sur la figure.VI.3. Les deux facteurs spectraux d'amplification S_1 et S_2 générés par SKRISQ et par calcul direct (cas réels) ainsi que les niveaux de risques correspondants sont illustrés sur le tableau.VI.4.



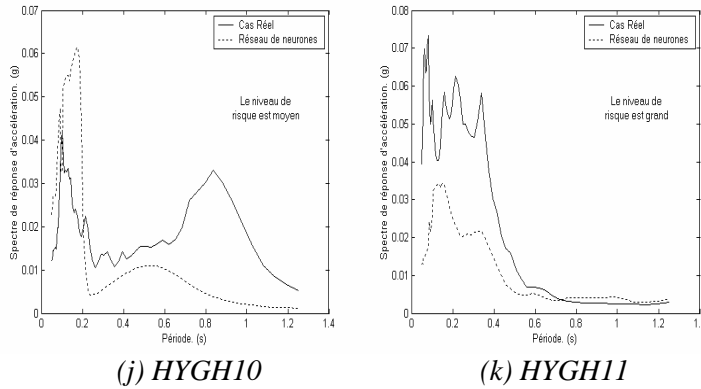


Figure.VI. 3. Spectres de réponse d'accélération estimés par SKRISQ et calculés à partir des enregistrements réels.

La comparaison entre les 11 courbes obtenues par le SKRISQ et à partir des enregistrements montre qu'hormis les courbes (d), (e), (f) et (g) qui sont proches des cas réels avec une faible sous-estimation pour les trois premiers et une surestimation pour (g), les autres courbes sont différentes par rapport à celles enregistrées sur sites. Cette différence peut-être justifiée comme suite :

1. Les sites (a), (b) et (j) appartiennent aux classes : B1, C4 et B1 respectivement. Ces trois classes sont incompatibles avec celles utilisées dans SKRISQ. Rappelant que la classification des sites qu'on a adoptée est : V_{s30} - F_0 .
2. Ce qui concerne (c), la faible hauteur du profil (6m) a entraîné cette grande différence entre les deux courbes.
3. Dans les courbes (h) et (k) le modèle neuronal encré dans le SKRISQ a sous-estimé les valeurs des pics. Cela est dû principalement à la limitation dans la base de données de SKRISQ en terme d'accélération maximale.
4. Finalement, pour la courbe (i) le maximum simulé converge vers celui du cas réel avec une faible surestimation et une déviation au niveau de la période de résonance.

Par ailleurs, le SKRISQ a donné les même niveaux de risques (tableaux VI.4 et figure VI.4) que ceux estimés réellement, sauf pour le profil HYGH01 dont le niveau de risque fourni par le SKRISQ est moyen alors quand réalité il est grand. En revanche, les facteurs d'amplification spectrale générés par SKRISQ sont pour certains profils surestimés et pour d'autres sous-estimés. A titre d'exemple, pour le profil HYGH03 les deux S_1 sont très proches et valent 1.0 (SKRISQ) et 1.1 (réel). Par contre, S_2 (SKRISQ) est très grand (17.7) par rapport à celui calculé directement par l'enregistrement $S_2=4.5$.

| Code des stations | SKRISQ | | Niveau de risque | Réal | | Niveau de risque |
|-------------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|------------------|
| | S ₁ | S ₂ | | S ₁ | S ₂ | |
| HYGH01 | 10.3 | 0.1 | M | 2.4 | 2.4 | H |
| HYGH02 | 2.9 | 0.6 | M | 1.8 | 0.8 | M |
| HYGH03 | 17.7 | 1.0 | M | 4.5 | 1.1 | M |
| HYGH04 | 3.7 | 1.2 | M | 4.3 | 1.3 | M |
| HYGH05 | 4.6 | 0.5 | M | 4.0 | 1.1 | M |
| HYGH06 | 7.3 | 1.2 | M | 4.1 | 1.1 | M |
| HYGH07 | 14.6 | 1.6 | M | 6.5 | 1.3 | M |
| HYGH08 | 2.0 | 1.9 | M | 4.4 | 1.9 | M |
| HYGH09 | 3.2 | 1.4 | M | 5.7 | 1.6 | M |
| HYGH10 | 8.2 | 2.1 | H | 5.1 | 6.7 | H |
| HYGH11 | 2.1 | 1.4 | M | 5.7 | 1.4 | M |

Tableau.VI. 4. S₁ et S₂ obtenus par SKRISQ et enregistrés sur sites. M : moyen risque, H : haut risque.

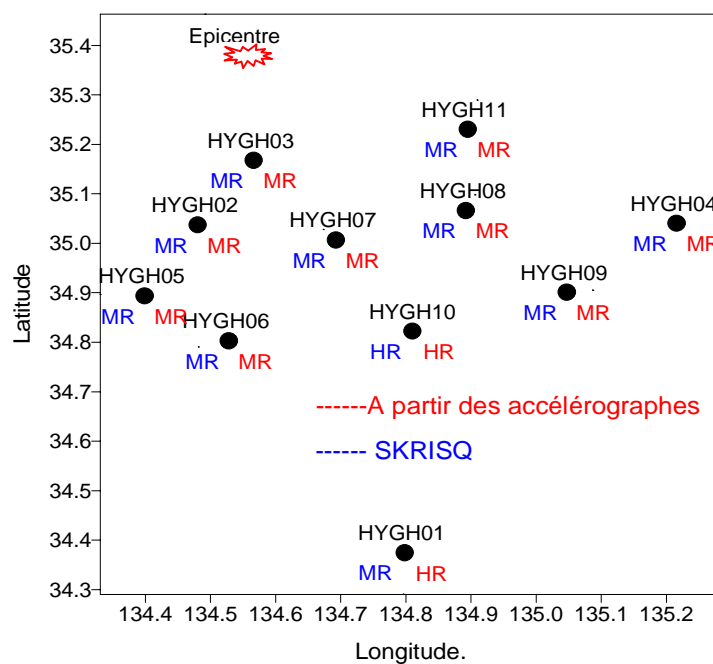


Figure.VI. 4. Niveaux de risques obtenus par SKRISQ, et calculés à partir des enregistrements réels

VI.2.2. Site de OKAYAMA-TOTTORI

VI.2.2.1. Présentation du site

Il se situe au sud ouest du Japon sur l'île de Honshu (Figure VI.6). Le 06/10/2000 la région de TOTTORI a subi un violent séisme de magnitude 7.3 dont hypocentre se situe à une profondeur de 11 Km. Le plan de la faille est représenté sur la figure VI.7. Les situations

géographiques des stations considérées sont représentées sur la figure VI.8. Les paramètres des sites et les PGA (en surface PGAs et en profondeur PGAr) enregistrés sur les 24 stations durant l'événement sont illustrés dans le tableau VI.5.

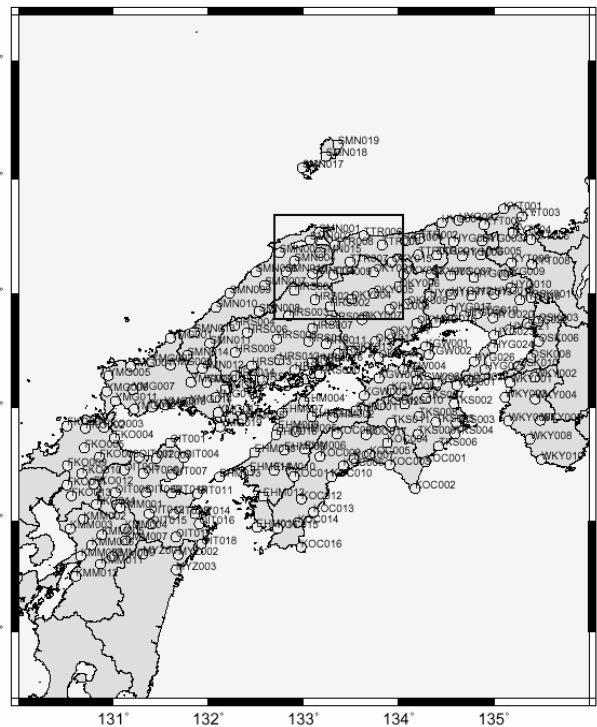
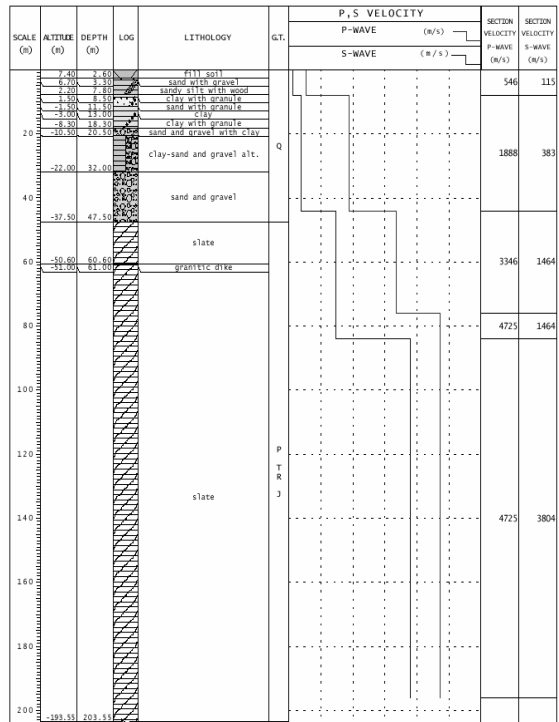


Figure.VI. 5.Profil de sol de la station OKYH01

Figure.VI. 6.. Site de OKAYAMA-TOTTORI

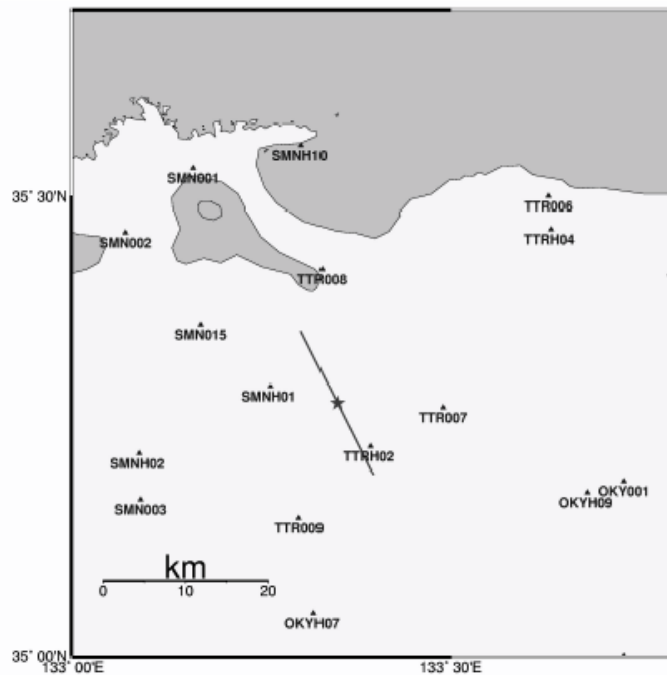


Figure.VI. 7.Plan de faille et épiceutre du séisme de Tottori ainsi que les stations des réseaux K-NET et KIK-NET.

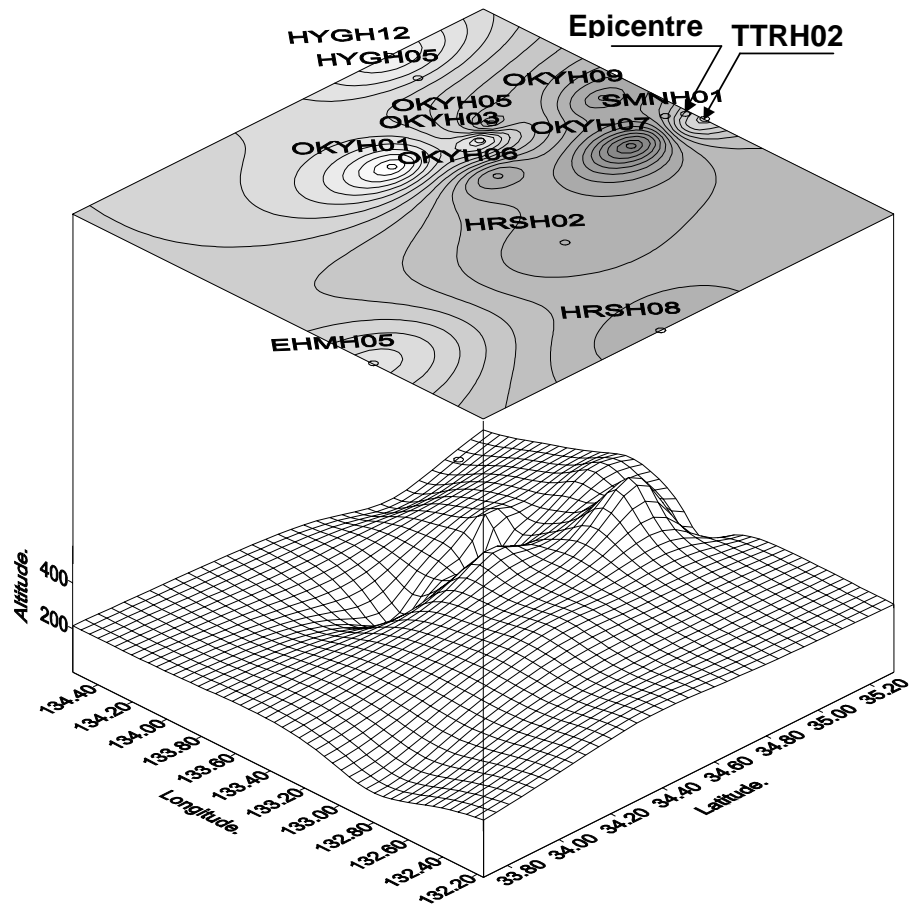


Figure.VI. 8. Positions géographiques et topographiques des stations

| Station | V_{s30} (m/s) | H (m) | F_0 (Hz) | PGAr (g). | PGAs (g). | Distance épacentrale (km) | Classification de site |
|---------|-----------------|-------|------------|-----------|-----------|---------------------------|------------------------|
| OKYH01 | 236.21 | 44 | 1.53 | 0.029 | 0.1 | 104.94 | B1 |
| OKYH05 | 488.15 | 18 | 5.89 | 0.0493 | 0.11 | 72.47 | C3 |
| OKYH06 | 525.34 | 24 | 5.27 | 0.0164 | 0.08 | 69.97 | C3 |
| OKYH07 | 929.25 | 6 | 10.63 | 0.0783 | 0.18 | 25.63 | D4 |
| OKYH09 | 461 | 21 | 4.71 | 0.0475 | 0.18 | 38.35 | C3 |
| SMNH01 | 464.41 | 22 | 4.32 | 0.185 | 0.72 | 9.66 | C3 |
| TTRH02 | 310.21 | 100 | 1.38 | 0.358 | 0.92 | 7.28 | B2 |
| EHMNH05 | 362 | 30 | 3.02 | 0.0028 | 0.011 | 184.25 | B2 |
| HRSH08 | 852 | 10 | 14.32 | 0.0133 | 0.024 | 164.26 | D4 |
| HRSH02 | 820 | 12 | 8.14 | 0.0133 | 0.12 | 44.16 | D4 |
| HYGH12 | 615 | 13 | 8.4 | 0.0148 | 0.08 | 138.47 | C4 |
| HYGH05 | 527.86 | 13.5 | 5.45 | 0.02 | 0.08 | 117.1 | C3 |

Tableau.VI. 5. Paramètres-classe-distance de chaque profil et les PGA enregistrés.

VI.2.2.2. Estimation du risque et génération des spectres

Les paramètres de site de SRISQ sont regroupés dans le tableau VI.5, ainsi que les valeurs des PGA correspondants. Les niveaux de risques sont classés suivant l'équation V.5.1 et les résultats de la simulation sont mentionnés sur le tableau VI.6.

De même pour SKRISQ, les spectres de réponses d'accélération enregistrés en profondeur sont introduits dans SKRISQ. Les résultats sont regroupés sur le tableau VI.6, et les accélérations spectrales obtenues en surface sont illustrées sur la figure VI.11.

| Code des stations | SRISQ | | | SKRISQ | | | Réal | | |
|-------------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|------------------|
| | S ₁ | S ₂ | Niveau de risque | S ₁ | S ₂ | Niveau de risque | S ₁ | S ₂ | Niveau de risque |
| OKYH01 | 1.1 | 2.5 | M | 7.0 | 5.2 | H | 9.1 | 2.5 | H |
| OKYH05 | 2.9 | 1.0 | M | 2.5 | 0.4 | M | 3.2 | 0.9 | M |
| OKYH06 | 1.6 | 1.1 | M | 6.7 | 0.9 | M | 6.1 | 1.9 | M |
| OKYH07 | 1.2 | 1.0 | M | 3.1 | 0.2 | M | 2.6 | 0.7 | M |
| OKYH09 | 2.8 | 1.0 | M | 4.0 | 1.2 | M | 4.7 | 1.2 | M |
| SMNH01 | 2.6 | 1.8 | M | 2.7 | 1.0 | M | 3.6 | 1.6 | M |
| EHMNH05 | 2.6 | 1.3 | M | 4.2 | 0.5 | M | 4.5 | 1.2 | M |
| HRSH02 | 1.0 | 1.0 | F | 3.0 | 1.4 | M | 2.4 | 1.1 | M |
| HRSH08 | 0.9 | 1.0 | M | 2.4 | 1.1 | M | 2.6 | 1.1 | M |
| HYGH05 | 1.8 | 1.0 | M | 4.0 | 1.6 | M | 4.3 | 1.0 | M |
| HYGH12 | 1.0 | 1.0 | F | 5.5 | 1.1 | M | 6.3 | 0.9 | M |
| TTRH02 | 1.4 | 0.1 | M | 2.0 | 3.1 | H | 2.0 | 6.1 | H |

Tableau.VI. 6. S₁ et S₂ obtenus par SRISQ, SKRISQ et enregistrés sur sites

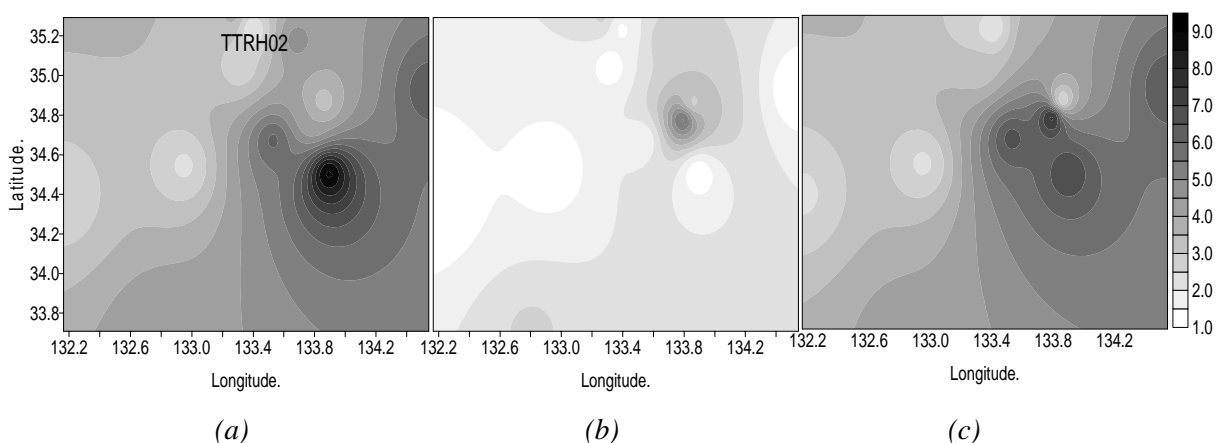


Figure.VI. 9. Facteurs d'amplification spectrale S₁ T= [0-0.5]sec, pour les 12 profils.

