

SEQRA : UN CODE DE CALCUL POUR L'ANALYSE DE LA RÉPONSE SISMIQUE DES PROFILS DE SOL

SEQRA: A COMPUTATIONAL CODE FOR SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF SOIL PROFILES

Réception : 14/04/2021

Acceptation : 07/06/2021

Publication : 18/06/2021

BENCHARIF Raouf ¹, ZAHAFI Amina², MEZOUAR Nourredine³, HADID Mohamed⁴¹Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, CGS, Hussein Dey, Alger, Algérie-
rbencharif@cgs-dz.org²Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics (ENSTP), Kouba, Alger, Algérie-
amina_zahafi@yahoo.com³Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, CGS, Hussein Dey, Alger, Algérie-
nmezouar@cgs-dz.org⁴Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics (ENSTP), Kouba, Alger, Algérie-
hadid_mohamed2003@yahoo.fr

Résumé—L'investigation de la réponse sismique des profils de sol multicouche surmontant un substratum rocheux, constitue l'un des problèmes fondamentaux en génie parasismique. Il s'agit d'estimer le niveau d'accélération sismique en matière d'accélérogramme ou de spectre de réponse élastique, à considérer en surface libre. Bien qu'un nombre important de méthodes et de programmes informatiques aient été mis au point au cours des trois dernières décennies, SHAKE est probablement le plus populaire en raison de sa simplicité. Partant de la théorie de propagation verticale d'ondes sismiques de cisaillement (problème 1D), la réponse sismique d'un profil de sol est facilement accessible depuis un simple schéma de calcul dans le domaine fréquentiel. Toutefois, le comportement non-linéaire du sol est pris en compte par une approche équivalente-linéaire à l'aide d'un algorithme récursif. Dans cet article, une formulation matricielle faisant appel à la méthode des couches minces (Thin Layer Method, TLM) est employée pour le calcul de la fonction d'amplification des profils de sols multicouches. Un code informatique est développé dans un environnement informatique moderne bien adapté pour les opérations matricielles. Une fois la fonction d'amplification calculée, la réponse en surface peut être déterminée sans aucun effort additionnel de calcul. La stabilité, la précision et l'efficacité du code développé dans le cadre de ce travail sont illustrées par comparaison avec d'autres logiciels de calcul tels que SHAKE et DEEPSOIL.

Mots - clés : Méthode des couches minces (TLM), Réponse sismique des sites, Calcul linéaire équivalent, Problème 1D, Spectre de réponse.

Abstract— Evaluation of the seismic response of multi-layered soil profiles overlying bedrock is one of the fundamental problems in earthquake engineering. It is a request to estimate the level of seismic acceleration in terms of the accelerogram or elastic response spectrum to be considered at the surface. Although many methods and computer programs have been developed during the last three decades, SHAKE is probably the most popular one because of its simplicity. Starting from the vertical shear wave seismic propagation theory (1D problem), a soil profile's seismic response is easily accessible from a simple frequency-domain computational scheme. However, the nonlinear behavior of the soil is considered by an equivalent-linear approach using a recursive algorithm. In this paper, a matrix formulation using the Thin Layer Method (TLM) is employed to compute multilayer soil profiles' amplification function. A computer code is developed in a modern computer environment well suited for matrix operations. Once the amplification function is calculated, the surface response can be determined with no additional computational time and effort. The accuracy, and efficiency of the code developed in this work are illustrated by comparing other computational software packages such as SHAKE and DEEPSOIL.

Keywords: Thin layer method, Seismic site response, equivalent linear approach, 1D Problem, Response spectrum.

1-Introduction

L'étude sismique de site est une étape importante dans la définition des actions sismiques à considérer lors du calcul parasismique des structures. Cette étape nécessite plusieurs paramètres tels que (i) l'aléa sismique régional qui permet la définition des sources sismiques qui contrôlent l'aléa au niveau du site et qui estime l'accélération maximale au rocher (substratum) pour une période de retour donnée ; (ii) le profil de sol multicouche depuis le substratum jusqu'à la surface libre, construit à partir des données géologique, géotechnique et géophysique ; (iii) les modèles de comportement linéaire (à faible excitation), non-linéaire (à forte excitation) ou linéaire équivalent (excitation de niveau moyen), et (iv) choix des accélérogrammes (excitations) conformes avec le contexte sismotectonique du site. Il s'agit donc d'estimer le niveau d'accélération sismique en matière d'accélérogrammes ou de spectres de réponse en surface libre.

La présence de couches géologiques superficielles de caractéristiques mécaniques différentes et de géométrie différente, peut accroître les effets dévastateurs d'un séisme par modification des caractéristiques du mouvement vibratoire. Aussi, la présence de couches épaisses influe considérablement sur le mouvement sismique en termes d'amplitude et de contenu fréquentiel. La fonction d'amplification (fonction de transfert) traduit quantitativement le pouvoir amplificateur d'un profil de sol autour de certaines fréquences. Par définition, la fonction d'amplification entre deux points du système est le rapport de l'amplitude des mouvements de ces deux points exprimé dans le domaine fréquentiel. Si l'un des points est choisi comme étant le point où l'accélération est connue, alors le produit de la fonction d'amplification par la transformée de Fourier de cette accélération représente la réponse fréquentielle au deuxième point. La fonction de transfert caractérise parfaitement le système linéaire qui n'est rien d'autre que le profil de sol. Ce système linéaire est invariant. Cependant, l'analyse sismique des dépôts de sol est le plus souvent effectuée à l'aide d'un schéma de calcul itératif, proposé initialement par Seed et Idriss, [1] dans lequel les effets inélastiques sont modélisés approximativement par des courbes de dégradation (Figure 1).

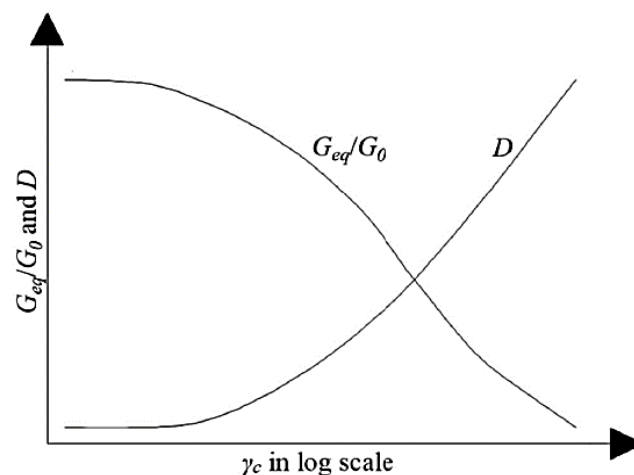


Figure 1 : Format typique des propriétés dynamiques des sols en fonction de la distorsion.

Figure 1: Typical shape of dynamic soil properties as a function of distortion.

Une autre formulation pour un calcul linéaire équivalent a également été proposée par Kausel et Assimaki, [2]. Dans cette approche, le spectre de fréquence de la distorsion au centre de chaque couche de sol est considéré pour la détermination des propriétés dynamiques équivalentes du sol. Cela signifie que les courbes de dégradation sont évaluées à un niveau de distorsion différent pour chaque fréquence. Kausel et Assimaki, [2] ont démontré que cette approche fournit des résultats plus réalistes comparativement aux mouvements sismiques enregistrés.

Dans le cadre de ce travail, nous présentant un code informatique libre (opens-source) développé sous le logiciel Matlab, [3]. En utilisant une formulation matricielle des fonctions d'amplifications à l'aide de la méthode des couches minces « Thin Layer Method, TLM » et en bénéficiant des modules Matlab dédiés à la création des graphes, la gestion des opérations du pré processeur et post processeur devient plus que jamais facile et robuste. En conséquence, le code développé permet le traitement simultané d'un très grand nombre de profils de sol, chose qui fait défaut dans d'autres logiciels de calcul tels que SHAKE2000, [4], EERA code, [5], STRATA, [6] et DEEPSOIL, [7]. Ces derniers ne sont pas des logiciels libres.

Il convient de noter qu'il existe également un certain nombre de codes informatiques open-source dédiés aux études sismiques de sites,

similaires au code développé dans ce travail. Nous citons à titre d'exemple : DYNEQ, [8], YUSAYUSA-2, [9] et SEISMOSOIL, [10]. La question qui se pose a priori est la suivante : pourquoi encore un autre code de calcul malgré la surabondance de ce type de code ? La réponse la plus évidente est que même les codes déjà existants nécessitent quelques modifications et adaptations en vue de les ajuster à des problèmes pratiques nécessitant le traitement simultané de beaucoup de données. Parmi ces problèmes, la détermination de l'accélération sismique d'un très grand nombre de profils de sol uniformément répartis dans une zone géographique bien délimitée, afin de pouvoir tracer les cartographies d'iso-accélération en surface (Figure 2). Ce type d'application constitue une étape importante dans une étude de micro zonage sismique à l'échelle régionale (une wilaya ou un chef-lieu de wilaya).

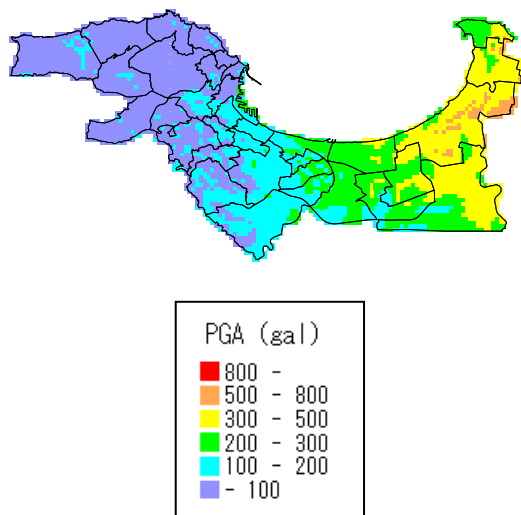


Figure 2 : Distribution de l'accélération de pic au sol à la surface de sol - Séisme de scénario de Thenia, [11].

Figure 2: Distribution of peak ground acceleration at the ground surface -Thenia scenario earthquake, [11].

2- Modélisation du sol par la méthode des couches minces (TLM)

Les ingénieurs en génie parasismique ont depuis longtemps adopté la pratique courante consistant à recourir à la théorie de propagation linéaire d'ondes pour évaluer les effets des conditions locales des dépôts de sol meubles sur l'amplitude et sur le contenu fréquentiel des mouvements sismiques en surface. En règle générale, les sols sont idéalisés comme étant des

couches horizontales surmontant un substratum rocheux. Les ondes incidentes sont supposées planes se propageant dans une direction bien déterminée à travers le demi-espace rocheux. La plupart des applications pratiques se limitent à l'étude des ondes planes de cisaillement se propageant verticalement, c'est-à-dire « un problème unidimensionnel, 1D ». La solution analytique du problème d'amplification, décrite par Thomson, [12] dès 1950, a fait l'objet de recherches intenses et qui continuent jusqu'à nos jours. Les travaux les plus récents considèrent l'amplification des ondes de volume et des ondes de surface se propageant à différents angles d'incidences dans des milieux hétérogènes, anisotropes et caractérisés par un comportement fortement non linéaire.

Dans le cadre de ce travail, nous utilisons une formulation semi-analytique faisant appel à la méthode des couches minces, TLM, pour une résolution efficace du problème de propagation d'onde unidimensionnelle.

La méthode des couches minces (TLM) est une méthode semi-analytique idéalement adaptée à l'analyse du mouvement vibratoire des ondes dans les milieux stratifiés tels que les profils de sol multicouche. Cette méthode consiste à discrétiser les couches d'un profil de sol dans la direction de la stratification, en sous couches suffisamment minces, ainsi, il est possible de linéariser les fonctions transcendantes incluses dans la matrice de rigidité afin d'aboutir à des expressions algébriques. En règle générale, les couches peuvent être soit plates (c'est-à-dire horizontales, [13, 14] soit structurées en couches cylindriques, [15] ou sphériques, [16]. Les couches de fluide, ([17, 18, 19, 20] et les couches poroélastiques, [21] peuvent également être considérées.

Depuis son avènement au début des années 1970, [22, 23], [14]), la TLM a été largement utilisée dans la dynamique des sols et l'interaction sol-structure, [24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31], les méthodes d'identification non destructives, les simulations de sources sismiques, [32], la propagation des ondes dans les matériaux stratifiés et anisotropes, [33], les ondes dans les matériaux piézoélectriques, [34], la diffusion de la chaleur dans les composites stratifiés, [35], la consolidation dans les milieux poroélastiques, [36], l'interaction solide-fluide, [20] et dans de nombreux autres domaines d'application. Bien que les premiers développements de la technique TLM remontent au début des années 1970, la TLM n'est devenue

couramment utilisée que depuis le début des années 1990. À l'origine, la TLM était limitée à des domaines bornés, tels que des couches reposant sur une base rigide (c'est-à-dire substratum rocheux), mais rapidement, les frontières paraxiales (PB) sont devenues disponibles, ce qui a permis de simuler des domaines bornés, [37, 38, 39]. Un bref compte rendu historique est donné dans [16].

2.2- Dans le cas linéaire

L'équation d'équilibre dynamique d'un profil de sol multicouche (Figure 3) est donnée comme suit [40]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} - \mathbf{A} \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial x^2} + \mathbf{G}\mathbf{U} = \mathbf{P} \quad (1)$$

où les matrices $\mathbf{M}$, $\mathbf{A}$ et $\mathbf{G}$ sont des matrices symétriques qui dépendent des caractéristiques mécaniques et géométriques des couches (module de cisaillement, coefficient de poisson, masse volumique, etc.), [13].

Pour des ondes SH planes se propageant à l'intérieur d'un demi-espace suivant un angle d'incidence θ par rapport à la verticale, le nombre d'ondes horizontales est défini comme suit, [32]:

$$k = \frac{\omega \sin \theta}{C_s} \rightarrow k^2 = \frac{\omega^2 \sin^2 \theta}{C_s^2} \rightarrow \frac{\partial^2}{\partial x^2} = \frac{\sin^2 \theta}{C_s^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \quad (2)$$

avec ω la fréquence d'excitation et C_s la vitesse de propagation d'ondes SH.