(a) : A partir des accélérographes, (b) : Par SRISQ, (c) : Par SKRISQ

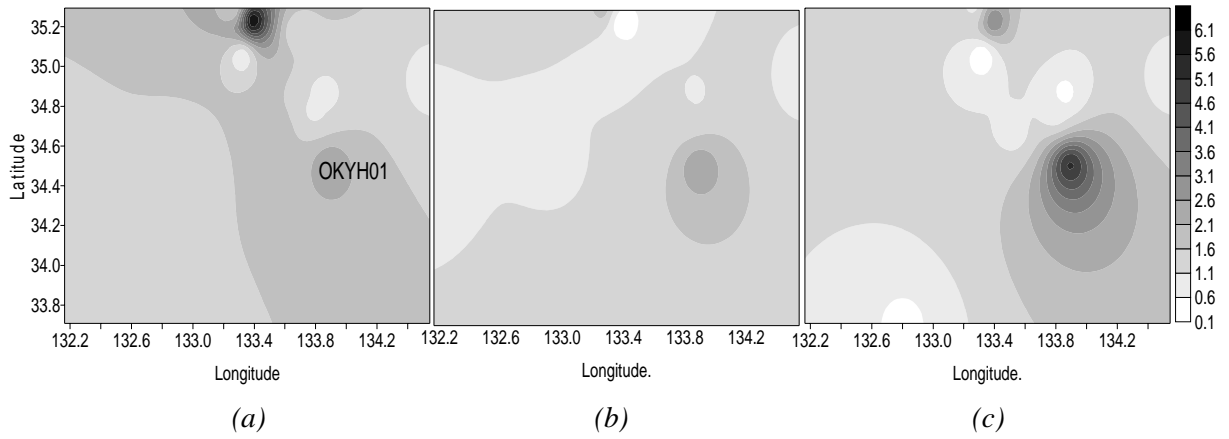
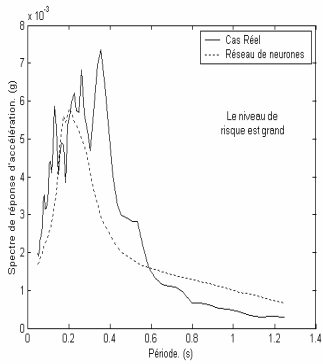
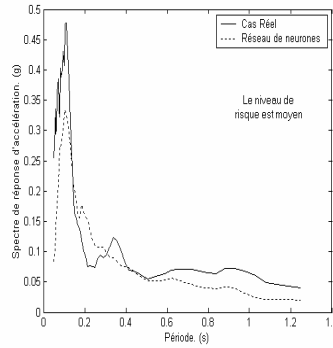


Figure.VI. 10. Facteurs d'amplification spectrale S_2 à $T=1\text{sec}$, pour les 12 profils.

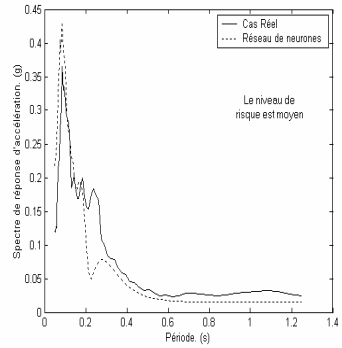
(a) : A partir des accélérographes, (b) : Par SRISQ, (c) : Par SKRISQ



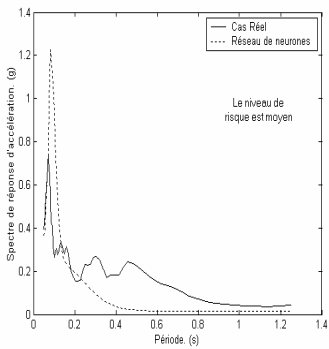
(a) OKYH01



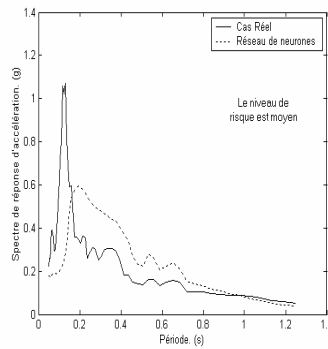
(b) OKYH05



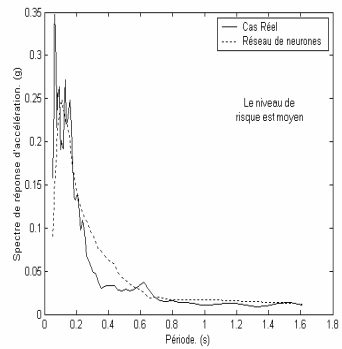
(c) OKYH06



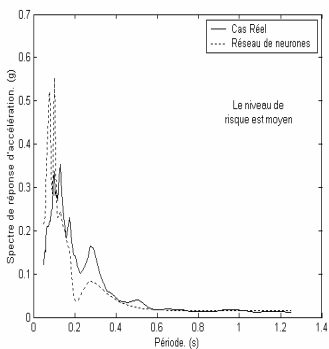
(d) OKYH07



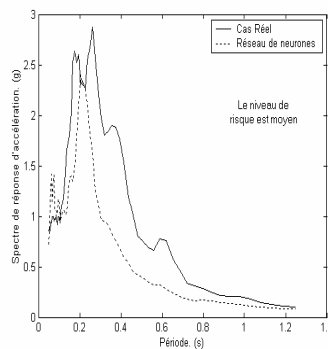
(e) OKYH09



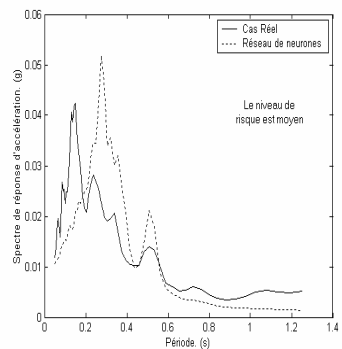
(f) HYGH05



(g) HYGH12



(h) SMNH01



(i) EHMNH05

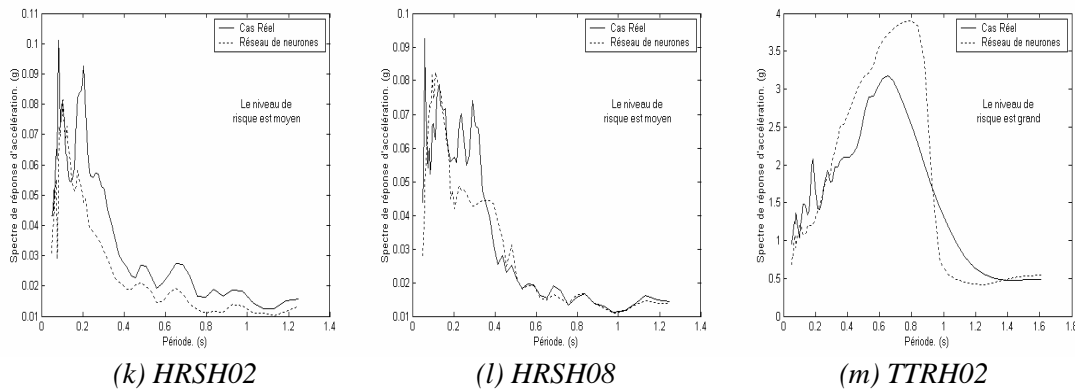


Figure.VI. 11. Spectres de réponse d'accélération estimés par SKRISQ et calculés à partir des enregistrements réels.

VI.2.2.3. Analyse des résultats

Les résultats obtenus (Tableau VI.6) semblent montrer que sous le mouvement fort de TOTTORI, SRISQ a sous-estimés les facteurs d'amplification spectrale S_1 (figure VI.9 (b)). Cette sous-estimation est due essentiellement au modèle linéaire équivalent utilisé dans la phase d'apprentissage du modèle neuronal : Les calculs effectués par Lussou (2001) montrent que le modèle linéaire équivalent présente une faiblesse pour les périodes inférieurs à 0.2 sec et ne rend pas bien compte de la rhéologie des sols. Ce défaut entraîne une sous-estimation du contenu faible période du mouvement sismique. Cela explique les valeurs faibles données par SRISQ sous un tel fort mouvement ($M=7.3$). En revanche, les facteurs d'amplification spectrale S_2 à $T=1s$ obtenus par SRISQ sont en bon accord avec ceux calculés à partir des enregistrements (figure V.10 (b)) sauf pour le cas de TTRH02 dont S_2 réel égal à 6.1 et celui estimé par SRISQ est de l'ordre de 0.1. Cette grande différence est due au comportement fortement non-linéaire du sol ; Fabián et al (2003) ont montré que : «pour les sites japonais, le comportement de sol est non-linéaire au-delà de $PGA=0.2g$ enregistré à la surface et que malgré la non-linéarité, l'amplification de sol est encore importante pour des grands mouvements d'entrée enregistrés en profondeur. Le maximum de PGA sur la surface peut facilement atteindre $1.0g$ en présence de la non-linéarité comme le cas de la station TTRH02 avec un PGA égal à $0.92g$ ». Dans ce contexte, la figure V.12 représente les deux accélérations spectrales en surface et en profondeur (-100m) de la station TTRH02, dans laquelle le comportement non linéaire du sol a fait passer la période prédominante de $0.07s$ à $0.65s$. Cette variation n'est pas prise en compte par le modèle linéaire équivalent qui est utilisé pour former le modèle neuronal encré dans SRISQ. Cette complexité peut être surmontée par l'utilisation des enregistrements réels, comme c'est le cas du SKRISQ.

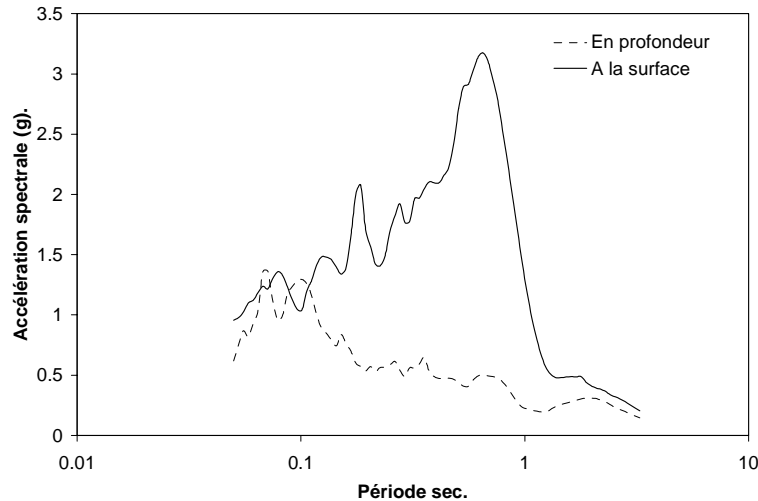


Figure.VI. 12. Spectre de réponse d'accélération en profondeur et à la surface enregistrés au niveau de la station TTRH02

Par ailleurs, les remarques tirées des résultats obtenus par SKRISQ sont les suivantes :

1. Les facteurs d'amplification S_1 obtenus par SKRISQ (figure VI.9 (c)) sont du même ordre de grandeur. Les grandes amplifications enregistrées par les accélérographes sont estimées par SKRISQ.
2. Pour les facteurs d'amplification S_2 obtenus par SKRISQ, ils sont sous-estimés par rapport à ceux calculés à partir des enregistrements (figure VI.10 (c)), néanmoins, cette différence n'influe pas le niveau de risque, puisque les valeurs dans ce stade sont petites sauf pour les stations TTRH02 avec un $S_2=6.1$ (par SKRISQ $S_2=3.1$) et OKYH01 dont l'accélération spectrale à la surface est 2.5 fois celle enregistrée en profondeur, là SKRISQ a surestimé cette amplification et a donné une valeur de 5.2, malgré c'est deux valeurs non identiques, le niveau de risque reste le même.

Pour mieux les représenter, les résultats de S_1 et S_2 obtenus par les deux codes de calculs et par les enregistrements figurés sur le tableau VI.6 sont illustrés sur les deux figures VI.9 et VI.10. La remarque qui semble la plus intéressante dans ce stade réside dans le cas de la station OKYH01 dont la quelle le facteur d'amplification spectrale S_1 est égale à 9.1. Sa position est représentée par un cercle gris dans le contour (a) de la figure VI.10. Cela explique la grande valeur du PGA qui vaut 0.1g pour la composante NS et 0.18g pour la composante EW et ce, malgré la grande distance épacentrale qui est de l'ordre de 105 km (tableau VI.5). Cette amplification est due essentiellement à la nature du sol constituant le profil qui est meuble (classe B1). Outre la nature du sol, la station se situe sur une vallée dans laquelle les ondes sismiques sont prisonnières et amplifiées.

Par ailleurs, la figure VI.11 représente les courbes spectrales d'accélération estimées par SKRISQ et tracées à partir des enregistrements réels à la surface de chaque profil.

La comparaison entre les courbes obtenues par SKRISQ et à partir des enregistrements montre que : d'une façon générale, les allures des accélérations spectrales obtenues par SKRISQ sont proches à celles obtenues par les accélérogrammes. Hormis, les courbes (d), (e) et (g) où l'accélération est surestimée pour les faibles périodes et sous-estimé pour les périodes qui dépassent les 0.2s (courbes (d) et (g)), tandis que pour la courbe (e) SKRISQ a sous-estimé les amplitudes qui sont inférieurs à 0.2s et a surestimé celles qui appartiennent aux moyennes et hautes périodes.

VI.3. Exploitation des deux modèles neuronaux

VI.3.1. Séisme de Chenoua 1989

Le 29 octobre 1989 à 20h09mn et 24s, la région du Mont Chenoua (Tipaza) située à 60Km à l'ouest d'Alger, a été le siège d'un violent séisme de magnitude 6 d'après le CRAAG (Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique). L'épicentre du choc principal se situe, toujours d'après le CRAAG, aux coordonnées géographiques suivantes : Latitude :36° 26' N et Longitude : 2° 33' E. Le foyer se trouve à environ 10Km de profondeur, le séisme est donc superficiel.

Le bilan officiel des victimes s'élève à 35 morts, plus de 700 blessés, environ 50000 sinistrés et quelques 8000 constructions, dont 500 relevant du domaine public, ont été endommagées (Séisme de Chenoua rapport final,1995).

Les Sept stations en champ libre entourant la région épiscopentrale ont enregistré la secousse principale (figure VI.13). Seul trois enregistrements assez significatifs, au vu de leur durée et amplitude, ont été analysés. Il s'agit des enregistrements des stations d'Alger (Bouzareah), Cherchell et de Médéa (Tableau VI.7). Les quatre autres n'ont montré qu'un déclenchement de l'appareil.

Donc, seulement les deux sites de Cherchell et Médéa sont considérés. Cependant, la nature des sites est la seule donnée disponible. Pour palier ce problème, la méthode H/V citée dans le chapitre.II est utilisé pour obtenir les deux fréquences caractéristiques des deux sites Cherchell et Médéa. De ce fait, l'épaisseur des deux profils est supposée égale à 30m. Cette supposition permet de déterminer V_{s30} en utilisant la formule $V_{s30}=4 \times H \times F_0$, à condition que $V_{s30} \geq 100\text{m/s}$ (selon la classification de RPA99 Tableau 3.2), si ce n'est pas le cas, des corrections doivent être apportées à l'épaisseur du profil H.

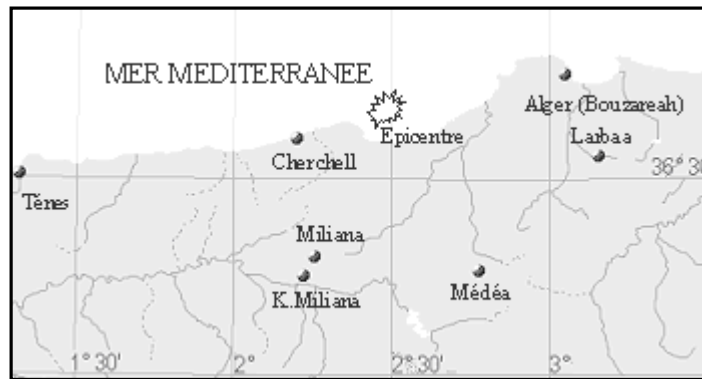


Figure.VI. 13. Accélérographes entourant la région épiscoptrale

| Station | Latitude. | Longitude. | Élévation (m) | Distance Epicentrale (km) | PGA (g) | | | Durée (s) | Condition du site |
|-----------|-----------|------------|---------------|---------------------------|---------|--------|--------|-----------|-------------------|
| | | | | | NS | EW | V | | |
| Bouzareah | 36.83 | 3 | 332 | 50 | -0.036 | -0.034 | -0.021 | 20.1 | Roche (D4) |
| Chechell | 36.607 | 2.196 | ? | 29 | 0.283 | 0.226 | 0.132 | 23.98 | Sol meuble (B2) |
| Médéa | 36.303 | 2.731 | 1105 | 59 | 0.043 | -0.04 | -0.03 | 21.98 | Alluvion (A1) |

Tableau.VI. 7. caractéristiques et enregistrements des trois stations (Internet Site for European Strong-Motion)

La figure.VI.14 représente le rapport H/V calculé à partir des deux enregistrements horizontaux (NS et EW) et vertical (V) enregistrés à la station de Cherchell. La fréquence correspondante au premier pic de résonance est la fréquence caractéristique du site.

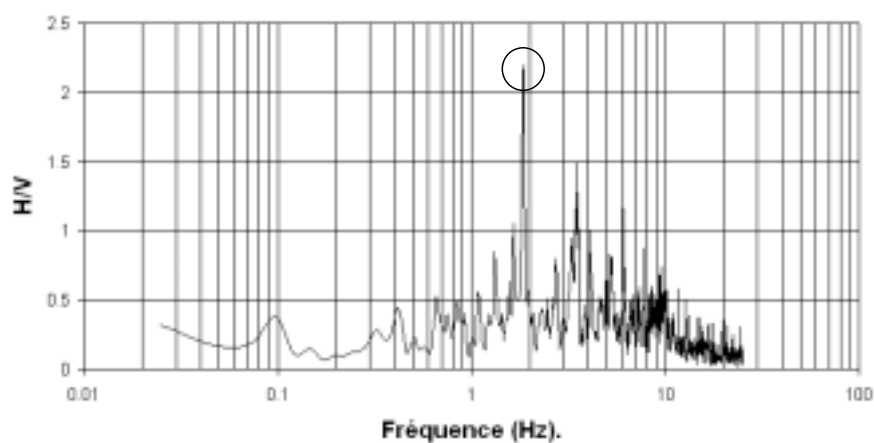


Figure.VI. 14. Rapports spectraux calculés par la méthode H/V station de Cherchell.

A cet égard, il faut rappeler que les événements d'entrées utilisés dans l'apprentissage du modèle neuronal sont supposés enregistrés sur un affleurement rocheux à condition que l'affleurement et le site en question ne soient pas trop éloignés, c'est à dire que la distance site/référence soit très faible devant la distance site/source éq.VI.3.1.1 (Borcherdt et Gibbs, 1976).

$$\text{Distance}_{(\text{site/référence})} \ll \text{Distance}_{(\text{site/source})} \quad \text{VI.3.1.1}$$

Dans le présent cas, La distance entre le site de Cherchell et celui de Bouzareah (site de référence) est égale à 92.6 km tandis que la distance Cherchell/source est de 30.67km. En plus, la distance entre le site de Médéa et Bouzareah est égale à 65.6km et celle de Médéa/source est de 59.84km. Donc, le site de Bouzareah ne peut pas être considéré comme un site de référence des deux sites Médéa et Cherchell.

Pour résoudre ce problème, une loi d'atténuation pour les sols rocheux est utilisée. La loi établie par Ambraseys (adapté à l'Algérie par Benouar) a été choisie (Benouar.D,1998). Cette loi est définie comme suite :

$$\text{Log}_{10}(\text{PGA}) = -1.43 + 0.2455 \times (M_s) - 0.0010 \times (r) - 0.786 \log_{10} \times (r) \quad \text{VI.3.1.2}$$

Avec M_s : magnitude de surface.

r : Distant hypocentrale (Km) $r^2 = d^2 + h^2$

d : Distance épacentrale (Km)

h : Profondeur focale (Km)

L'application de cette loi d'atténuation sur le site de Bouzareah a donné un PGA identique au celui enregistré. Les PGA de références obtenus par cette loi, ainsi que les facteurs d'amplification spectrale et les niveaux de risque sont illustrés sur le tableau VI.8

| Station | PGA (g) de référence éq.VI.3.1.2 | F ₀ (Hz) | H (m) | V _{s30} (m/s) | SRISQ | | |
|-----------|---|------------------------|----------|---------------------------|----------------|----------------|---------------------|
| | | | | | S ₁ | S ₂ | Niveau de risque |
| Cherchell | 0.058 | 1.86 | 30 | 223.2 | 2.3 | 1.6 | Moyen risque |
| Médéa | 0.03 | 0.48 | 52 | 100 | 2.7 | 3.5 | Haut risque |

Tableau.VI. 8. Résultats obtenus par SRISQ

Pour avoir les deux spectres de réponse d'accélération de référence des deux sites Cherchell et Médéa, la loi empirique de Lussou (2001) est utilisée:

$$\text{Log}(\text{PSA}(f)) = a(f) \times M + b(f) \times R - \log_{10}(R) + C(i, f) \quad \text{VI.3.1.3}$$

Avec : PSA : Accélération spectrale maximale (cm/s²) pour un amortissement égal à 5%

f : Fréquence (Hz)

M : magnitude, domaine d'application : $3.5 \leq M \leq 6.3$

R : distance hypocentrale, domaine d'application : $10 \leq R \leq 200 \text{Km}$

$A(f)$ et $b(f)$: Coefficients dépendent de la fréquence.

$C(i,f)$: Coefficient qui dépend de la fréquence et du type de sol.

Pour établir cette loi, Lussou a utilisé les données du réseau K-NET avec 643 enregistrements enregistrés sur 142 sites rocheux.

Cette loi a été testée avec le site rocheux de Bouzareah. Le spectre de réponse enregistré sur la station et celui obtenu par la loi empirique sont représentés sur la figure.VI.15.

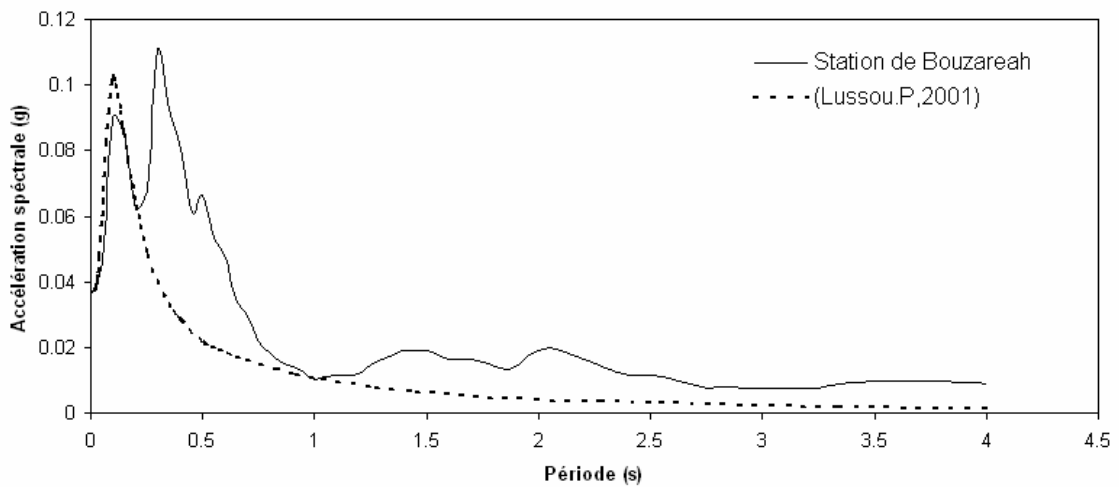


Figure.VI. 15. Comparaison entre le spectre de réponse enregistré et estimé par la loi empirique

Par la suite, cette loi est utilisée pour générer les spectres de réponses de références des deux sites Cherchell et Médéa. Les deux accélérations spectrales obtenues par la loi empirique sont injectées dans le SKRISQ. Il en résulte la figure VI.16 qui représente les spectres de réponses trouvés par SKRISQ et ceux réellement enregistrés sur les deux stations.

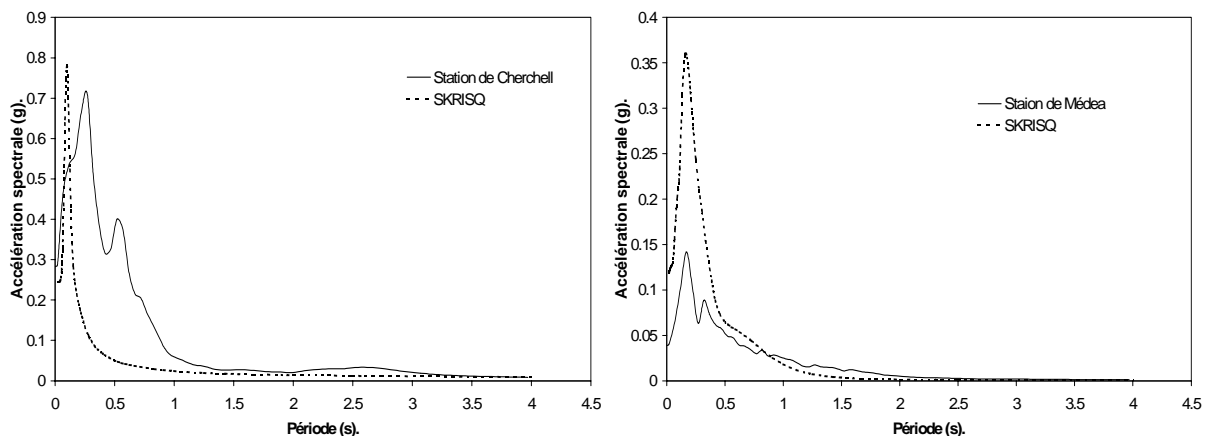


Figure.VI.16. Spectres de réponses des deux stations Cherchell et Médéa et ceux obtenus par SKRISQ

| Station | Nature des sites | SKRISQ | | |
|-----------|------------------|----------------|----------------|------------------|
| | | S ₁ | S ₂ | Niveau de risque |
| Cherchell | meuble | 2.6 | 1.3 | Moyen risque |
| Médéa | Très meuble | 3.87 | 2.52 | Haut risque |

Tableau.VI. 9.Résultats obtenus par SKRISQ

La comparaison entre les deux accélérations spectrales obtenues par SKRISQ et enregistrées sur les deux sites est la suivante:

1. Pour le site de Cherchell, la valeur maximale spectrale est proche de celle enregistrée par la station, avec une déviation vers les faibles périodes. Cependant, les valeurs des accélérations sont sous-estimées.
2. Ce qui concerne, le site de Médéa, les deux courbes sont totalement différentes. La tolérance existe soit dans la loi empirique soit dans le SKRISQ ou dans les deux.

Par ailleurs, les niveaux de risques des deux sites estimés par SRISQ et SKRISQ sont les mêmes (Tableaux.V.8 et V.9), tandis que la comparaison avec le cas réel est impossible (manque des données).

VI.3.2. Séisme du Boumerdès 2003

Le 21 mai 2003 à 19h44:40 une secousse tellurique ébranle les régions d'Alger et de Boumerdès, plus précisément en mer, à 7 Km au nord de Zemmouri (36.91°N.3.58°E) et 60 km d'Alger, sa magnitude est de 6.8 (USGS) et la durée de la secousse est de 18s, avec un foyer situé à environ 10 Km de profondeur, ce séisme superficiel a donc affecté une large zone dans une direction s'étendant de Dellys à Alger.



Figure.VI. 17. Localisation du séisme de Boumerdès (Yelles-Chaouche.A.K, et al 2003)

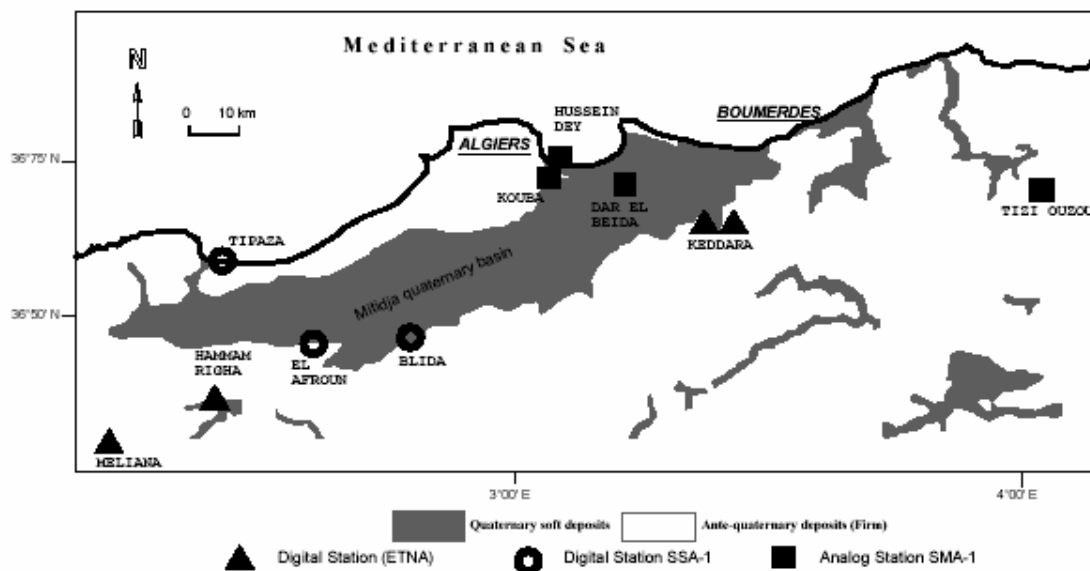


Figure.VI. 18. Carte de distribution de dépôts quaternaires dans la région d'Alger-Boumerdès et la localisation des stations d'enregistrement (Laouami.N et al, 2003).

Ce séisme a entraîné la mort de milliers de personnes (2276) et causé des dégâts extrêmement importants estimés à 5 milliards de \$. Dans les autres Wilayas (Alger, Tizi Ouzou) les dégâts ont été moindres mais néanmoins importants. Par exemple à Alger des milliers d'immeubles ont été touchés. Bordj Ménéaiel dans la Wilaya de Tizi Ouzou a compté de nombreux morts et des centaines de blessés (Yelles-Chaouche.A.K, et al 2003).

Le séisme a été senti jusqu'à 250 Km de l'épicentre où l'accélération enregistrée a atteint 0.02g. Les stations les plus proches qui ont enregistré le choc principal se trouvent à 20 Km de l'épicentre (Keddara 1 et 2) la distance entre les deux est de 150m. La différence importante observée entre Keddara 1 et 2 surtout dans la direction E-O (Tableau VI.10) peut

expliquer la présence d'un effet de site au niveau de la station 2. En outre, et parce qu'elles sont localisées sur la plaine de Mitidja classée comme sol meuble (Figure VI.18), les stations de Dar El beida et d'El Afroun présentent des amplifications importantes qui expliquent les accélérations élevées enregistrées. L'analyse des signaux enregistrés en champ proche (Keddara) fait ressortir un contenu fréquentiel riche en haute fréquence avec une fréquence centrale autour de 4 Hz pour la station 1. Une application rapide de la méthode H/V fait ressortir un type de sol rocheux (C.G.S, 2003).

La figure VI.19 représente les rapports spectraux (H/V) des quatre stations cités ci-dessus.

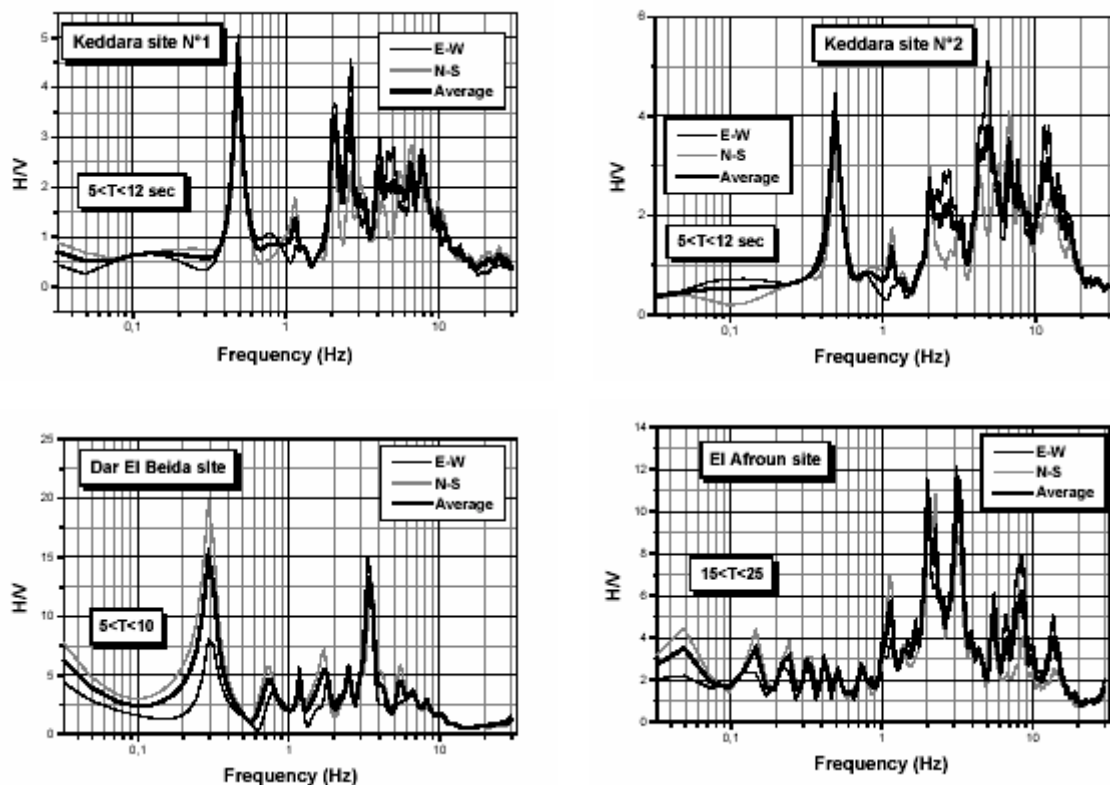


Figure.VI. 19. Rapports spectraux calculés par la méthode H/V (Laouami.N et al,2003)

Juste après le choc principal, une station numérique a été installée au niveau de Boumerdès, à 7 Km de l'épicentre déterminé par le CGS. Il est important de noter que une grande réplique a secoué la région une semaine après le choc principal elle est d'une magnitude de 5.8 d'après le CRAAG, les PGA des trois composantes enregistrées sont mentionnées sur le tableau VI.10.