En substituant l'équation (2) dans l'équation (1) on aboutit à :

$$\mathbf{M}_{eqv} \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{G}\mathbf{U} = \mathbf{P} \quad (3)$$

D'où :

$$\mathbf{M}_{eqv} = \mathbf{M} - \frac{\sin^2 \theta}{C_s^2} \mathbf{A} \quad (4)$$

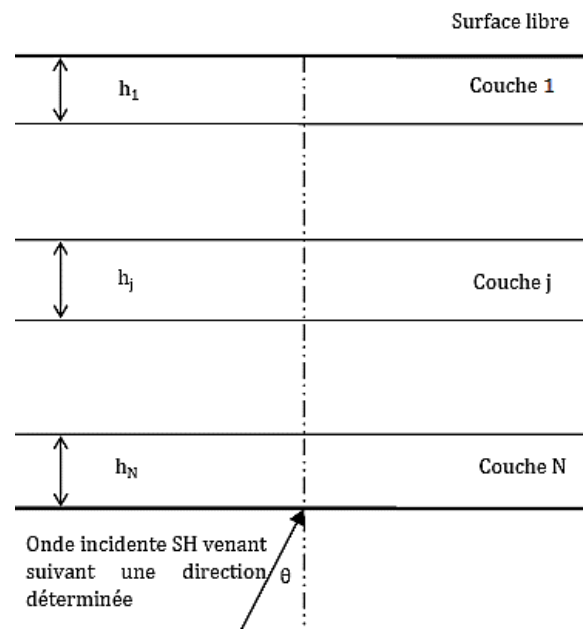


Figure 3 : Profil de sol multicouche.

Figure 3 : Multilayered soil profile.

Dans le domaine fréquentiel, l'équation (3) s'écrit comme suit :

$$(\mathbf{G} - \omega^2 \mathbf{M}_{eqv}) \bar{\mathbf{U}} = \bar{\mathbf{P}} \quad (5)$$

Les ondes SH incidentes induisent un déplacement à l'interface du demi-espace, donc il est possible de modéliser l'effet des ondes incidentes par un vecteur chargement fictif $\bar{\mathbf{P}}$ induisant le même déplacement et qui est défini comme suit :

$$\bar{\mathbf{P}}^T = [0 \quad 0 \quad \dots \quad \bar{P}_{N+1}] \quad (6)$$

où $\bar{P}_{N+1}$ est la force développée à l'interface du demi-espace et qui s'exprime ainsi [41]:

$$\bar{P}_{N+1} = K_0 \bar{u}_{N+1} \quad (7)$$

où K_0 est l'impédance exacte du demi-espace sujet la propagation d'ondes SH, [41].

$$K_0 = G_s \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{C_s^2}} \quad (8)$$

où : G_s est le module de cisaillement du demi-espace.

Le vecteur déplacement $\bar{U}$ est obtenu par inversion de la matrice $(\mathbf{G} - \omega^2 \mathbf{M}_{eqv})$. Par définition, la fonction d'amplification entre deux points d'un système linéaire est le rapport des amplitudes exprimées dans le domaine fréquentiel des mouvements de ces deux points. Donc, pour un profil de sol multicouche le vecteur d'amplification $\bar{A}(\omega)$ est défini par :

$$\bar{A}(\omega) = \frac{\bar{U}}{\bar{u}_{N+1}} \quad (9)$$

Le vecteur d'amplification $\bar{A}(\omega)$ est le rapport entre le vecteur déplacement à l'interface de chaque sous-couche du profil et le vecteur déplacement à l'interface du demi-espace.

$$\bar{A}^T = [\bar{A}_1 \bar{A}_2 \dots \bar{A}_N] \quad (10)$$

où les $\bar{A}_i$ sont les fonctions d'amplification entre l'interface du demi-espace et l'interface supérieure de la couche i .

où les $\bar{A}_i$ sont les fonctions d'amplification entre l'interface du demi-espace et l'interface supérieure de la couche i .

Un amortissement matériel de nature hystérétique a lieu à cause des frottements internes au sein des matériaux granulaires. Ainsi, les propriétés viscoélastiques du sol sont mathématiquement traduites en substituant les coefficients de Lamé λ et G par des modules complexes :

$$G^* = G(1 + 2i\xi) \text{ et } \lambda^* = \lambda(1 + 2i\xi) \quad (11)$$

où ξ = le coefficient d'amortissement matériel du sol et $i^2 = -1$ est l'unité imaginaire.

Il est également important de souligner, qu'une solution discrète diverge lorsque la longueur d'onde de cisaillement λ_s devient inférieure à quatre fois l'épaisseur de la sous-couche, [42]. Si par exemple, on considère des ondes de cisaillement planes de fréquence f se propageant avec une vitesse de cisaillement C_s la longueur d'onde λ_s s'exprimera ainsi :

$$\lambda_s = \frac{2\pi C_s}{\omega} = \frac{C_s}{f} \quad (12)$$

Ainsi, pour une interpolation linéaire, la condition de convergence est la suivante :

$$h \leq \frac{\lambda_s}{4} \Rightarrow h \leq \frac{C_s}{4f} \quad (13)$$

2.2- Dans le cas linéaire équivalent

Bien qu'il soit possible d'effectuer des analyses dynamiques non-linéaires, dans lesquelles les propriétés du sol sont actualisées en fonction de la trajectoire du chargement et des niveaux instantanés de distorsion, de telles analyses ne sont pratiquement utilisées dans la pratique que dans quelques cas exceptionnels. Au lieu de cela, des solutions linéaires approximatives sont obtenues par un schéma itératif proposé à l'origine par Seed et Idriss, [1]. Chaque itération suppose des valeurs constantes des propriétés du sol pendant le séisme, mais les propriétés sont choisies au début de chaque itération de manière à être compatibles avec les niveaux de distorsion calculés lors de la dernière itération (Figure 4). Ces niveaux de distorsion sont généralement mesurés au moyen d'une distorsion caractéristique, qui correspond soit au premier pic, soit à la valeur moyenne quadratique de la distorsion principale de cisaillement. Bien que la théorie linéaire et la solution itérative ne fournissent pas de solutions exactes et que leur champ d'application soit limité, elles donnent des résultats acceptables pour les besoins de la pratique. SHAKE2000 est le programme informatique le plus connu utilisant ces procédures.

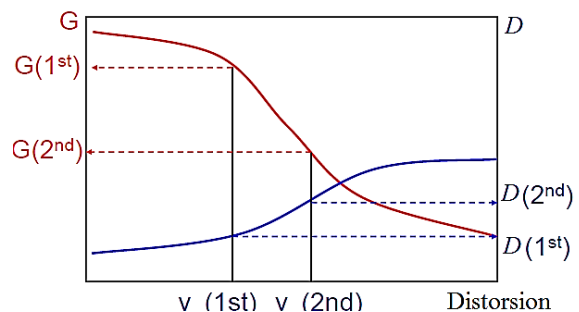


Figure 4 : Valeur de (G) et (D) à chaque itération en fonction de la distorsion γ

Figure 4: Value of (G) and (D) at each iteration versus strain γ

Les propriétés dynamiques des sols sont généralement représentées par la variation du module de cisaillement équivalent (G_{eq}), normalisé au module de cisaillement maximal (G_0) et du rapport d'amortissement (D) avec l'amplitude de la distorsion cyclique en cisaillement (γ_c).

Depuis le début des années 1970, des recherches considérables ont été entreprises pour étudier l'influence de divers facteurs sur les propriétés dynamiques des sols. Les paramètres clés identifiés sur la base des résultats d'essais en laboratoire sont γ_c , le type de sol, l'indice de plasticité (IP), la contrainte de confinement effective moyenne (P' ou σ'_m), la fréquence de chargement (f), le nombre de cycles de chargement (N) du sol. Nous pouvons citer à titre d'exemple les travaux de : Darendeli [43], Mortezaie and Vucetic [44, 45]. Récemment, une étude expérimentale consacrée à l'étude des propriétés dynamiques des marnes du Plaisancien d'Alger sur une large gamme de distorsion a été entreprise par Badr et al., [46, 47].

3- Présentation du code SEQRA

Dans ce travail, un code informatique a été développé sous Matlab. Il s'agit d'un « Toolbox » regroupant un certain nombre de fonctions. Après avoir préparé le fichier de données regroupant les informations nécessaires concernant les profils de sol et les accélérogrammes, l'exécution est lancée par un simple appel de la fonction Matlab appelé « SEQRA », comme suit : `>>SEQRA('Data')`

SEQRA est l'abréviation de : « Soil Earthquake Response Analysis ». « Data » : est le nom du fichier de données en format Microsoft Excel.

La démarche de résolution du problème posé pour un calcul linéaire se résume aux étapes suivantes :

1. Définition du niveau d'accélération sismique au rocher en termes d'un ou de plusieurs accélérogrammes ;
2. Calcul du spectre de Fourier des accélérogrammes considérés via la transformée de Fourier rapide (FFT) ;

3. Subdivision du profil du sol en un nombre suffisant de sous-couches pour vérifier la condition de convergence de la TLM (Eq.12) ;
4. Calcul de la fonction d'amplification du profil ;
5. Calcul du produit de chaque spectre de Fourier par la fonction d'amplification, afin d'aboutir à l'ensemble des spectres de Fourier au niveau de la surface ;
6. Une fois que les spectres de Fourier en surface sont calculés, les accélérogrammes correspondants sont déterminés à travers une transformée de Fourier inverse (iFFT).
7. Calcul des spectres de réponse en surface.

Pour ce qui est du calcul linéaire équivalent, les étapes de calcul sont les suivantes (Figure 5) :

1. Définition du niveau d'accélération sismique du rocher au moyen d'un accélérogramme ;
2. Calcul du spectre de Fourier de l'accélérogramme considéré via la transformée de Fourier rapide (FFT) ;
3. Subdivision du profil de sol en un nombre suffisant de sous-couches pour vérifier la condition de convergence de la TLM (Eq.12). Dans un calcul linéaire équivalent, la subdivision est également prise en compte pour caractériser correctement la variation spatiale des effets inélastiques.
4. Affectation d'un module de cisaillement initial (G_0) et un coefficient d'amortissement initial (D_0) à chaque sous-couche ;
5. Calcul de la fonction d'amplification du profil ;
6. Calcul du produit de chaque spectre de Fourier par la fonction d'amplification, afin d'aboutir à l'ensemble des spectres de Fourier à chaque sous-couche ;
7. Une fois que les spectres de Fourier sont calculés, les accélérogrammes au niveau de chaque interface sont déterminés à travers une transformée de Fourier inverse (iFFT).

Détermination (pour chaque sous-couche) de la distorsion maximale calculée au centre de la couche soit $\gamma_{max} = \max(\gamma(t))$

8. Détermination du niveau de distorsion effective γ_{eff} pour chaque couche. Le niveau de distorsion effective γ_{eff} est généralement défini comme suit : $\gamma_{eff} = 0.65\gamma_{max}$ [4] ;
9. Évaluation du module équivalent (G_{eq}) et du coefficient d'amortissement (D_{eq}) pour chaque sous-couche correspondant à la distorsion effective puis, modification du profil du sol en conséquence (Figure 4).
10. Comparaison des valeurs de distorsion maximale au centre de chaque sous-couche avec leurs valeurs dans l'itération précédente. Répétition des étapes 4 à 10 si nécessaire jusqu'à ce que la solution converge ;

11. Une fois que les spectres de Fourier en surface sont calculés, les accélérogrammes correspondants sont déterminés à travers une transformée de Fourier inverse (iFFT) ;
12. Calcul du spectre de réponse en surface.

Il est à noter que si nous souhaitons calculer la réponse de 10 profils de sol pour 10 accélérogrammes différents, nous devons traiter 100 problèmes individuellement. Cependant, le code SEQRA est bien adapté à de tels problèmes. Avec SEQRA, il est possible de traiter les 100 problèmes en une seule fois. De plus, il est possible de calculer le spectre moyen et de fournir d'autres informations statistiques sans aucun effort supplémentaire.

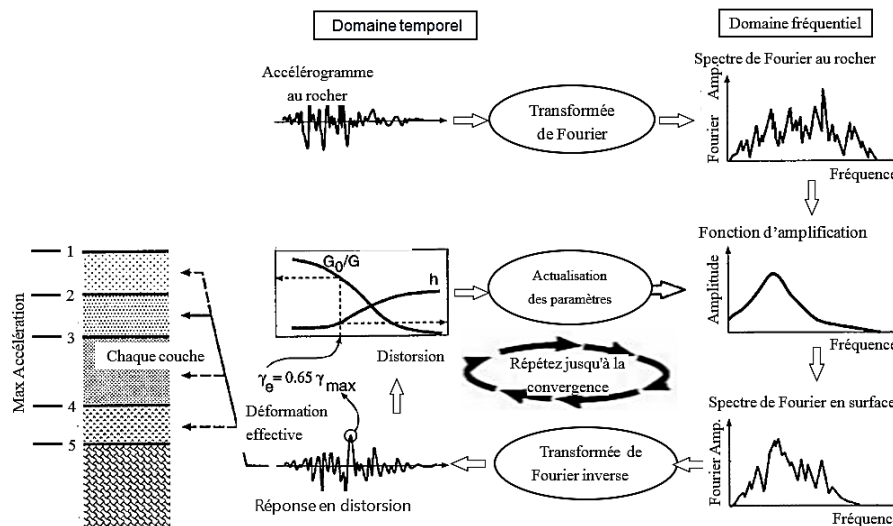


Figure 5 : Séquence des opérations de calcul.

Figure 5: Sequence of calculation operations.

4-Validation du code développé

Dans l'exemple ci-dessous, nous comparons les résultats obtenus avec le code SEQRA avec ceux obtenus par SAHKE2000 et DEEPSOIL. Dans cet exemple, on considère un profil de sol constitué de deux couches de natures différentes reposant sur un substratum rocheux. Les propriétés mécaniques et géométriques des couches constituant le profil ainsi que le substratum rocheux sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Propriétés mécaniques et géométriques du profil de sol.

Table 1: Mechanical and geometric properties of the soil profile

Colonne 01	Vitesse (m/s)	Masse volumique (Kg/m ³)	Coefficient d'amortissement	Épaisseur de la couche (m)
C 01	150	1800	0.05	1
C 02	500	2000	0.05	27
Demi-espace	800	2400	0.01	INF

Dans ce qui suit, nous calculons la réponse sismique en surface libre du profil de sol représentant le site. Nous procédons à un calcul linéaire équivalent. Nous utilisons dans cet exemple l'accélérogramme enregistré sur un affleurement rocheux lors du séisme de Chi-Chi à Taiwan (composante E-W de la station HWA003). L'accélérogramme est présenté dans la (Figure 6). L'accélération maximale de cet accélérogramme est calibrée à 0.30g.

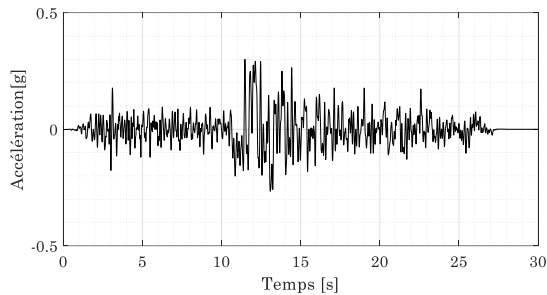


Figure 6 : Accélérogramme de la station "HWA003" calibré à 0.30g, appliqué au niveau du substratum rocheux.

Figure 6 : Acceleration time history of "HWA003" station scaled at 0.30g.