Il en ressort une composante verticale extrêmement importante et largement supérieure aux composantes horizontales. Cette dernière observation peut être expliquée par le fait que la

station se trouve en champ proche où il est admis qu'à ce niveau la verticale peut être supérieure aux autres.

Cependant l'analyse par la méthode H/V fait ressortir une fréquence fondamentale autour de 0.7 Hz, ce qui dénote l'existence probable d'une couche alluvionnaire qui a cette fréquence (Laouami.N et al, 2003).

| Station | Distance Epicentrale (km) | PGA (g) | | | Fo(Hz) | H(m) | V _{s30} (m/s) | Condition du site |
|-----------------------------------|---------------------------|---------|------|------|--------|-------|------------------------|------------------------|
| | | E-O | V | N-S | | | | |
| Boumerès Réplique : 27/05/2003 | 7 | 0.29 | 0.4 | 0.13 | 0.7 | 35.71 | 100 | Alluvien (A1) |
| Keddara (2) Choc principal | 20 | 0.58 | 0.22 | 0.35 | 0.5 | 20 | 100 | Remblai (A1) |
| Dar El Beida Choc principal | 29 | 0.52 | 0.16 | 0.46 | 0.3 | 83.33 | 100 | Dépôt quaternaire (A1) |
| El Afroun Choc principal | 86 | 0.16 | 0.03 | 0.09 | 1.2 | 30 | 144 | Dépôt quaternaire (A1) |

Tableau.VI. 10.Caractéristiques des sites et les PGA enregistrés sur les quatre stations

Dans le but d'estimer le risque lié à l'effet de site par le SRISQ pour les quatre stations : Boumerdès, Keddara 2, Dar El Beida et d'El Afroun; Kaddara (1) est considéré comme un site de référence de Keddara (2). Cependant, pour les autres sites la loi d'atténuation présentée auparavant (Benouar.D,1998) est utilisée pour calculer les PGA de références des autres sites. Là aussi H est supposée égale à 30m. Cette supposition permet de déterminer V_{s30} en utilisant la formule $V_{s30}=4 \times H \times F_0$, à condition que $V_{s30} \geq 100$ m/s (selon la classification de RPA99 Tableau 3.2), si ce n'est pas le cas, des corrections doivent être apportées à l'épaisseur du profil H.

Les PGA de références calculés ainsi que les niveaux de risque estimés par SRISQ sont présentés sur le tableauVI.11.

| Station | PGA de référence (Benouar.D,1998) | S ₁ | S ₂ | Niveau de risque |
|----------------------|-----------------------------------|----------------|----------------|------------------|
| Boumerdès (réplique) | 0.133 | 1.3 | 3 | Moyen risque |
| Keddara (2) | 0.340 (Keddara (1)) | 2.1 | 3.2 | Haut risque |
| Dar El Beida | 0.1 | 3.2 | 3.1 | Haut risque |
| El Afroun | 0.042 | 2.3 | 3.9 | Haut risque |

Tableau.VI. 11. S₁, S₂ et les niveaux de risques par SRISQ

Le spectre de réponse réglementaire en accélération de la catégorie S1 (site rocheux) pour un amortissement critique 5% (RPA99, version 2003) est utilisé comme l'input de SKRISQ. Le coefficient de zone « A » a été remplacé par les PGA de références calculés à partir de la loi d'atténuation de Benouar

La figure.VI.20 représente les spectres de réponses en accélération obtenus par SKRISQ:

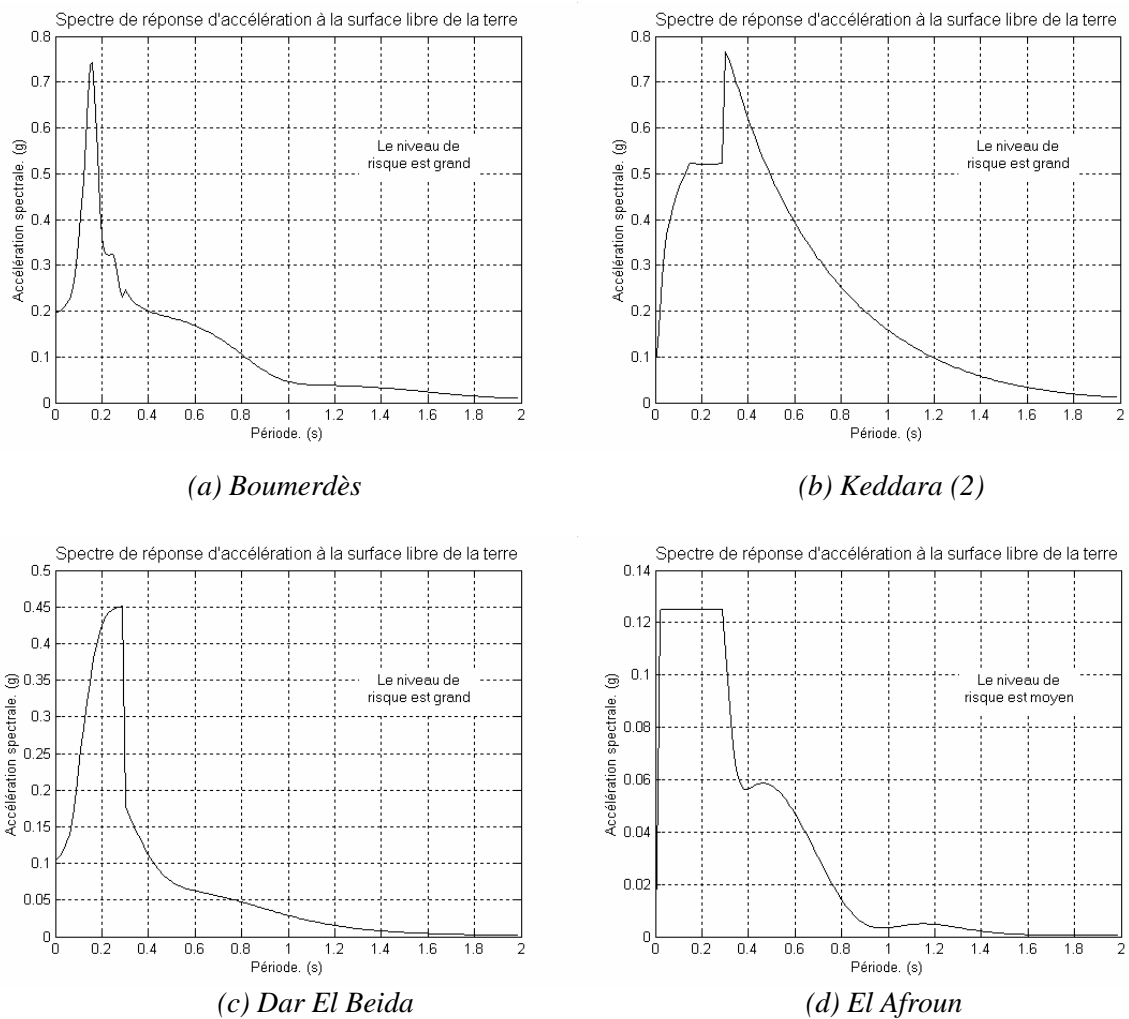


Figure.VI. 20.Spectres de réponse d'accélération estimés par SKRISQ

| Station | PGA de référence (Benouar.D,1998) | Type de sol | S ₁ | S ₂ | Niveau de risque |
|----------------------|-----------------------------------|-------------|----------------|----------------|------------------|
| Boumerdès (réplique) | 0.133 | Très meuble | 4.5 | 2.5 | Haut risque |
| Keddara (2) | 0.340 (Keddara (1)) | Très meuble | 3.1 | 3.4 | Haut risque |
| Dar El Beida | 0.1 | Très meuble | 4.6 | 2.1 | Haut risque |
| El Afroun | 0.042 | Très meuble | 4.7 | 0.6 | Moyen risque |

Tableau.VI. 12. S₁, S₂ et les niveaux de risques par SKRISQ

Remarquant à partir du tableau VI.11 et VI.12 que les niveaux de risques trouvés par SRISQ et obtenus par SKRISQ sont les mêmes pour les deux sites Keddara (2) et Dar El Beida. En revanche, le SRISQ qui dépend du modèle linéaire équivalent, a donné un niveau de risque moyen pour le site de Boumerdès (champ proche). Cependant, il a estimé le risque comme étant grand pour le site d'El Afroun (champ lointain).

Par ailleurs, le SKRISQ qui est basé sur des événements réels a donné un grand niveau de risque pour le site de Boumerdès, ce qui est logique vu le PGA enregistré qui est égal à 29 % de g pour la composante horizontale. Or un niveau de risque moyen est estimé pour le site El Afroun dont le PGA égal à 0.1g.

Vu le manque concernant les données d'accélérographes au niveau de chaque station, la validation des spectres de réponses en accélération obtenus par SKRISQ ainsi que les niveaux de risques calculés par SRISQ et SKRISQ ne peut être effectuée.

VI.4. Conclusion

Ce chapitre a été très utile de fait qu'il a confirmé les résultats et les remarques trouvées dans les chapitres précédents. Les quatre exemples considérés ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- SRISQ est bien placé pour estimer le niveau de risque sous des sollicitations faibles à modérées induisant un comportement linéaire des sols en place. En revanche, il sous-estime le niveau de risque sous des sollicitations fortes. Cette sous-estimation est due au modèle linéaire équivalent adopté dans la phase d'apprentissage des réseaux de neurones artificiels élaborés.

- Du point de vue engineering, SKRISQ donne des approximations intéressantes pour les courbes spectrales d'accélération générées à la surface libre. Seulement, il ne peut pas être utilisé dans les calculs des structures. Ceci est dû à sa base de données limitée. Par contre, il estime bien le niveau de risque lié à l'effet de site que se soit pour des mouvements faibles, modérés ou forts.

CHAPITRE VII :

CONCLUSION GENERALE

La prise en compte des effets locaux de site est impérative lors de la conception parasismique des structures. Les observations post-séisme, les études expérimentales, théoriques et numériques ont tout montré la nécessité de les prendre en compte dans les études du risque sismique.

Ce travail s'est axé sur l'étude de l'effet de site et plus particulièrement sur le risque lié à l'amplification sismique entre la surface libre de la terre et le site de référence.

Pour cela, une méthode basée sur la théorie des réseaux de neurones est proposée dans cette étude dans le but d'estimer le risque lié à l'effet de site. La quantification du risque est mesurée par le facteur d'amplification spectrale en accélération entre la surface et le rocher.

Dans ce contexte, deux modèles neuronaux sont élaborés pour estimer le risque. Le premier nommé « SRISQ » est basé dans sa phase apprentissage sur les réponses spectrales générées par le modèle linéaire équivalent en utilisant des profils de sol naturels. Dans le deuxième, le modèle linéaire équivalent est avantageusement remplacé par des accélérations spectrales réelles et est appelé ainsi « SKRISQ » [calculées à partir des accélérogrammes enregistrés par le dense réseau d'accélérographes KIK-NET (Japon) en surface et en profondeur], il est proposé pour la génération artificielle d'un spectre de réponse d'accélération à la surface libre à partir de celui enregistré en profondeur et d'estimer le risque induit par l'amplification sismique.

Les résultats de cette étude, ont indiqué les points suivants :

- ✓ La présence de l'amortissement effectif dans le modèle viscoélastique et linéaire équivalent influe sur l'amplification sismique en l'atténuant et que Le modèle linéaire équivalent est bien adapté pour traiter des problèmes de propagation des ondes. En revanche, il porte bien son nom de " linéaire-équivalent " car il n'est sensible ni au contenu fréquentiel ni à la durée du mouvement d'entrée. Seule l'amplitude du mouvement d'entrée influe de manière significative sur la réponse du modèle.
- ✓ La vitesse de cisaillement moyenne sur trente mètres de profondeur V_{s30} est un paramètre qui représente un meilleur niveau de confiance vis-à-vis de la classification du site lorsqu'il s'agit d'une structure peu profonde. En revanche, une structure géologique plus profonde telle que les bassins sédimentaires peut avoir une forte

influence sur les effets de site qui ne sont pas pris en considération si une classification simple de site est basée uniquement sur des mesures dans les couches supérieures. Pour surmonter cette gêne, la classification est ajustée par la fréquence caractéristique de site. Cet ajustement se traduit par un meilleur niveau de confiance qu'atteints les classifications V_{S30} et F_0 .

- ✓ SRISQ est bien placé pour estimer le niveau de risque sous des sollicitations faibles à modérées qui induisent un comportement linéaire des sols en place. En revanche, le SRISQ semble sous-estimé le niveau de risque sous un fort mouvement. Ce résultat est dû au moyen d'apprentissage adopté qui est le modèle linéaire équivalent.
- ✓ Du point de vue engineering, SKRISQ peut donner des approximations intéressantes pour les courbes spectrales d'accélération générées à la surface libre. Néanmoins, il ne peut pas être utilisé dans les calculs des structures, ceci est dû à sa base de données limitée. Par contre, il estime bien le niveau de risque lié à l'effet de site que se soit pour des mouvements faibles, modérés ou forts.

Il serait tout à fait intéressant d'augmenter les performances des différents réseaux de neurones développés dans cette étude, en s'étendant sur plusieurs aspects, en l'occurrence :

- ✓ Augmenter le nombre de spectres de réponses et le nombre de profils de sols utilisés dans la phase d'apprentissage.
- ✓ Classifications des réseaux de neurones suivant la durée de l'excitation sismique, la distance épiscopale et la magnitude.
- ✓ Générer des accélérogrammes à la surface libre de la terre à partir de ceux enregistrés en profondeur par les réseaux de neurones de type perceptron multicouche dépendant du temps (TDNN).

Enfin, il est recommandé d'étudier l'effet de site 2-D sur les vallées alluvionnaires par la méthode de réseau de neurones artificiels et d'estimer le risque lié à l'amplification sismique.

Références bibliographiques

- [1] Abdi, H. (1994). "Réseaux de neurones". Presse universitaire de Grenoble, France, 1994.
- [2] Andrews, DJ. (1986). "Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size". Earthquake source mechanics. Washington DC: American Geophysical Union, 1986. p. 259±68.
- [3] Bardet, J. P., Ichii, K., & Lin, C.H. (2000). "EERA : A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits". University of southern California. Department of Civil Engineering.
- [4] Bardet, J.P., & Tobita, T. (2001) "NERA : A Computer Program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits". University of southern California. Department of Civil Engineering.
- [5] Bard, P.Y., Dunand, F., Gueguen, P.H., Chatelain, J.L., Guillaud, B., & Vassail, T. (2003). "Caractérisation du comportement dynamique des sols et des structures par mesure de vibration ambiante : développement récent et questions en suspens". Colloque International, Alger, Algérie.
- [6] Bard, P.-Y., & Thomas, J.R. (2000). "Wave propagation in complex geological structures and their effects on strong ground motion". Wave propagation in earthquake engineering. WIT Press Great Britain, SO40 7AA, UK.
- [7] Benouar, D., Gilbert, L.M., & Yamazaki, F. (1998). "Mapping seismic hazard in the Maghreb countries : Algeria, Morocco, Tunisia". 11th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 982 3.
- [8] Bonilla, L.F., Cotton, F., & Archuleta, R.J. (2003). "Quelques renseignements sur les effets de site non-linéaires en utilisant des données de forage : la base de mouvements forts Kik-net au Japon". 6^{ème} colloque national AFPS juillet 2003, Paris, France.
- [9] Bonilla, L. F., Steidl, J. H., Lindley, G. T., Tumarkin, A.G., & Archuleta, R. J. (1997). "Site Amplification in San Fernando Valley, California: Variability of Site Effect Estimation Using the S-wave, Coda, and H/V Methods". Bulletin of the Seismological Society of America, 87, 710-730.
- [10] Borchardt, R.D. (1970). "Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay". Bulletin of the Seismological Society of America;60:29±61.
- [11] Borchardt, R.D., Wentworth, C.M., Janssen, A., Fumal T., & Gibbs, J.F. (1991). "Methodology for predictive GIS mapping of special study zones for strong ground shaking in the San Francisco bay region". Proceedings of the Fourth International Conference on seismic Zonation, August 25-29, Stanford, California, E.E.R.I (editor), Oakland Ca, III, 545-552.

- [12] C.G.S. (2003). “Résultats préliminaires sur la caractérisation du séisme de Boumédès du 21 mai 2003 (choc principal)”. Centre nationale de recherche appliquée en génie parasismique (CGS), Département d’aléa sismique. www.gecotec-dz.com.
- [13] Chopra, A. K. (1995). “Dynamics of Structures”. Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall.
- [14] Clough, R.W. & Penzien, J. (1980). “Dynamics of Structures, Tome 1: Principe fondamentaux”. Pluralis, traduit de “Dynamics of structure”, Mc Graw-Hill Book Company, Inc., New York..
- [15] Das, M. (1983). “Principles of soil dynamic”. PWS-KENT. Publishing Company Boston, USA.
- [16] Demuth, H., Beale, B. (2000). “Neural Network Toolbox User’s Guide Version 4 For Use with MATLAB”, The MathWorks, Inc.
- [17] DTR B C 2 48. (2003). “Règles parasismiques algériennes- R.P.A.99 version 2003”. document technique réglementaire, centre national de recherche appliquée en génie parasismique, Ministère de l’habitat, Algérie.
- [18] 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; 85:1127±43.
- [19] Field, E.H. (2001). “Earthquake Ground-Motion Amplification in Southern California”. (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>).
- [20] Filiatrault, A. (1991). “Génie séismique CIV6510 Tome 1”. Département de génie civil école polytechnique de Montréal. Première édition tome I.
- [21] Gelebi, M. (1988). “Topographical and geological amplification : Case studies and engineering implications”. International Workshop on Spatial Variation of earthquake Ground Motion, USA.
- [22] Hartzell, S.H. (1992). “Site response estimation from earthquake data”. Bulletin of the Seismological Society of America 1992;82:2308±27.
- [23] Hurtado, J.E., Londono, J.M., & Meza, M.A. (2001). “On the applicability of neural networks for soil dynamic amplification analysis”. Soil dynamics and earthquake engineering 21, 579-591.
- [24] Idriss, I.M., & Abrahamson, N.A. (2000). “Geotechnical aspects of the earthquake ground motion recorded during the 1999 CHI-CHI earthquake”. International Workshop on the Annual Commemoration of the Chi-Chi Earthquake September 18-20, 2000 Taipei, Taiwan.
- [25] James, A.F., & David, M.S. (1992). “Neural networks Algorithms, Applications, And Programming Techniques”. Addison-Wesley Publishing Company, USA.

- [26] Joyner, W.B., & Fumal, T. (1984). "use of measured shear wave-velocity for predicting site effect on strong motion". Proceeding of the Eighth World Conference on earthquake Engineering, San Francisco, 2, 777-783.
- [27] Kashima, T. (2002) "ViewWave Help". IISEE, BRI. <http://iisee.kenken.go.jp>.
- [28] Klimis, N.S., Margaris, B.N., & Koliopoulos, P.K. (1998). "Response spectra estimation according to the EC8 and NEHRP soil classification provisions: a comparison study based on Hellenic data". 11th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 982 3.
- [29] Kramer, S.L. (1996). "Geotechnical Earthquake Engineering". Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 653 pp.
- [30] Lam, N., Wilson, Y., & Hutchinson, G. (2000). "Generation of synthetic earthquake accelerograms using seismological modelling : a review". Journal of Earthquake Engineering, Vol. 4, No. 3 321-354.
- [31] Laouami, N., Slimani, A., Bouhadad, Y., Nour, A., & Larbes, S. (2003). "Caractérisation du séisme de boumerdès -analyse des enregistrements obtenus lors du choc principal du 21 mai 2003". Colloque International, Alger, Algérie.
- [32] Laouami, N., Slimani, A., Bouhadad, Y., Nour, A., & Larbes, S. (2003) "Analysis of Strong Ground Motions Recorded during the 21st May, 2003 Boumerdes, Algeria, Earthquake". CSEM / EMSC News letter.
- [33] Laouami, N. (1998). "Éléments de compression des effets de site amplification du mouvement sismique par une couche de sol". Séminaire sur : Construction parasismique urbanisme, architecture et aménagement en zone sismique, centre national de recherche appliquée en génie-parasismique, C.G.S.
- [34] Lapreste, J.T. (1999). "Introduction matlab". ELLIPSE Edition Marketing S.A.
- [35] Lussou, P. (2001). "Calcul du mouvement sismique associé à un séisme de référence pour un site donné avec prise en compte de l'effet de site. Méthode empirique linéaire et modélisation de l'effet de site non-linéaire". Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier – Grenoble-
- [36] Marzorati, S., Luzi, L., Petrini V., Meroni, F. & Pergalani, F. (2003). "Detection of local site effects through the estimation of building damages". Soil Dynamics and Earthquake Engineering 23, 497-511.
- [37] Midorikawa, S., (1987). "Prediction of isoseismical map in the kanto plain due to hypothetical earthquake". Journal of structural engineering, 33B, 43-48.
- [38] Nakamura, Y. (1989). "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface". Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, 30, N°1, pp. 25-33.
- [39] Olivier, B.F., (2000). "L'effet de site". <http://www.mssmat.ecp.fr>.

- [40] Paolucci, R., Colli, P., & Giacinto G. (2000). "Assessment of seismic site effect in 2-D alluvial Valleys Using Neural Networks". Earthquake Spectra, Volum 16, No.3.
- [41] Pecker, A. (1984). "Dynamique des sols". Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.
- [42] Pitilakis, K.D., Raptakis, D.G., & Makra, K.A. (1997). "Site effects: recent considerations and design provisions". Earthquake Geotechnical Engineering Portugal.
- [43] Rahmoun, Z. (2002). "Nouvelle approche de génération d'accélérogramme artificiel compatible avec un spectre de réponse en utilisant les réseaux de neurones". Mémoire de magister, université Abou-Bekr-Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- [44] Rapport final. (1995). "Séisme de CHENOUA du 29 octobre 1989 ". Centre national de recherche appliquée en génie parasismique, Ministère de l'habitat, Alger, Algérie.
- [45] Riepl, J., Gariel, J., & Bard, P. (1998). "About the Coda wave signals to estimate local site amplification factors". second international symposium on the effects of surface geology on seismic motion, Yokohama, Japan, 523-530.
- [46] Şafak, E. (2001). "Local site effects and dynamic soil behavior". Soil Dynamics and Earthquake Engineering 21 (2001) 453±458.
- [47] Saragoni, G.R., Lobos, C., & Gómez-Bernal, A. (1998). "Site and Earthquake Mechanism Effect on Design Response Spectra". 11th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 982 3.
- [48] Schnabel, P.B., Lysmer, J., & Seed, H.B. (1972). "SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites". Report No. EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- [49] Shinozuka, M. (1987). "Stochastic fields and their digital simulation". Stochastic methods in structural dynamics, Dordrecht: Martinus Nijhoff.
- [50] Stewart, J. (1997). "Key Geotechnical Aspects of the 1989 Loma Prieta Earthquake". National Information Service for Earthquake Engineering : University of California, Berkeley. <http://nisee.berkeley.edu/>.
- [51] Theodulidis, N., Bard, P.Y., Archuleta, R.J. & Bouchon, M. (1996). "Horizontal to vertical spectra ratio and geological conditions: the case of Garner valley downhole array in southern California". Bull. Seism. Soc. Am., 86, pp. 306-319.
- [52] Touzet, C. (1992). "Les réseaux de neurones artificiels, introduction au connexionisme cours, exercice et travaux pratiques". <http://saturn.epm.ornl.gov>.
- [53] Trifunac, M.D., & Todorovska, M.I. (1998). "Nonlinear soil response as a natural passive isolation mechanism - the 1994 Northridge California earthquake." Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 17, 41-51.

- [54] Vrettos, C. (2000). "Wave in vertically inhomogeneous soils". Wave motion in earthquake engineering, advances in earthquake engineering. Published by WIT Press Ashurst Lodg, Ashurst, Southampton, SO40 7AA,UK.
- [55] Yelles-Chaouche, A.K., & Djellit, H.(2003). "Le séisme de Boumerdès (21 MAI 2003, Mw:6.8)". Colloque International, Alger, Algérie.
- [56] Yezli-Khati, F., & Afra, H. (2003). "Réponse sismique d'un profil de sol a une onde de cisaillement SH". Séminaire international de géomatériaux.

Sites WEB

Réseaux de neurones

- [57] <http://www.cict.fr/cict/personnel/stpierre/reseaux-neuronaux/node1.html>.
- [58] <http://www.grappa.univ-lille3.fr/polys/apprentissage/sortie005.html>
- [59] <http://www.neurones.espci.fr/>
- [60] <http://saturn.epm.ornl.gov/~touzetc/book/boutiquin.htm>.
- [61] <http://ymore.re.multimania.com/neurones.html>.

Réseaux d'accélérographes

- [62] Centre weather bureau (Taiwan) : <http://www.cwb.gov.tw/index-f.htm>
- [63] COSMOS virtual data centre (USA) : <http://db.cosmos-eq.org/>
- [64] Digital Strong-Motion Seismograph Network KiK-net (Japon) : www.kik.bosai.go.jp/kik
- [65] Kyoshin Network K-NET (Japon) : <http://www.k.bosai.go.jp/kik/>
- [66] PEER Strong Motion Database (USA) : <http://peer.berkeley.edu/smcat>
- [67] The European data base strong motion data base (Europe): <http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/>

Les logiciels utilisés

- Matlab R12 (ver. 6.0) : <http://www.mathworks.com/>
- EERA (ver 2000) : <http://geoinfo.usc.edu/gees>
- ViewWave (ver. 1.3) : <http://iisee.kenken.go.jp/staff/kashima/viewwave/>
- SeismoSignal (ver. 2.0) : www.seismosoft.com
- Surfer (ver. 6.01 et ver. 8.0) : www.goldensoftware.com

ANNEXES

| | | |
|----------|--|-----|
| 1 | Annexe 1 : Notions générales sur les réseaux de neurones artificiels | 114 |
| 1.1. | Introduction | 114 |
| 1.2. | Historique | 114 |
| 1.3. | Modèle biologique | 115 |
| 1.4. | Neurone formel | 116 |
| 1.5. | Les réseaux de neurones formels | 117 |
| 1.5.1. | Les topologies | 117 |
| 1.5.2. | Fonctions d'activation..... | 119 |
| 1.5.3. | Types d'apprentissages | 120 |
| 1.5.3.1. | Les méthodes d'apprentissage | 120 |
| 1.6. | Quelques réseaux célèbres | 121 |
| 1.6.1. | Perceptron | 121 |
| 1.6.1.1. | Description | 121 |
| 1.6.1.2. | Limites..... | 122 |
| 1.6.2. | Hopfield..... | 122 |
| 1.6.3. | Kohonen | 123 |
| 1.6.4. | Le Perceptron MultiCouche (PMC) | 123 |
| 1.7. | Mise en œuvre des réseaux neuronaux..... | 124 |
| 1.8. | Domaine d'application des réseaux de neurones | 125 |
| 1.9. | Limites des réseaux de neurones..... | 126 |
| 1.10. | Avantages des réseaux de neurones | 126 |
| 2 | Annexe 2 : Description générale de EERA | 128 |
| 2.1. | Introduction | 128 |
| 2.2. | Description de EERA | 128 |
| 2.3. | Comparaison entre EERA et SHAKE91 | 129 |
| 3 | Annexe 3 : Denses réseaux d'accélérographes à haute technicité | 131 |
| 3.1 | Introduction | 131 |
| 3.2. | Le réseau japonais K-NET | 131 |
| 3.3. | Le réseau japonais KiK-NET | 134 |
| 4 | Annexe 4 : présentation de quelque classifications de sites | 135 |
| 5 | Annexe 5 : Aperçu sur les deux codes de calcul SRISQ et SKRISQ | 137 |
| 5.1. | Description de SRISQ | 137 |
| 5.2. | Description de SKRISQ | 137 |

1 ANNEXE 1

NOTIONS GENERALES SUR LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

1.1. Introduction

Lors de l'émergence d'une nouvelle technique, l'ingénieur se demande naturellement en quoi elle peut lui être utile. Si elle est dotée d'un nom plus métaphorique que scientifique – ce qui est évidemment le cas pour les réseaux de neurones –, la réponse à cette question doit être particulièrement précise et motivée. C'est la raison pour laquelle cette annexe est consacrée à un exposé des arguments théoriques et pratiques qui justifient l'utilisation des réseaux de neurones.

Les réseaux de neurones artificiels ou réseaux connexionnistes sont fondés sur des modèles qui tentent d'expliquer comment les cellules du cerveau et leurs interconnexions parviennent, d'un point de vue globale, à exécuter des calculs complexes.

Ces systèmes qui stockent et retrouvent l'information de manière "similaire" au cerveau sont particulièrement adaptés aux traitements en parallèle de problèmes complexes comme la reconnaissance automatique de la parole, la reconnaissance de visages ou bien la simulation de fonctions de transfert. Ils offrent donc un nouveau moyen de traitement de l'information utilisé en reconnaissance de formes (vision, image, traitement de signal, classification etc).

Les architectures connexionnistes s'inspirent de l'organisation neuronale du cerveau humain. Dans les réseaux de neurones artificiels de nombreux processeurs appelés cellules ou unités, capables de réaliser des calculs élémentaires, sont structurés en couches successives capables d'échanger des informations au moyen de connexions qui les relient. On dit de ces unités qu'elles miment les neurones biologiques.

1.2. Historique

Citons quelques étapes dans la formalisation des réseaux de neurones :

- Première définition d'un neurone formel par McCulloch et Pitts en 1943
- Les percepts ou concepts sont physiquement représentés dans le cerveau par l'entrée en activité (simultanée) d'une *assemblée* de neurones (Donald Hebb, 1949).

L'hypothèse concurrente est la spécialisation de certains neurones dans des tâches cognitives complexes (cf le fameux neurone « grand-mère »).

- Deux neurones entrant en activité simultanément vont être associés (c'est-à-dire que leur contacts synaptiques vont être renforcés). On parle de *loi de Hebb* et d'*associationnisme*
- Le *perceptron* de Frank Rosenblatt (1958) : le premier modèle pour lequel un processus d'apprentissage a pu être défini. De cette période, date également les travaux de Widrow et Hoff.
- Le livre de Minski et Papert "Perceptrons" (1969). Cet ouvrage contient une étude critique très complète des perceptrons. On lui reproche parfois violemment d'avoir sonné le glas des recherches sur les réseaux neuronaux dans les années 70, ce que nient leurs auteurs.
- l'algorithme de rétropropagation du gradient dans les réseaux multi-couches découvert au début des années 80 par Rumelhart et McClelland, Parker, Hinton, Le Cun. Les « inventeurs » sont nombreux car l'idée de descente de gradient est naturelle. La plupart de ces travaux étaient associés à des études empiriques montrant la puissance du modèle.
- Le modèle de Hopfield (1982) qui utilise des réseaux totalement connectés basés sur la règle de Hebb qui ont permis de définir la notion d'attracteurs et de mémoire associative.
- Les cartes de Kohonen (1984) avec un algorithme non supervisé basé sur l'auto-organisation.
- La machine de Boltzman (1985), autre type de réseaux à attracteurs avec une dynamique de Monte-Carlo.

1.3. Modèle biologique

Le cerveau humain possède deux hémisphères latérales reliées par le corps calleux et d'autres ponts axonaux, il pèse moins de deux kilogrammes et contient mille milliards de cellules, dont 100 milliards sont des neurones constitués en réseaux.

Les **neurones** sont des cellules nerveuses décomposables en 4 parties principales (figure.1.1) .

- Les **dendrites**, sur lesquelles les autres cellules entrent en contact synaptique : c'est par les dendrites que se fait la réception des signaux.

- Le **corps de la cellule**, c'est l'unité de traitement.
- L'**axone**, où passent les messages accumulés dans le corps de la cellule : l'envoi de l'information se fait par l'axone.
- Les **synapses** par lesquelles la cellule communique avec d'autres cellules, ce sont des points de connexion par où passent les signaux de la cellule.

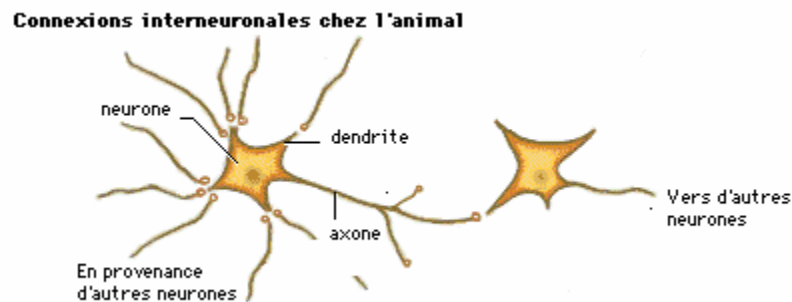


Figure.1.1 : Exemple de réseau de neurones biologiques.

Un neurone stimulé envoie des impulsions électriques ou potentielles d'action, à d'autres neurones. Ces impulsions se propagent le long de l'axone unique de la cellule. Au point de contact entre neurones, les synapses, ces impulsions sont converties en signaux chimiques. Quand l'accumulation des excitations atteint un certain seuil, le neurone engendre un potentiel d'action, pendant une durée de 1ms. Le neurone émettant le signal est appelé neurone pré-synaptique et celui recevant ce signal, neurone post-synaptique .

1.4. Neurone formel

Par définition Un neurone formel est une fonction algébrique non linéaire, paramétrée, à valeurs bornées. Il peut être caractérisé par les cinq éléments suivants (Morère. Y, 2001) (figure.1.2) :

- La nature de ses entrées (x_1, x_2, \dots, x_n)
- la fonction d'entrée totale h définissant le pré-traitement effectué sur les entrées

$$h = w_1 \times x_1 + w_2 \times x_2 + \dots + w_n \times x_n + b$$
- La fonction d'activation, ou d'état, f définissant l'état interne du neurone en fonction de son entrée totale.
- La fonction de sortie y calculant la sortie du neurone en fonction de son état d'activation.
- La nature de la sortie du neurone.

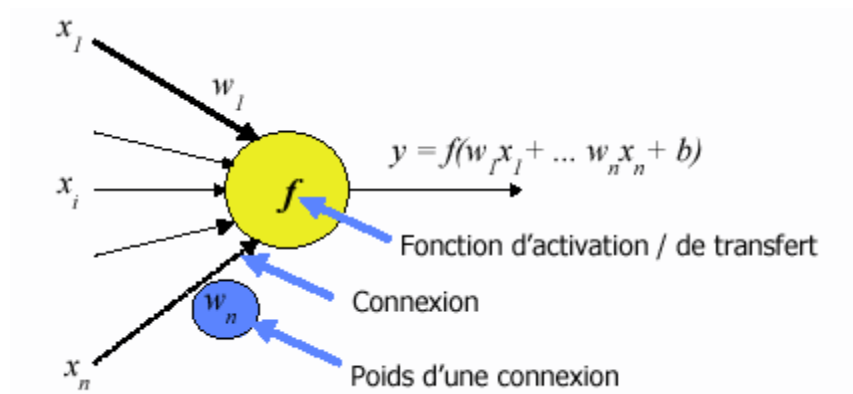


figure.1.2. structure générale du neurone formel

Les entrées et les sorties peuvent être binaires (-1 , +1) ou (0 , 1) ou réelles.

La fonction d'entrée totale peut être booléenne, linéaire $\sum_{i=1, \dots, n} w_i \times x_i$ ou affine

$\sum_{i=1, \dots, n} w_i \times x_i + b$, polynomiale de degré supérieur à deux.

La fonction de sortie du réseau de neurone est en général considérée comme la fonction identité, la sortie du neurone est généralement considérée comme l'activation.