Le spectre de Fourier de l'accélérogramme de la station "HWA003", ainsi que sa forme lissée sont présentés dans la Figure 7.

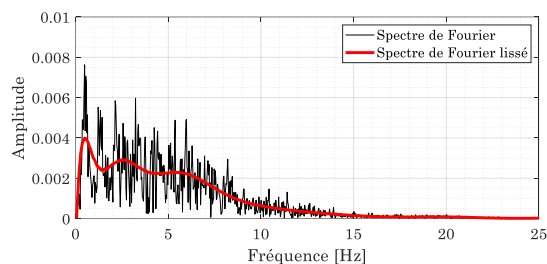


Figure 7 : Spectre de Fourier de l'accélérogramme de la station "HWA003".

Figure 7: Fourier spectrum of the acceleration time history of «HWA003» station.

Il convient de noter que l'accélérogramme de la station "HWA003" est riche en fréquences dans la bande de fréquences [1.5 Hz, 10 Hz].

Les courbes de réduction utilisées dans cet exemple sont représentées dans la Figure 8.

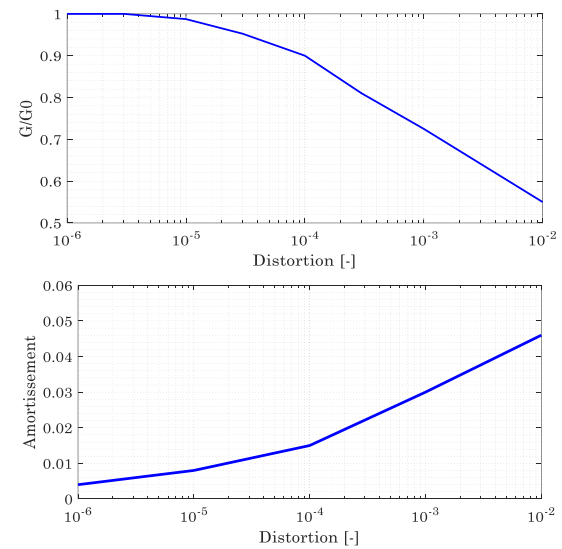


Figure 8 : Courbes de réduction du module de cisaillement et d'augmentation de l'amortissement pour des grès [1].

Figure 8 : Shear modulus reduction and damping increase curves for sandstone [1].

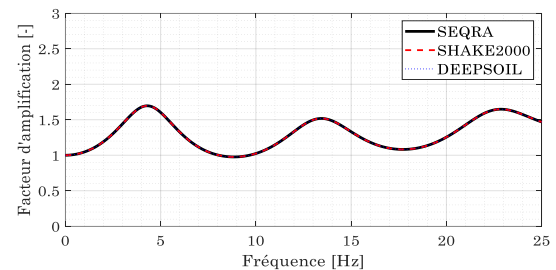


Figure 9 : Fonction d'amplification linéaire (Première itération).

Figure 9 : Linear amplification function (First iteration).

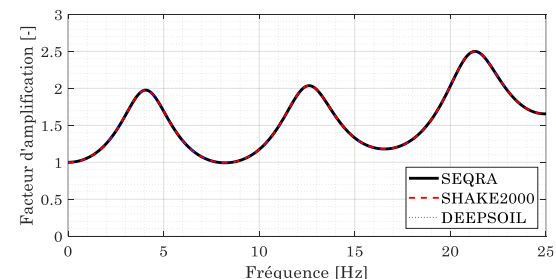


Figure 10 : Fonction d'amplification finale (dernière itération).

Figure 10 : Final amplification function (last iteration).

Les figures 9 et 10 présentent les fonctions d'amplification pour la première et la dernière itération respectivement. Pour la première itération, les propriétés initiales (Tableau 1) sont utilisées dans les calculs, ce qui correspond à un calcul linéaire. Cependant, la dernière itération correspond également à un calcul linéaire, mais avec les propriétés équivalentes compatibles avec le niveau de distorsion au centre de chaque sous-couche. Le processus de calcul s'arrête lorsque la solution converge, c'est-à-dire que la distorsion devient constante dans deux itérations successives.

On remarque sur la Figure 10 qu'un pic apparaît au voisinage de 22 Hz. L'apparition de ce pic s'explique par le fort contraste entre la première et la deuxième couche et la faible valeur de l'amortissement équivalent qui est de l'ordre de 1.4% (Figure 12).

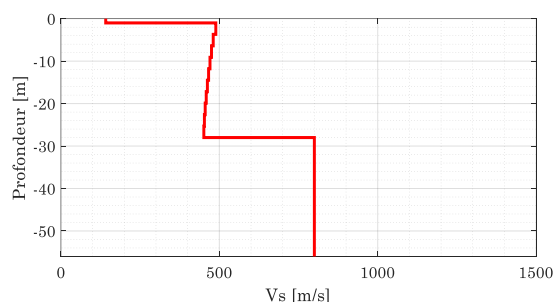


Figure 11 : Vitesse de cisaillement équivalente (correspondant à la dernière itération) en fonction de la profondeur.

Figure 11: Equivalent shear wave velocity (for the last iteration) as a function of depth.

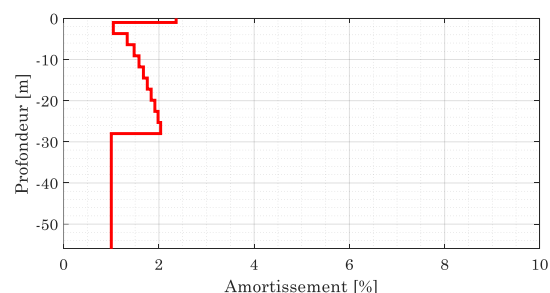


Figure 12 : Coefficient d'amortissement équivalent (correspondant à la dernière itération) en fonction de la profondeur.

Figure 12 : Equivalent damping ratio (for the last iteration) as a function of depth.

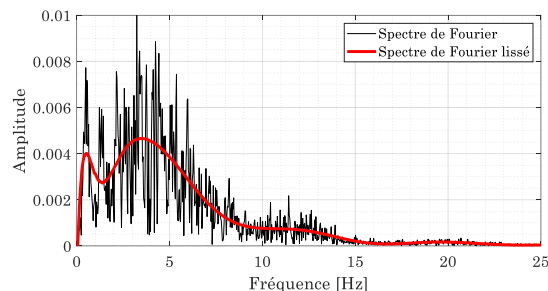


Figure 13 : Spectre de Fourier en surface.

Figure 13 : Surface Fourier spectrum.

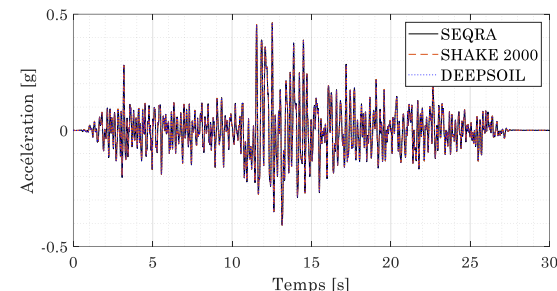


Figure 14 : Réponse en surface.

Figure 14 : Surface response acceleration.

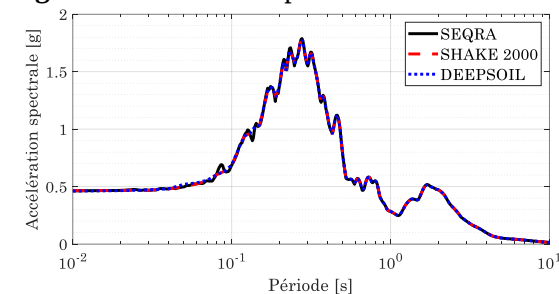


Figure 15 : Spectre de réponse en surface.