1.5. Les réseaux de neurones formels

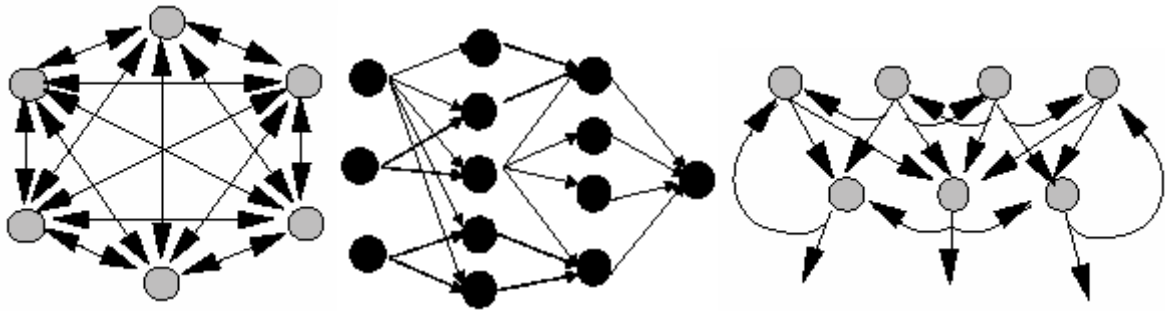
Les réseaux de neurones artificiels regroupent en réseaux un certain nombre de neurones formels connectés entre eux de diverses manières.

Un réseau est défini par :

- Sa topologie, qui représente le type de connexion existant entre les divers neurones du réseau.
- La fonction de transfert qui caractérise le neurone.
- Les méthodes d'apprentissage utilisées pour faire apprendre au réseau des couples d'entrées-sorties.

1.5.1. Les topologies

Les neurones sont connectés entre eux de diverses manières : réseaux totalement interconnectés (*Figure.1.3.*), réseaux à couches ou réseaux de type feedforward (*Figure.1.4.*), réseaux récurrents (*Figure.1.5.*) :



Figur.1.3. Réseau totalement Interconnecté. Figur.1.4. Réseau à couches. Figur.1.5. Réseau récurrent

L'exemple le plus simple de réseau de neurones est donné par le perceptron multicouches, chaque couche contenant une ou plusieurs cellules. Afin d'illustrer un peu ces propos, voici le rôle de chacune des couches dans un perceptron à trois couches :

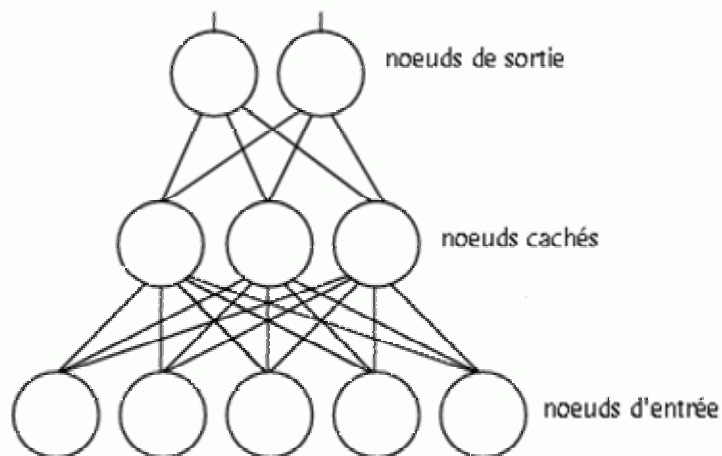


Figure.1.6. Perceptron multicouches

- **Les neurones d'entrée**

La première couche est appelée couche d'entrée. Elle recevra les données source que l'on veut utiliser pour l'analyse. Dans le cas de cette l'étude, cette couche recevra les données concernant le site de référence. Sa taille est donc directement déterminée par le nombre de variables d'entrées.

- **Les neurones cachés**

La seconde couche est une couche *cachée*, en ce sens qu'elle n'a qu'une utilité intrinsèque pour le réseau de neurones et n'a pas de contact direct avec l'*extérieur*. Les fonctions d'activations sont en général non linéaires sur cette couche. Le choix de sa taille n'est pas implicite et doit être ajusté. En général, on peut commencer par une taille moyenne des couches d'entrée et de sortie mais ce n'est pas toujours le meilleur choix. Il sera souvent préférable pour obtenir de bons résultats, d'essayer le plus de tailles possibles.

- **Les neurones de sortie**

La troisième couche est appelée couche de sortie. Elle donne le résultat obtenu après compilation par le réseau des données entrée dans la première couche.. Sa taille est directement déterminée par le nombre de variables qu'on veut en sortie.

1.5.2. Fonctions d'activation

Pour un réseau de neurones avec N cellules dans la première couche, l'entrée d'une cellule de la seconde couche sera généralement une somme pondérée des valeurs de sortie des neurones précédents : $h = w_1 \times x_1 + w_2 \times x_2 + \dots + w_n \times x_n$

Le choix d'une fonction d'activation se révèle être un élément constitutif important des réseaux de neurones. Ainsi, l'identité n'est pas toujours suffisante et souvent des fonctions non linéaires et plus évoluées seront nécessaires. A titre illustratif voici quelques fonctions couramment utilisées comme fonctions d'activation :

$$y = f(h) = 1 / (1 + \exp(h))$$

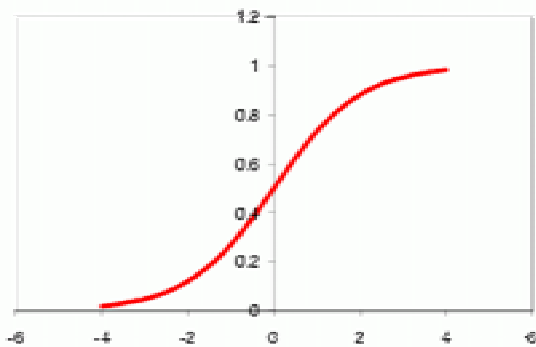


Figure.1.7. Le sigmoïde standard
(encore appelé fonction logistique)

$$y = 2 / (1 + \exp(-2 \times h)) - 1$$

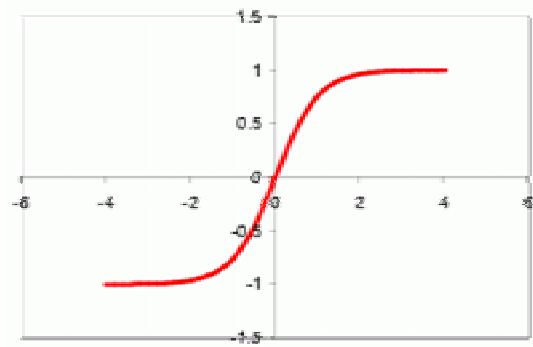


Figure1.8. La tangente hyperbolique

$$y = \exp(-(h^2)/2)$$

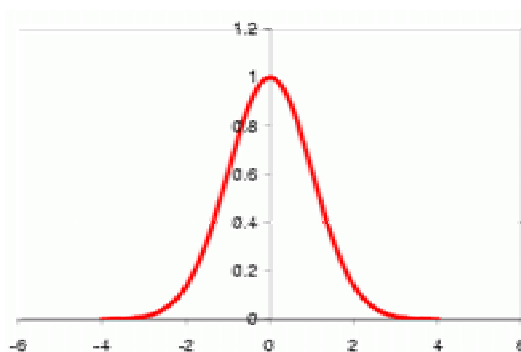


Figure.1.9. La fonction Gaussienne

$$y = 0 \text{ si } h < 0 \text{ et } y = 1 \text{ si } h > 0$$

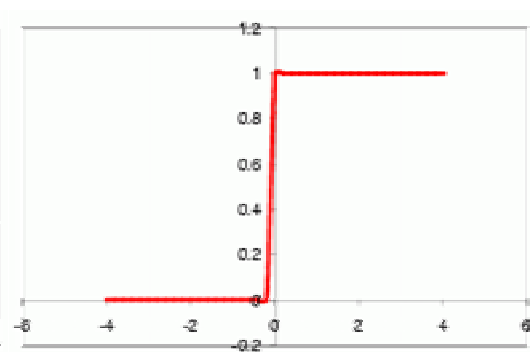


Figure.1.10. Une fonction à seuil

1.5.3. Types d'apprentissages

Il existe deux types d'apprentissages : l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé :

- ❖ **Apprentissage supervisé** : un superviseur, ou professeur, fournit au réseau des couples d'entrées-sorties. Il fait apprendre au réseau l'ensemble de ces couples, par une méthode d'apprentissage, comme la rétro-propagation du gradient de l'erreur, en comparant pour chacun d'entre eux la sortie effective du réseau et la sortie désirée. L'apprentissage est terminé lorsque tous les couples entrée-sortie sont reconnus par le réseau. Ce type d'apprentissage se retrouve, entre autres, dans le perceptron.
- ❖ **Apprentissage non supervisé** : cet apprentissage consiste à détecter automatiquement des régularités qui figurent dans les exemples présentés et à modifier les poids des connexions pour que les exemples ayant les mêmes caractéristiques de régularité provoquent la même sortie. Les réseaux auto-organiseurs de Kohonen sont les réseaux à apprentissage non supervisé les plus connus.

1.5.3.1. Les méthodes d'apprentissage

Dans les systèmes experts, les connaissances de l'expert ont une forme énumérée : elles sont exprimées sous forme de règles. Dans le cas des réseaux de neurones, les connaissances ont une forme distribuée : elles sont codées dans les poids des connexions, la topologie du réseau, les fonctions de transfert (activation) de chaque neurone, le seuil de ces fonctions, la méthode d'apprentissage utilisée. Il existe un certain nombre de méthodes d'apprentissage :

- **La règle de Hebb** : c'est la méthode d'apprentissage la plus ancienne (1949), elle est inspirée de la biologie. Elle traduit le renforcement des connexions liant deux neurones activés. Si un des deux neurones au moins n'est pas activé, le poids de la connexion n'est pas modifié.
- **La rétro-propagation du gradient de l'erreur** : cet algorithme (James. A.F, et al 1992) est utilisé dans les réseaux de type feedforward, ce sont des réseaux de neurones à couches, ayant une couche d'entrée, une couche de sortie, et au moins une couche cachée. Il n'y a pas de récursivité dans les connexions, et pas de connexions entre neurones de la même couche. Le principe de la rétro-propagation consiste à présenter au réseau un vecteur d'entrées, de procéder au calcul de la sortie par propagation à travers les couches, de la couche d'entrée vers la couche de sortie en passant par les couches cachées. Cette sortie obtenue est comparée

à la sortie désirée, une erreur est alors obtenue. A partir de cette erreur, est calculé le gradient de l'erreur qui est à son tour propagé de la couche de sortie vers la couche d'entrée, d'où le terme de rétro-propagation. Cela permet la modification des poids du réseau et donc l'apprentissage. L'opération est réitérée pour chaque vecteur d'entrée et cela jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit vérifié.

- **Les algorithmes génétiques :** Ils représentent une modélisation de la sélection naturelle. Une population d'individus est générée aléatoirement. Un certain nombre d'individus répondant le mieux aux critères de sélection est choisi. A partir de cette population d'élites, une nouvelle population est générée par reproduction, mutation, ou crossover sur les individus de départ, ou parents. L'opération est recommencée jusqu'à la vérification du critère d'arrêt.
- **Algorithme de Sollis et Wets :** c'est une méthode stochastique d'optimisation. Soit M un vecteur contenant l'ensemble des paramètres à optimiser. Soit G un vecteur de bruit gaussien. Ce dernier sera chargé de faire évoluer les paramètres à optimiser par somme ou différence avec le vecteur M . Soit B un vecteur de biais contenant la moyenne de G , il mémorisera les réussites de la minimisation de la fonction de coût. Cette méthode converge avec une probabilité de 1 vers le minimum global.

1.6. Quelques réseaux célèbres

1.6.1. Perceptron

La conception du perceptron (Abdi. H, 1994) par Rosenblatt marque la naissance historique du connexionnisme dans les années 50. Le perceptron élémentaire est constitué d'un réseau d'associeurs linéaires, basés sur la représentation mathématique de la cellule nerveuse réalisée par McCulloch et Pitts et ayant pour technique d'apprentissage la loi de Widrow-Hoff.

1.6.1.1. Description

Les perceptrons sont des réseaux de type feedforward, possédant la structure suivante : une couche de connexions fixes, située entre les unités d'entrée, la rétine, et les unités d'association. La seconde couche relie les unités d'association et les unités de réponse : c'est sur ces poids que l'adaptation agit. Dans le perceptron, il n'y a qu'une seule couche qui varie en fonction de l'adaptation (Figure.1.11.).

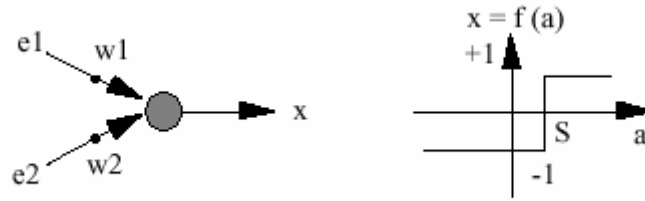


Figure.1.11. Schéma descriptif du perceptron mono-couche.

La fonction de transfert utilisée pour chaque neurone est la fonction de seuil (Figure.1.11)).

Seules les connexions entre les unités d'association et les unités de réponse sont affectées d'un poids qui est modifié par la règle d'apprentissage.

L'apprentissage peut-être basé sur la loi de Widrow-Hoff, ou la règle de Hebb.

C'est un réseau à apprentissage supervisé.

1.6.1.2. Limites

La fonction de transfert utilisée étant binaire, les sorties du réseau seront limitées à deux valeurs. Si une des entrées est distante des autres, du point de vue euclidien, la convergence du réseau risque d'être ralentie.

Le perceptron ne peut classer que des données linéairement séparables, problème du xor (ou exclusif) (figure.1.12).

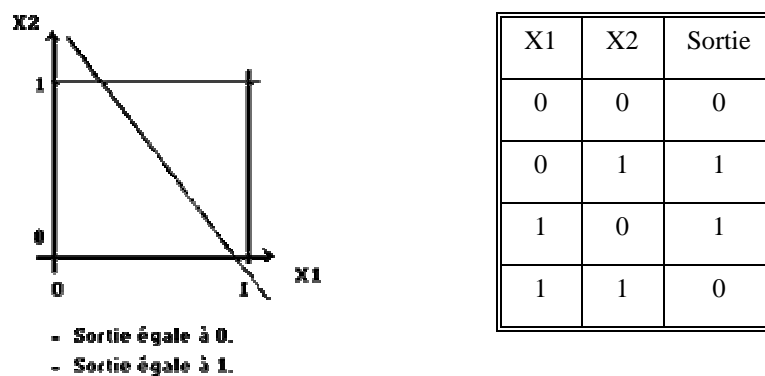


Figure.1.12 : problème du xor.

1.6.2. Hopfield

Ce type de réseau est un ensemble de neurones, où chaque neurone est connecté à chaque autre neurone. Il n'y a aucune différenciation entre les neurones d'entrées et de sorties. L'application principale d'un réseau Hopfield est l'entrepôt et la reconnaissance des patrons,

e.g. l'optimisation des images. La méthode d'apprentissage est : non-supervisée. L'algorithme d'apprentissage est la règle d'apprentissage "simulated annealing" (parfois delta).

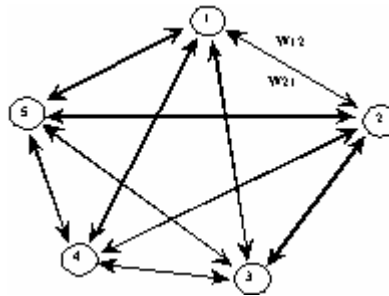


Figure.1.13. Le réseau de Hopfield

1.6.3. Kohonen

C'est probablement le type de réseau de neurones le plus utile, si le processus d'éducation du cerveau humain est à être simulé. Le coeur de ce type est la mappe où des neurones s'organisent eux-mêmes par rapport à certaines données à l'entrée. Ce type de réseau est "feedforward" ainsi que "feedback". Il est utilisé dans le codage d'informations.

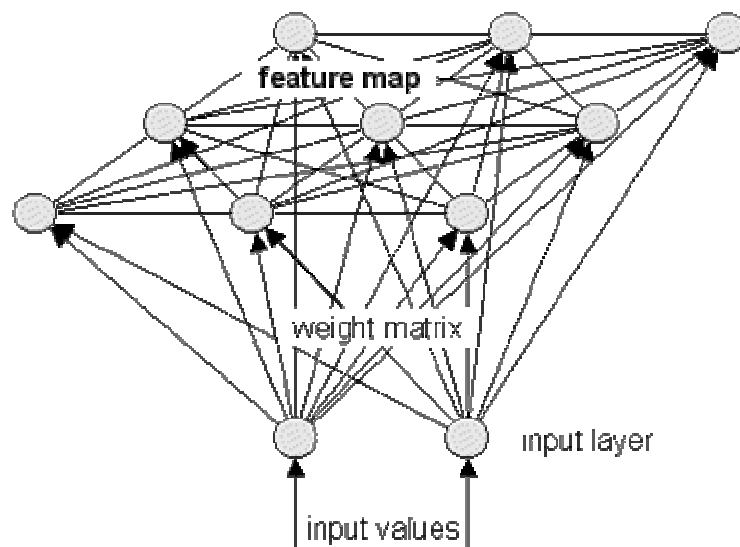


Figure.1.14. Le réseau de kohonen

1.6.4. Le Perceptron MultiCouche (PMC)

Ils sont une amélioration du perceptron comprenant une ou plusieurs couches intermédiaires dites couches cachées. Ils utilisent, pour modifier leurs poids, un algorithme de rétropropagation du gradient, qui est une généralisation de la règle de Widrow-Hoff. Il s'agit toujours de minimiser l'erreur quadratique, ce qui est assez simple quand on utilise une

fonction f dérivable (la sigmoïde par exemple). On propage la modification des poids de la couche de sortie jusqu'à la couche d'entrée. Les PMC agissent comme un séparateur non linéaire et peuvent être utilisés pour la classification, le traitement de l'image ou l'aide à la décision.

1.7. Mise en œuvre des réseaux neuronaux

Nous allons suivre une démarche composée de quatre étapes principales (<http://www.cict.fr>):

- Étape 1 : fixer le nombre de couches cachées
- Étape 2 : déterminer le nombre de neurones par couches cachées
- Étape 3 : choisir la fonction d'activation
- Étape 4 : choisir l'apprentissage

Étape 1 : fixer le nombre de couches cachées

Mis à part les couches d'entrée et de sortie, l'analyste doit décider du nombre de couches intermédiaires ou cachées. Sans couche cachée, le réseau n'offre que de faibles possibilités d'adaptation ; avec une couche cachée, il est capable, avec un nombre suffisant de neurones, d'approximer toute fonction continue. Une seconde couche cachée prend en compte les discontinuités éventuelles.

Étape 2 : déterminer le nombre de neurones par couches cachées

Chaque neurone supplémentaire permet de prendre en compte des profils spécifiques des neurones d'entrée. Un nombre plus important permet donc de mieux coller aux données présentées mais diminue la capacité de généralisation du réseau. Ici non plus il n'existe pas de règle générale mais des règles empiriques. La taille de la couche cachée doit être :

- Soit égale à celle de la couche d'entrée.
- Soit égale à 75% de celle-ci.
- Soit égale à la racine carrée du produit du nombre de neurones dans la couche d'entrée et de sortie.

Une voie de recherche ultérieure consisterait soit à procéder à l'estimation d'un réseau comportant de nombreux neurones puis à le simplifier par l'analyse des multicollinéarités ou par une règle d'apprentissage éliminant les neurones inutiles ; soit à définir une architecture tenant compte de la structure des variables identifiée au préalable par une analyse en composantes principales.

Mais rien ne vaut de tester toutes les possibilités et de choisir celle qui offre les meilleurs résultats.

Étape 3 : choisir la fonction d'activation

Nous considérerons la fonction tangente hyperbolique pour le passage de la couche d'entrée à la couche cachée. Le passage de cette dernière à la couche de sortie sera soit linéaire.

Étape 4 : choisir l'apprentissage

L'apprentissage de rétro-propagation nécessite la détermination du paramètre d'ajustement des poids synaptiques à chaque itération.

La détermination du critère d'arrêt est aussi cruciale dans la mesure où la convergence peut passer par des minima locaux

Validation

Une fois le réseau calculé, il faut procéder à des tests pour vérifier que le réseau réagit bien comme on le souhaite : c'est la validation. Il y a plusieurs méthodes pour faire cela : La méthode la plus simple étant de garder une partie de l'échantillon réservé à l'apprentissage, pour la validation et faire ainsi une validation hors-échantillon..

1.8. Domaine d'application des réseaux de neurones

- Reconnaissance de Formes.
- Traitement du Signal.
- Classification.
- Traitement de la Vision et de la Parole.
- Robotique.
- Classification et Analyse Discriminante.
- Modélisation et Prévion.
- Problèmes NP-complexes ("PVC": Problème du Voyageur de Commerce...).
- Classification de séries temporelles ("formes temporelles").
- Nouvelles architectures informatiques.
- Etude du Cerveau.
- ...
- Et bien d'autres choses encore...

1.9. Limites des réseaux de neurones

- On peut "espérer" de nouvelles capacités grâce à une sophistication rendue possible par les progrès matériels (rapidité ==> qualité ?). Rien cependant ne permet aujourd'hui d'être affirmatif sur ce plan.
- Manque de formalisme (ou dans certains cas, déficit d'informations sur les avancées théoriques, ce qui revient au même d'un point de vue pratique). Le "savoir" et la compétence sont plus liés à l'expérience qu'à la maîtrise des formalismes théoriques. La pluri-disciplinarité et la complexité des systèmes mis en jeu dans les réseaux neuro-mimétiques ne favorisent peut-être pas l'émergence de formalismes universels et productifs...
- Manque de recul. Et par conséquent, manque d'expérience, ce qui est contraignant compte tenu du point précédent.
- Aspect "Boîte noire" séduisant car spectaculaire, mais risqué et parfois mal perçu (méfiance de la part des utilisateurs)...
- Importance du travail préliminaire de préparation des données, notamment : choix des variables pertinentes, normalisation, élimination de données aberrantes, organisation du protocole d'apprentissage et de validation...
- L'échec des méthodes traditionnelles sur certains problèmes de modélisation provient souvent du manque d'informations contenues dans les données. Ce ne sont pas les réseaux de neurones qui amélioreront les performances dans ce cas.

1.10. Avantages des réseaux de neurones

- Quelques propriétés spécifiques, à la fois sur le plan de la mise en oeuvre informatique et sur le plan des aptitudes.
- Parallélisme : le principe et le potentiel sont clairement affichés. De nouveaux formalismes et les bénéfices à en tirer restent à étudier...
- Capacité d'adaptation : apprentissage extrapolable et potentiel d'auto-organisation.
- Mémoire distribuée. : données "bruitées", données "diffuses", informations plus facilement "adressables".
- Capacité de généralisation : spectaculaire notamment en reconnaissance de "formes".
- Simplicité de mise en oeuvre pour de nombreux problèmes.
- Aspect "Boîte noire" risqué mais séduisant.

- En modélisation : gains souvent modérés par rapport aux méthodes classiques, mais parfois suffisants pour justifier la démarche sur un plan économique.
- Intérêt général dans le cas de problèmes pour lesquels on connaît peu d'informations a priori.
- Intérêt probablement croissant à terme, avec l'évolution des travaux théoriques et appliqués qui feront progresser les performances, la compréhension, les capacités, et la facilité d'utilisation des réseaux de neurones, domaines par domaines.

2 ANNEXE 2 :

DESCRIPTION GENERALE DE EERA

2.1. Introduction

En 1998, le programme machine EERA abréviation de : «A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits» a été développé au département de Génie Civil à l'université de California par (BARDET J. P et al). Écrit en Fortran 90 à partir des mêmes concepts de base que SHAKE91. EERA représente l'analyse linéaire Équivalente de la réponse sismique d'un sol. L'implémentation d'EERA profite pleinement des opérations dynamiques des tableaux et des matrices trouvées dans Fortran 90. Les entrées et les sorties d'EERA sont entièrement intégrées dans l'Excel.

2.2. Description de EERA

Le menu d'EERA contient sept commandes sous forme d'icônes (Figure2.1) :

1. ***Process Earthquake Data*** – lecture et traitement du mouvement d'entrée (entrées/sorties sont sur la feuille nommée eathquake).
2. ***Calculate Compatible Strain*** – lecture des propriétés élastiques du profil et des courbes des matériaux et l'exécution du calcul des itérations (entrées/sorties sont sur la feuille de calcul Iteration)..
3. ***Calculate Output***
 - ***Acceleration/Velocity/Displacement*** : calcul de l'histoire du temps de l'accélération, de la vitesse ou du déplacement sur le sommet de la couche désirée (entrées/sorties sont sur Acceleration).
 - ***Stress /Strain*** : calcul des contraintes et déformations sur le milieu de la couche désirée (entrées/sorties sont sur Strain).
 - ***Amplification*** : calcul de la fonction d'amplification entre deux couches (entrées/sorties sont sur Amplification).
 - ***Fourier Spectrum*** : calcul de l'amplitude de Fourier en accélération sur le sommet de la couche désirée (entrées/sorties sont sur Fourier).
 - ***Response Spectrum*** : calcul des réponses spectrales: accélérations, vitesses, emplacements, (entrées/sorties sont sur spectra).

- *All of the above* : l'exécution de toutes les tâches précédentes
4. *Duplicate Worksheet* : créations de nouvelles feuilles pour l'ajout d'un nouveau matériau et/ou d'une nouvelle tâche de calcul.
 5. *Delete Worksheet* : suppression d'une ou des feuilles de calcul (il y'a des feuilles qui ne peuvent pas être supprimées) .
 6. *Remove EERA* : désinstallation du EERA.
 7. *About EERA* : le numéro de la version d'EERA.

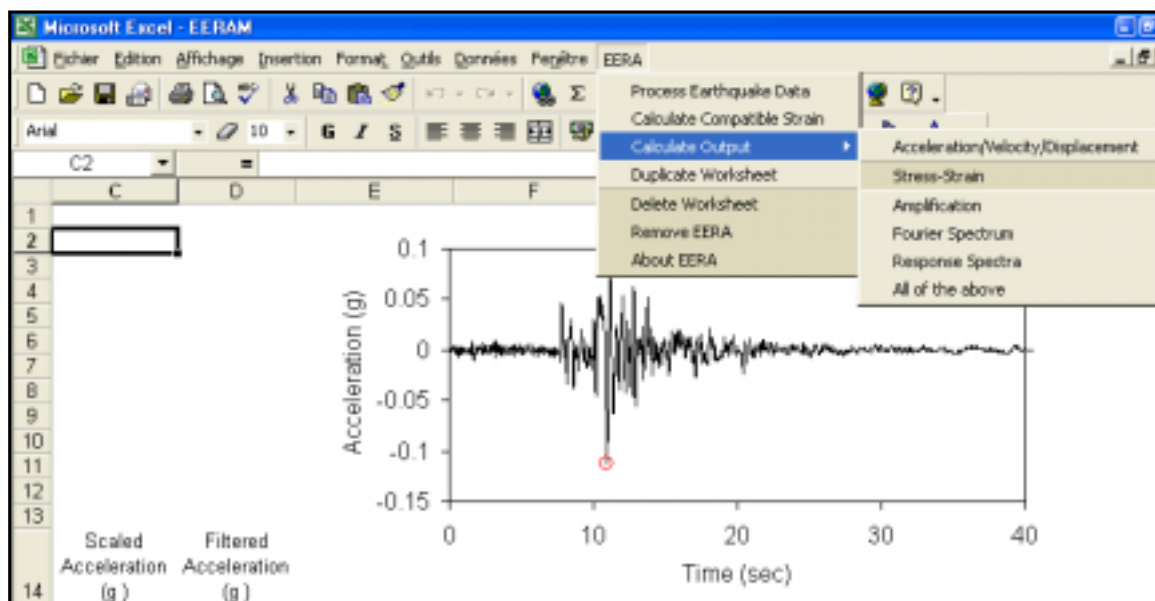


Figure.2.1. Le menu de EERA

2.3. Comparaison entre EERA et SHAKE91

Sur la base d'un exemple, une comparaison a été faite entre les résultats obtenus par SHAKE91 et le EERA : Les figures (2.2, 2.3, 2.4) représentent respectivement l'histoire du temps en accélération, la fonction d'amplification et d'accélération spectrale obtenues par les deux codes de calculs. Il en résulte de ces trois figures que les deux codes donnent les mêmes valeurs. Cependant, la figure.2.5 illustre l'erreur relative en (%) entre les valeurs spectrales d'accélération obtenues par les deux logiciels : à partir de cette figure, on peut tirer l'erreur maximale qui est égale à -0.025%. Cette erreur est négligeable; ce qui nous amène à conclure que les deux codes de calculs SHAKE91 et EERA convergent vers les mêmes résultats.

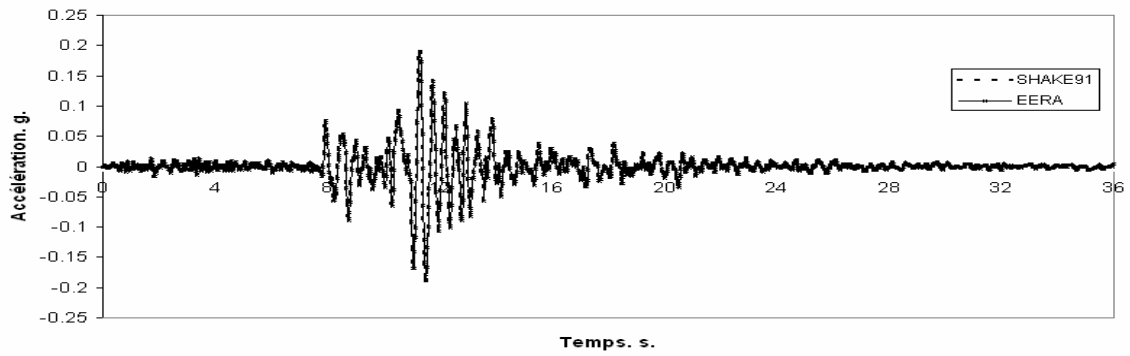


Figure.2.2. Histoire du temps en accélération obtenue à la surface libre par EERA et SHAKE91

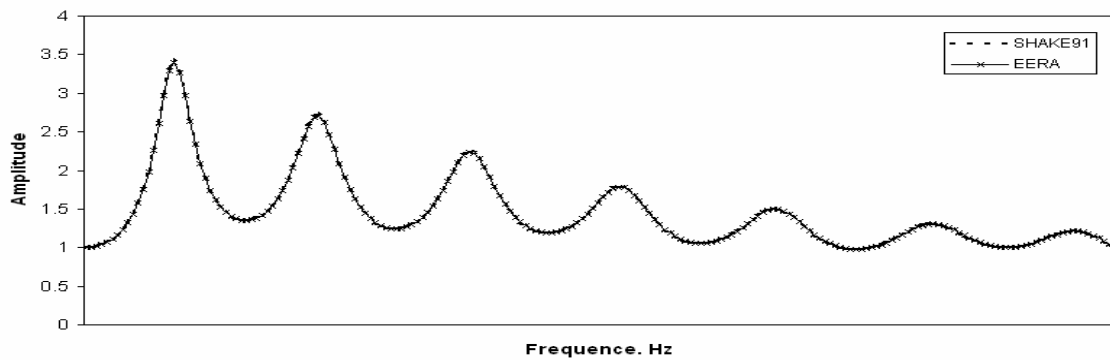


Figure.2.3 Fonction d'amplification entre le substratum rocheux et la surface libre

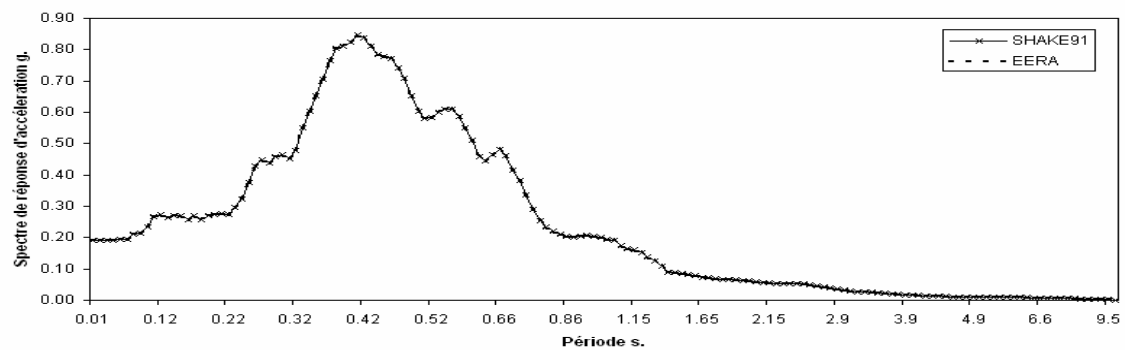


Figure.2.4. Accélération spectrale à la surface libre

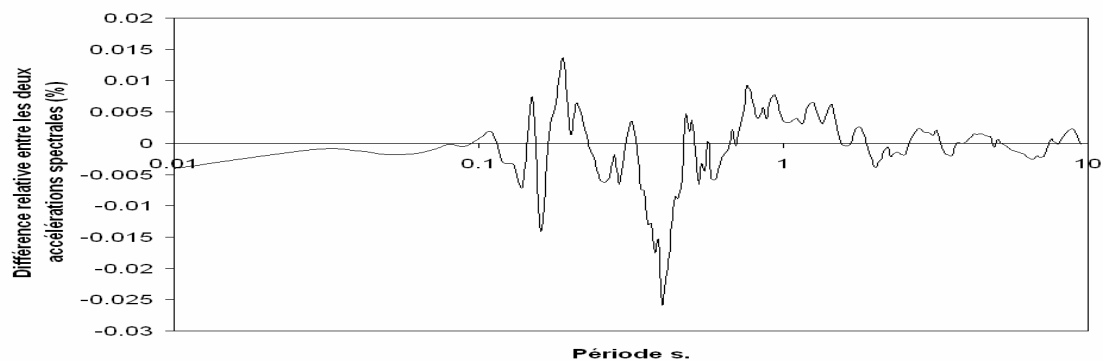


Figure2.5. Erreur relative entre les accélérations spectrales générées à la surface libre par EERA et SHAKE91.

3 ANNEXE 3

DENSES RESEAUX D'ACCELEROGRAPHES

A HAUTE TECHNICITE

3.1 Introduction

La connaissance que nous avons des séismes au début du 20^{ème} siècle reposait essentiellement sur les témoignages relatifs aux dégâts. Depuis que la sismologie est entrée dans l'ère instrumentale, la technologie n'a cessé de progresser. De nouveaux outils apparaissent régulièrement et permettent de mieux décrire et comprendre les tremblements de terre.

3.2. Le réseau japonais K-NET

A la suite du tremblement de terre de Kobe (17 janvier 1995), le gouvernement japonais a pris la décision de doter le pays d'un réseau sismologique très performant. Le National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) s'est alors chargé de déployer 1000 stations sur le territoire japonais. Le réseau « Kyoshin-Net » a été mis en place avec un souci d'homogénéité : les 1000 stations sismologiques forment un réseau uniforme dont la maille est d'environ 25 km. La diffusion rapide des données est aussi une caractéristique importante du réseau (les 209 enregistrements obtenus lors du séisme de magnitude 5,7 survenu le 16 mars 1997 étaient en libre accès sur le site internet http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/index_en.shtml après seulement 3 heures).

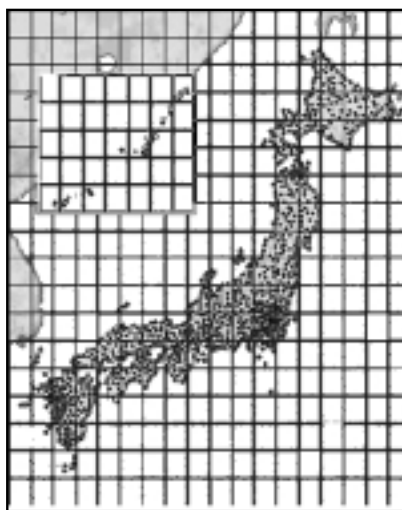


Figure.3.1 : Répartition des stations du réseau K-NET.

Outre la répartition géographique, la volonté d'homogénéisation des concepteurs du réseau se retrouve au niveau des stations. Le modèle d'accéléromètre "K-NET 95" a été conçu spécialement pour l'occasion, ses caractéristiques sont détaillées par Kinoshita (1998). De même, la mise en place des appareils répond à plusieurs exigences (enregistrement du mouvement en champ libre, données télémetrées), c'est en fait un véritable observatoire sismologique qui a été conçu.