Figure 15 : Surface response spectrum.

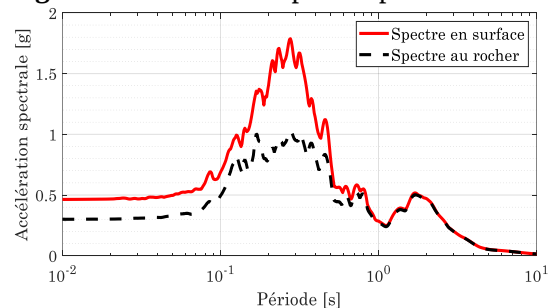


Figure 16 : Spectre de réponse en surface.

Figure 16 : Surface response spectrum.

À travers les résultats obtenus (Figure 9, Figure 10, Figure 14 et Figure 15), il ressort qu'il y a une parfaite concordance entre les résultats obtenus par SEQRA et les résultats obtenus soit par SHAKE2000 soit par DEEPSOIL, ce qui valide le code développé.

5-Exemple d'application

La présente section concerne l'étude de micro zonage sismique d'un site recevant un ouvrage stratégique situé au Nord de l'Algérie. La zone est caractérisée par une forte sismicité.

5.1- Sélection des accélérogrammes

Le choix de l'excitation à la base (l'input) est une étape importante dans le calcul de la réponse sismique du profil. Nous avons

sélectionné 42 accélérogrammes réels choisis dans la base de données internationale et enregistrés sur un affleurement rocheux. Le choix de ces accélérogrammes est justifié par le fait qu'ils sont conformes à la région d'étude. Leur contenu fréquentiel, renfermant les fréquences fondamentales du profil de sol retenu et représentant le site, justifie aussi leur utilisation. L'accélération maximale de ces accélérogrammes est calibrée à 0.35g. Cette dernière valeur est le résultat de l'étude d'aléa sismique du site et sa région avoisinante pour une période de retour de 500 ans.

Tableau 2 : Liste des accélérogrammes sélectionnés pour l'étude sismique de site

Table 2 : List of the time history acceleration record selected for the seismic site analysis.

Earthquake Name	Year	Station Name	Magnitude	Mechanism	Rjb (km)	Rrup (km)	Vs30 (m/sec)
"Coyote Lake"	1979	"Gilroy Array #1"	5.74	strike slip	10.21	10.67	1428.14
"Morgan Hill"	1984	"Gilroy Array #1"	6.19	strike slip	14.9	14.91	1428.14
"Landers"	1992	"Lucerne"	7.28	strike slip	2.19	2.19	1369.0
"Kobe_ Japan"	1995	"Kobe University"	6.9	strike slip	0.9	0.92	1043.0
"Tottori_ Japan"	2000	"OKYH07"	6.61	strike slip	15.23	15.23	940.2
"Tottori_ Japan"	2000	"SMNH10"	6.61	strike slip	15.58	15.59	967.27
"Parkfield-02_ CA"	2004	"PARKFIELD - TURKEY FLAT "	6.0	strike slip	4.66	5.29	906.96
"San Fernando"	1971	"Pacoima Dam (upper left abut)"	6.61	Reverse	0.0	1.81	2016.13
"San Fernando"	1971	"Pasadena - Old Seismo Lab"	6.61	Reverse	21.5	21.5	969.07
"Whittier Narrows-01"	1987	"LA - Wonderland Ave"	5.99	Reverse Oblique	23.4	27.64	1222.52
"Whittier Narrows-01"	1987	"Pasadena - CIT Kresge Lab"	5.99	Reverse Oblique	6.78	18.12	969.07
"Whittier Narrows-01"	1987	"Vasquez Rocks Park"	5.99	Reverse Oblique	47.25	50.39	996.43
"Loma Prieta"	1989	"Gilroy Array #1"	6.93	Reverse Oblique	8.84	9.64	1428.14
"Northridge-01"	1994	"LA - Wonderland Ave"	6.69	Reverse	15.11	20.29	1222.52
"Northridge-01"	1994	"Pacoima Dam (downstr)"	6.69	Reverse	4.92	7.01	2016.13
"Northridge-01"	1994	"Pacoima Dam (upper left)"	6.69	Reverse	4.92	7.01	2016.13
"Northridge-01"	1994	"Vasquez Rocks Park"	6.69	Reverse	23.1	23.64	996.43
"Sierra Madre"	1991	"Vasquez Rocks Park"	5.61	Reverse	37.63	39.81	996.43
"Chi-Chi_ Taiwan-05"	1999	"HWA003"	6.2	Reverse	49.84	50.44	1525.85
"Loma Prieta"	1989	"Los Gatos - Lexington Dam"	6.93	Reverse Oblique	3.22	5.02	1070.34
"San Simeon_ CA"	2003	"Diablo Canyon "	6.52	Reverse	37.92	37.97	1100.0

5.2-Modèles de sol modélisant le site

Le site est constitué essentiellement d'une lithologie conforme au contexte géologique de la région d'étude. On distingue la succession des terrains suivants : remblais de surface, argiles sableuses graveleuses de couleur rougeâtre plus ou moins denses suivis par des sables fins à grossier intercalés par des fragments de grès et parfois par des bancs d'épaisseur variable. Cet ensemble surmonte des marnes légèrement sableuses devenant compactes et fermes en profondeur. L'analyse approfondie des différents logs de sondages, des variations des caractéristiques mécaniques et géophysiques, combinée à des considérations de fiabilité et de sécurité nous a permis de retenir les deux modèles de site (Figure 18 et Figure 19). Les couches qui constituent le premier modèle sont celles décrites dans les logs de sondages. La géométrie des couches du sous-sol du modèle 01 suit parfaitement le profil sismique (Down Hole). Pour ce qui est du deuxième modèle, il est en bicouche ayant une profondeur de 28m. Le choix de limiter le modèle à cette profondeur est basé sur le fait que la vitesse enregistrée dépasse les 600m/s, c-à-d. qu'on a atteint le substratum de l'ingénieur « en anglais : Engineering Bedrock ». Le substratum de l'ingénieur peut être défini comme une couche de sol très épaisse avec une vitesse d'onde de cisaillement d'environ 700 m/s [48, 49, 50, 51]. Au Japon, le substratum rocheux de l'ingénieur présente des vitesses allant de 400 à 750 m/s. En Algérie, les couches de sol présentant des valeurs de vitesse d'ondes de cisaillement de 600 m/s sont considérées comme substratum de l'ingénieur, [11].

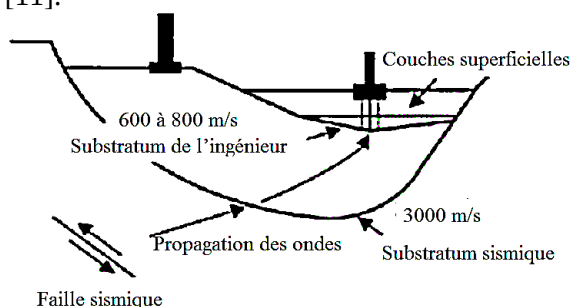


Figure 17 : Substratum sismique et substratum de l'ingénieur.