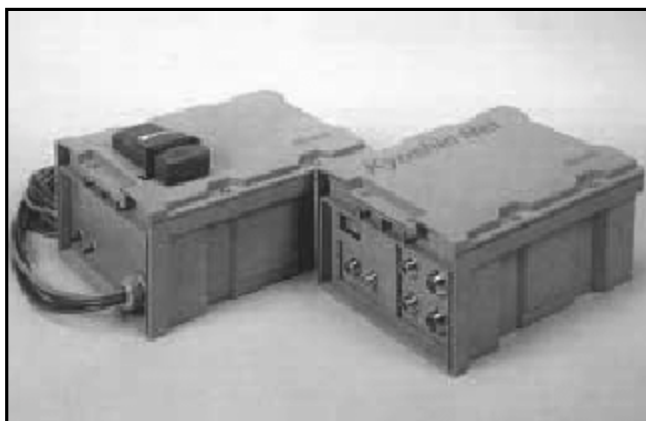
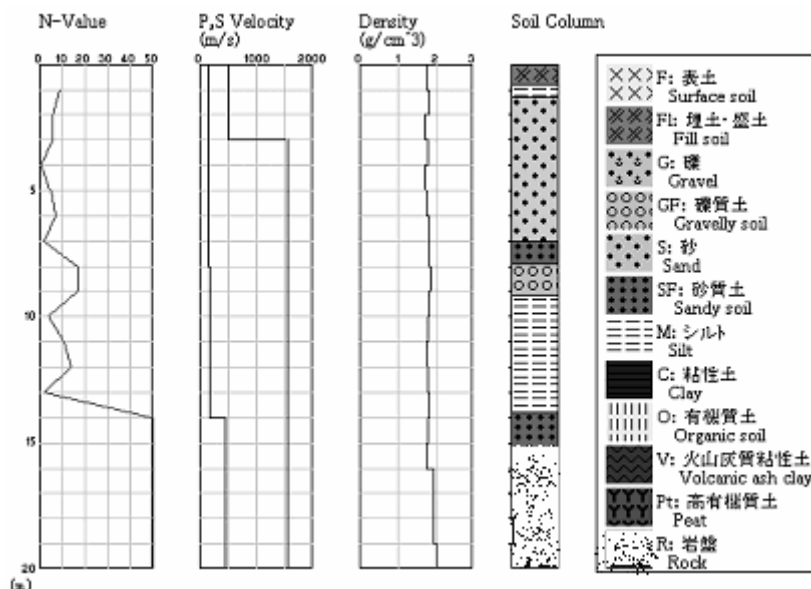


Figure.3.2 Accélérogramme de K-NET

Dans le but de faire progresser la compréhension des effets de site, chaque station a fait l'objet d'une reconnaissance géotechnique sur une profondeur allant de 10 à 20 mètres selon les sites. Les vitesses de propagation des ondes S et P ont été mesurées à l'aide d'essais down-hole. La densité volumique a également été estimée par diagraphie. La nature du sol a été relevée de visu. Chaque station a donc la "carte d'identité" de son sous-sol.



| | N-Value | P,S-Velocity (m/s) | | Density (g/cm ³) | Soil Column | | |
|-----|---------|-----------------------|-----|---------------------------------|-------------|--------|----|
| 1m | 9 | 510 | 140 | 1.75 | 0m - | 0.80m | Fl |
| 2m | 6 | 510 | 140 | 1.81 | 0.80m - | 1.30m | M |
| 3m | 6 | 510 | 140 | 1.70 | 1.30m - | 7.00m | S |
| 4m | 1 | 1540 | 140 | 1.80 | 7.00m - | 7.90m | SF |
| 5m | 5 | 1540 | 140 | 1.73 | 7.90m - | 9.15m | GF |
| 6m | 7 | 1540 | 140 | 1.74 | 9.15m - | 13.80m | M |
| 7m | 2 | 1540 | 140 | 1.81 | 13.80m - | 15.20m | SF |
| 8m | 17 | 1540 | 140 | 1.82 | 15.20m - | 20.32m | R |
| 9m | 17 | 1540 | 170 | 1.86 | | | |
| 10m | 4 | 1540 | 170 | 1.83 | | | |
| 11m | 11 | 1540 | 170 | 1.80 | | | |
| 12m | 14 | 1540 | 170 | 1.76 | | | |
| 13m | 2 | 1540 | 170 | 1.77 | | | |
| 14m | 99 | 1540 | 170 | 1.81 | | | |
| 15m | 99 | 1540 | 450 | 1.77 | | | |
| 16m | 99 | 1540 | 450 | 1.75 | | | |
| 17m | 99 | 1540 | 450 | 1.94 | | | |
| 18m | 99 | 1540 | 450 | 1.95 | | | |
| 19m | 99 | 1540 | 450 | 1.94 | | | |
| 20m | 99 | 1540 | 450 | 2.00 | | | |

Figure.3.3: Profil de sol de la station AIC011 du réseau K-NET.

Depuis sa mise en place, le réseau K-NET a enregistré plus de 100 séismes de magnitude supérieure à 5, cela représente environ 6000 enregistrements trois composantes soit 18 000 accélérogrammes. Les fichiers correspondants sont disponibles au format ASCII, les paramètres de source sont inclus dans l'entête de chaque fichier de données.

| | | | | | | | |
|-------------------|---------------------|-------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Origin Time | 2002/02/25 22:14 | } | Paramètre de source | | | | |
| Lat. | 36.4 | | | | | | |
| Long. | 140.8 | | | | | | |
| Depth. (km) | 80 | | | | | | |
| Mag. | 4.7 | } | Paramètre de station | | | | |
| Station Code | MYG002 | | | | | | |
| Station Lat. | 38.7233 | | | | | | |
| Station Long. | 141.5144 | | | | | | |
| Station Height(m) | 79 | | | | | | |
| Record Time | 2002/02/25 22:15:12 | | | | | | |
| Sampling Freq(Hz) | 100Hz | | | | | | |
| Duration Time(s) | 119 | | | | | | |
| Dir. | E-W | | | | | | |
| Scale Factor | 2000(gal)/8388608 | | | | | | |
| Max. Acc. (gal) | 5 | | | | | | |
| Last Correction | 2002/02/25 22:00:00 | | | | | | |
| Memo. | Temp.= 21 Deg.C. | | | | | | |
| -6536 | -8253 | -8802 | -7973 | -6737 | -5808 | -5727 | -6658 |
| -7174 | -6884 | -6342 | -6524 | -7114 | -7023 | -6595 | -6549 |
| -7167 | -7676 | -7215 | -6146 | -5444 | -5898 | -6977 | -7338 |
| -7144 | -7810 | -8055 | -6948 | -5056 | -4057 | -5210 | -7366 |
| -8720 | -8428 | -7518 | -7017 | -6875 | -6438 | -5813 | -5659 |
| -5928 | -6690 | -7453 | -7555 | -7051 | -6160 | -6168 | -7010 |
| -7492 | -7204 | -6586 | -6531 | -6605 | -6353 | -6163 | -6253 |
| -6917 | -7797 | -7474 | -6380 | -6334 | -7328 | -7512 | -5752 |
| -4894 | -6495 | -8133 | -7751 | -6747 | -6571 | -6420 | -5729 |

Figure 3.4 : Exemple d'enregistrement.

4 ANNEXE 4

PRESENTATION DE QUELQUE CLASSIFICATIONS DE SITES

| Catégorie | Définition de la classification des sites |
|-----------------------|--|
| S1 (site rocheux) | Roche ou autre formation géologique caractérisée par une vitesse moyenne d'onde de cisaillement (V_s) \geq à 800m/s. |
| S2 (site ferme) | Dépôts de sables et de graviers très denses et/ou d'argile surconsolidée sur 10 à 20 m d'épaisseur avec $V_s \geq 400$ m/s à partir de 10 m de profondeur. |
| S3 (site meuble) | Dépôts épais de sables et graviers moyennement denses ou d'argile moyennement raide avec $V_s \geq 200$ m/s à partir de 10 m de profondeur. |
| S4 (site très meuble) | - Dépôts de sables lâches avec ou sans présence de couches d'argile molle avec $V_s < 200$ m/s dans les 20 premiers mètres. - Dépôts d'argile molle à moyennement raide avec $V_s < 200$ m/s dans les 20 premiers mètres. |

Tableau.4.1. Classification des sites spécifié dans RPA99

| Category holes | Generic description and site class definition |
|----------------|--|
| A | Hard rock with measured shear wave velocity $\bar{V}_s > 1500$ m/sec |
| B | Rock with $760 < V_s \leq 1500$ m/sec |
| C | Very dense or very stiff to hard soils or soft rock with $360 \leq \bar{V}_s \leq 760$ m/sec or with either $\bar{N}_{SPT} > 50$ or $\bar{s}_u \geq 100$ kPa |
| D | Stiff soil with $180 \leq V_s \leq 360$ m/sec or with either $15 \leq N_{SPT} \leq 50$ or $50 \text{ kPa} \leq \bar{s}_u \leq 100 \text{ kPa}$ |
| E | A soil profile with $V_s < 180$ m/sec or any profile with more than 3m of soft clay defined as soil with $PI > 20$, $w \geq 40\%$ and $\bar{s}_u < 25$ kPa |
| F | Soils requiring site - specific studies |

where,

- \bar{V}_s : average shear wave velocity over the uppermost 30m of the borehole
 \bar{N}_{SPT} : number of blows of the Standard Penetration Test (for 30 cm of penetration)
 \bar{s}_u : average value of the undrained shear strength (kPa)
 PI : plasticity index
 w : water content of the soil (%)

*Tableau.4.2. classification des sites spécifiée pour le nouveau code de bâtiment en USA.
 (NEHRP 1994, UBC 1997)*

| Site category holes | Generic description and site class definition |
|---------------------|---|
| A | Rock or other geological formation characterized by a shear wave velocity V_s of at least 800 m/sec, including at most 5 m of weaker material at the surface. Stiff deposits of sand, gravel or overconsolidated clay, at least several tens of m thick, characterized by a gradual increase of the mechanical properties with depth and by V_s values of at least 400 m/sec at a depth of 10 m. |
| B | Deep deposits of medium dense sand, gravel or medium stiff clays with thickness of several tens to many hundreds of m, characterized by V_s values of at least 200 m/sec at a depth of 10m, increasing to at least 350 m/sec at a depth of 50 m. |
| C | Loose cohesionless soil deposits with or without some cohesive layers, characterized by V_s values below 200 m/sec in the uppermost 20 m. Deposits with predominant soft-to-medium stiff cohesive soils, characterized by V_s values below 200 m/sec in the uppermost 20 m. |
| Special case 1 | Thin soil: the subsoil profile includes an alluvial surface layer with thickness varying between 5 m and 20 m, underlain by much stiffer materials of class A. |
| Special case 2 | For sites not matching the three subsoils classes A, B, C: special studies are required. |

Tableau4.3. Classification des sites spécifiée dans EC8

| Soil type | F_0 (Hz) |
|-----------|------------|
| Rock | 6.67 |
| Hard | 3.33 |
| Medium | 1.33 |
| Soft | 0.83 |

Tableau.4.4. Classification des sites donnée par Arias suivant la fréquence caractéristique du sol.

5 ANNEXE 5

APERÇU SUR LES DEUX CODES DE CALCUL

SRISQ ET SKRISQ

5.1. Description de SRISQ

La mission principale de SRISQ (figure.5.1) est d'estimer le niveau de risque lié à l'effet de site par l'équation V.5.1.

Les données à introduire dans le code de calcul sont :

1. Les données de site en question :
 - La vitesse de cisaillement sur trente mètres de profondeur V_{s30} (m/s).
 - La fréquence caractéristique F_0 (Hz).
 - L'épaisseur du profil H (m).
2. L'accélération maximale $PGA(g)$ enregistrée sur un site de référence: dans un substratum rocheux ou sur un affleurement rocheux.

Après la validation des données, les résultats sont affichés, il s'agit de :

- S_1 : facteur d'amplification spectrale entre [0,0.5]sec
- S_2 : facteur d'amplification spectrale à 1.0sec
- Le niveau de risque : qui est classé en trois catégories : haut risque, moyen risque et faible risque.

5.2. Description de SKRISQ

SKRISQ (figure.5.2) est élaboré pour effectuer deux tâches :

1. Génération d'un spectre de réponse en accélération à la surface libre de la terre à partir de celui enregistré sur un site de référence (substratum rocheux ou affleurement de la roche).
2. Estimation du risque lié à l'effet de site (éq. V.5.1) à partir des deux facteurs d'amplification spectrale S_1 et S_2 .

Le SKRISQ comporte les étapes de fonctionnement suivantes :

Phase I : Introduction des données (par l'utilisateur)

1. Introduction du fichier de données d'entrée contenant les valeurs spectrales d'accélération et les périodes correspondantes. Ce fichier doit être enregistré dans le même répertoire que SKRISQ et sous le nom « spectre.dat ».
2. Indication du type de sol. (très meuble A1, meuble B2, ferme, C3, ou rocheux D4).
3. Donner le nombre d'intervalles N des périodes à visualiser.

Phase II : Traitement des données et choix d'un réseau de neurones (entrée/sortie)

1. Choix d'un groupe de base de données parmi les quatre (1,2,3 ou 4) correspondant au type de sol indiqué par l'utilisateur.
2. Le groupe étant choisi, le programme compare la valeur maximale de l'accélération spectrale S_{ar} (donné par l'utilisateur) et celles (résidant dans la base de données) et fait appel au réseau de neurones caractérisé par une valeur maximale proche de celle de S_{ar} .

Phase IV : extrapolation et affichage des résultats

1. Le traçage du spectre de réponse d'accélération estimé par le modèle neuronal et le calcul de S_1 et S_2 qui donnent le niveau de risque probable.

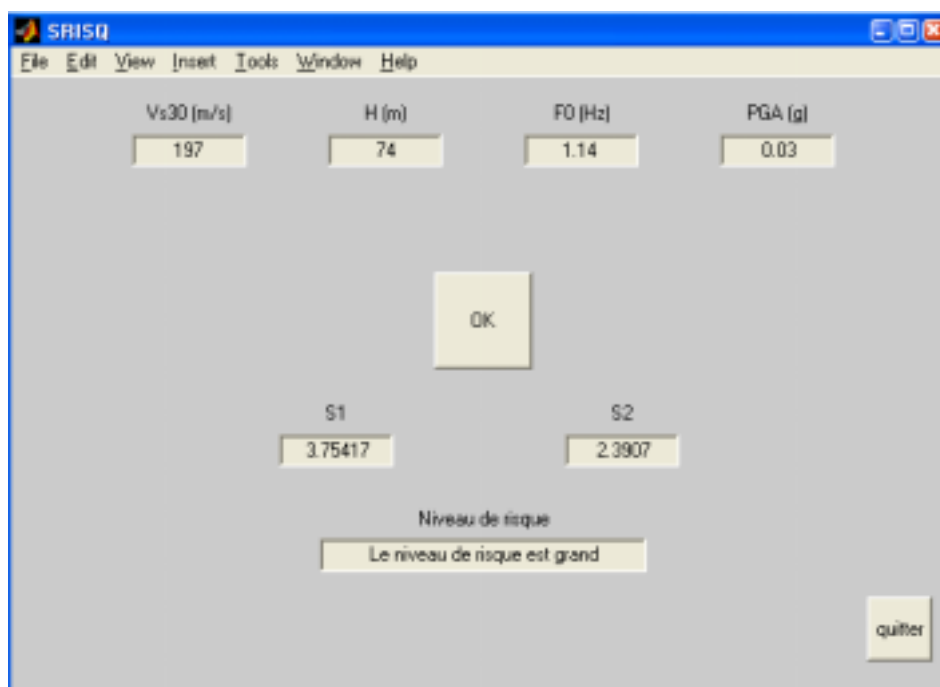


Figure.5.1. Présentation de l'interface de SKRISQ

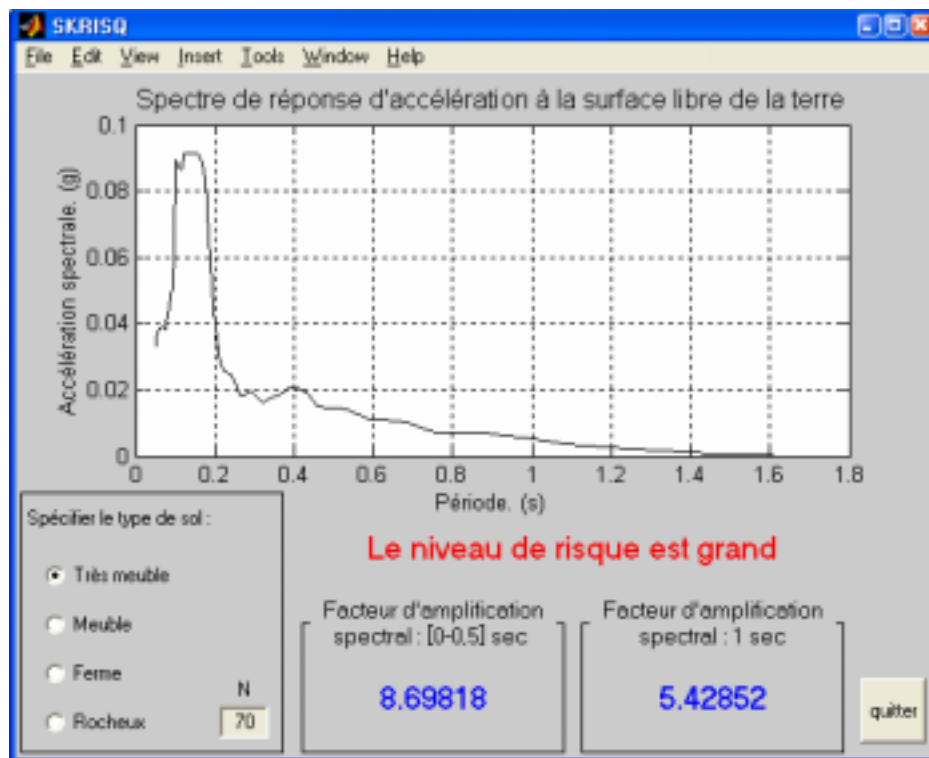


Figure.5.2. Présentation de l'interface SKRISQ.