Figure 17: Seismic Bedrock and Engineering Bedrock

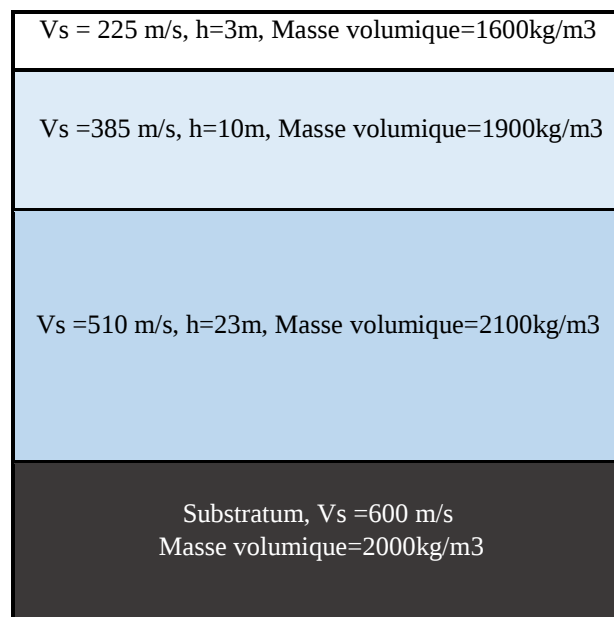


Figure 18 : Premier modèle du profil de sol.

Figure 18 : First soil profile model.

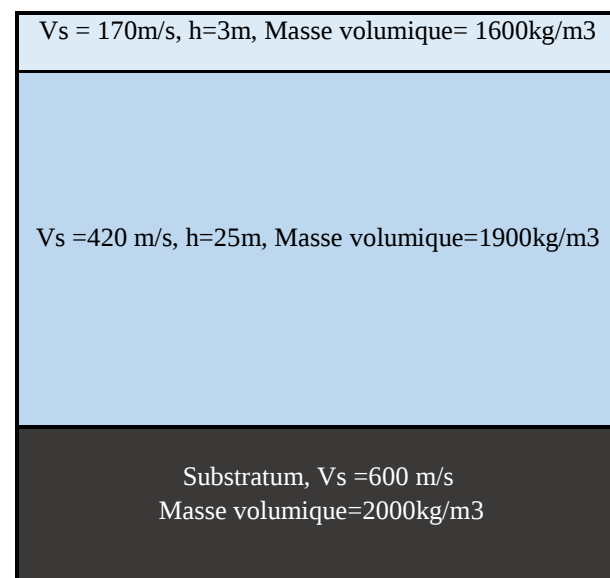


Figure 19 : Deuxième modèle du profil de sol.

Figure 19 : Second soil profile model.

5.3-Courbes de dégradation

Les courbes de réduction du module de cisaillement et de l'augmentation de l'amortissement utilisées dans la présente étude sont présentées dans les figures ci-dessous.

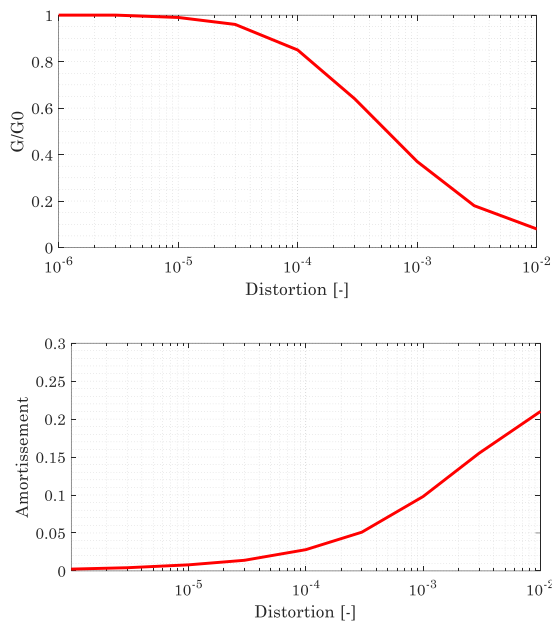


Figure 20 : Courbes de réduction du module de cisaillement et d'augmentation de l'amortissement pour des sables [1].

Figure 20 : Shear modulus reduction and material damping curves for sands [1].

5.4-Résultats de calcul et spectre de site

En se basant sur les deux modèles présentés sur les Figure 18 et 19, la fonction d'amplification est déterminée. Elle est montrée sur les figures 21 et 22 respectivement. Il ressort des courbes tracées que la première fréquence fondamentale du modèle retenu est autour de 3.7Hz. Aussi, de hautes fréquences (>7 Hz) ayant des amplitudes plus importantes que celles du premier mode sont apparues.

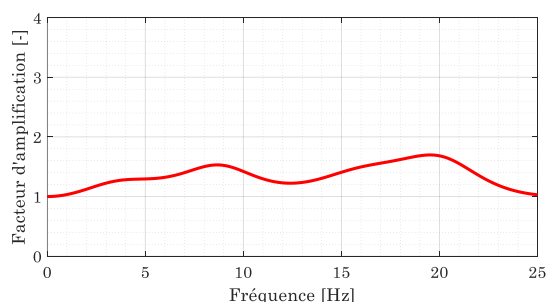


Figure 21 : Fonction d'amplification du modèle 01 (première itération).

Figure 21 : Amplification function of the first model (first iteration).

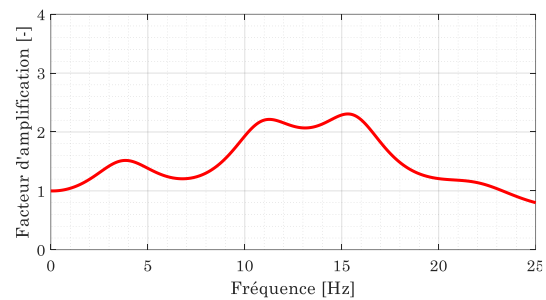


Figure 22 : Fonction d'amplification du modèle 02 (première itération).

Figure 22 : Amplification function for the second model (first iteration).

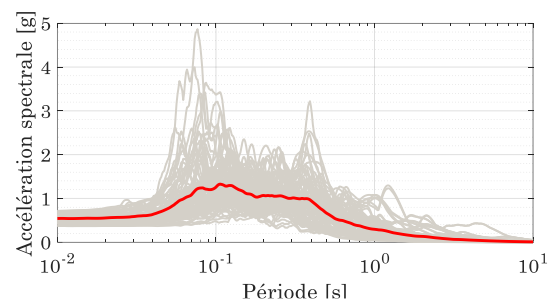


Figure 23 : 85 spectres de réponse calculés en considérant une accélération maximale de 0.35g au rocher.

Figure 23 : 85 response spectra computed by considering 0.35g at the bedrock.

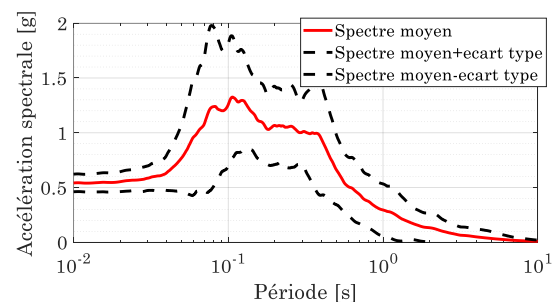


Figure 24 : Spectres de réponse, moyenne et moyenne +/- écart type calculés en considérant une accélération maximale de 0.35g au rocher.

Figure 24 : Response spectra, mean and mean +/- standard deviation calculated computed by considering 0.35g at the bedrock.

A partir des réponses en surface des deux modèles de sol (modèles 01 et 02) aux 84 composantes d'accélérogrammes utilisées, les spectres de réponse à la surface libre pour un amortissement de 5% ont été calculés et montrés sur la figure 23. Le spectre moyen et moyen $\pm$ écart type sont montrés dans la figure 23. La figure 25 présente une comparaison entre le spectre de réponse moyen au rocher et le spectre de réponse moyen en surface. Cette dernière comparaison nous permet d'apprécier l'effet de site.

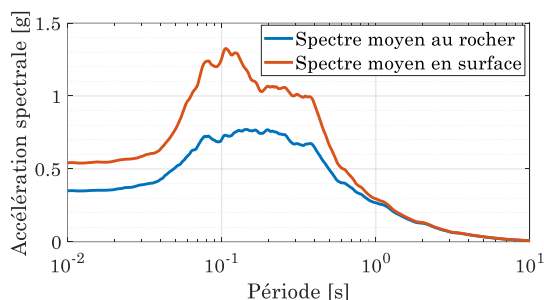


Figure 25 : Comparaison entre le spectre moyen au rocher et le spectre moyen en surface.

Figure 25 : Comparison between the average spectrum at the bedrock and the average spectrum at the surface.

Tableau 3 : Synthèse des résultats obtenus.

Table 3 : Summary of the obtained results.

PGA moyen en surface [g] (Model 01)	0.52
PGA moyen en surface [g] (Model 02)	0.56
PGA moyen en surface [g] (Les deux modèles)	0.54
Facteur de site (S) (PGA surface/PGA rocher)	1.55

Les détails des résultats relatifs à chaque modèle et à chaque séisme sont donnés en annexe.

En conclusion, l'accélération au sol (à la surface) du site à prendre dans les calculs (design) est la valeur moyenne de toutes les réponses en surface. Si nous considérons la valeur d'accélération au rocher de 0.35g donnée dans l'étude d'aléa sismique, l'accélération en surface en moyenne est de 0.54g. Nous estimons le facteur d'amplification de site « S » en rapportant l'accélération maximale au sol à l'accélération au rocher et qui est égal à 1.55.

6-Conclusions

Le code SEQRA offre un certain nombre d'avantage pour le public notamment pour les étudiants et praticiens de bureaux d'études tels que :

- Le code est libre (Open source), c.à.d. un code dont l'utilisation, l'étude, la modification et la duplication par autrui en vue de sa diffusion sont permises, techniquement et légalement, ceci afin de garantir certaines libertés induites, dont le contrôle du programme par l'utilisateur et la possibilité de partage entre individus.
- Spécialement adapté aux études sismiques de site et aux études de micro zonage sismiques. Le code est capable de traiter n'importe quel nombre de profils de sol sollicités par n'importe quel nombre d'accélérogrammes.
- Grâce aux fonctionnalités de Matlab, la gestion des opérations du préprocesseur et post-processeur devient plus que jamais facile et robuste. Un seul fichier de données en format Microsoft Excel est requis, alors que les fichiers résultats sont organisés en plusieurs dossiers et sous-dossiers fournissant des fichiers numériques ou des fichiers en extension exploitable par Matlab.

Le code SEQRA est distribué sous la licence publique générale GNU qui peut être trouvée ici : <http://www.gnu.org/licenses/>.

Malgré qu'aucun problème n'ait été signalé par les utilisateurs, le code de calcul SEQRA étant toujours en cours de développement, l'auteur ne peut assumer aucune responsabilité quant aux résultats du logiciel.

Annexe

Les résultats détaillés de l'exemple traité dans la section 5 sont :

PGA RSN146_COYOTELK_G01230.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.63
PGA RSN455_MORGAN_G01230.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.56
PGA RSN879 LANDERS_LCN260.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.46
PGA RSN1108_KOBE_KBU000.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.43
PGA RSN3925_TOTTORI_OKYH07NS.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.6
PGA RSN3954_TOTTORI_SMNH10NS.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.52
PGA RSN4083_PARK2004_36529270.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.47
PGA RSN146_COYOTELK_G01320.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.54
PGA RSN455_MORGAN_G01320.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.54
PGA RSN879 LANDERS_LCN345.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.56
PGA RSN1108_KOBE_KBU090.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.46
PGA RSN3925_TOTTORI_OKYH07EW.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.63
PGA RSN3954_TOTTORI_SMNH10EW.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.5
PGA RSN4083_PARK2004_36529360.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.46
PGA RSN77_SFERN_PUL164.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.56
PGA RSN80_SFERN_PSL180.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.51
PGA RSN643_WHITTIER.A_A-WON075.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.54
PGA RSN680_WHITTIER.A_A-KRE090.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.46
PGA RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.48
PGA RSN765_LOMAP_G01000.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.61
PGA RSN1011_NORTHR_WON095.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.52
PGA RSN1050_NORTHR_PAC175.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.52
PGA RSN1051_NORTHR_PUL104.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.48
PGA RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.55
PGA RSN1649_SMADRE_VAS000.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.53
PGA RSN2996_CHICHI.05_HWA003N.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.51
PGA RSN3548_LOMAP_LEX000.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.37
PGA RSN8167_SANSIMEO_DCPP337.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.47
PGA RSN77_SFERN_PUL254.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.44
PGA RSN80_SFERN_PSL270.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.49
PGA RSN643_WHITTIER.A_A-WON165.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.57
PGA RSN680_WHITTIER.A_A-KRE360.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.51
PGA RSN703_WHITTIER.A_A-VAS090.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.59
PGA RSN765_LOMAP_G01090.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.58
PGA RSN1011_NORTHR_WON185.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.53
PGA RSN1050_NORTHR_PAC265.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.45
PGA RSN1051_NORTHR_PUL194.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.68
PGA RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.56
PGA RSN1649_SMADRE_VAS090.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.43
PGA RSN2996_CHICHI.05_HWA003W.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.51
PGA RSN3548_LOMAP_LEX090.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.37

PGA RSN8167_SANSIMEO_DCPP247.AT2 en surface [g]	Modèle (01)	0.46
PGA RSN146_COYOTELK_G01230.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.71
PGA RSN455_MORGAN_G01230.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.67
PGA RSN879 LANDERS_LCN260.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.61
PGA RSN1108_KOBE_KBU000.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.43
PGA RSN3925_TOTTORI_OKYH07NS.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.66
PGA RSN3954_TOTTORI_SMNH10NS.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.64
PGA RSN4083_PARK2004_36529270.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.58
PGA RSN146_COYOTELK_G01320.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.59
PGA RSN455_MORGAN_G01320.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.55
PGA RSN879 LANDERS_LCN345.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.66
PGA RSN1108_KOBE_KBU090.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.51
PGA RSN3925_TOTTORI_OKYH07EW.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.71
PGA RSN3954_TOTTORI_SMNH10EW.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.55
PGA RSN4083_PARK2004_36529360.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.55
PGA RSN77_SFERN_PUL164.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.56
PGA RSN80_SFERN_PSL180.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.54
PGA RSN643_WHITTIER.A_A-WON075.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.72
PGA RSN680_WHITTIER.A_A-KRE090.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.52
PGA RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.57
PGA RSN765_LOMAP_G01000.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.62
PGA RSN1011_NORTHR_WON095.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.6
PGA RSN1050_NORTHR_PAC175.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.62
PGA RSN1051_NORTHR_PUL104.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.47
PGA RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.6
PGA RSN1649_SMADRE_VAS000.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.57
PGA RSN2996_CHICHI.05_HWA003N.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.47
PGA RSN3548_LOMAP_LEX000.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.4
PGA RSN8167_SANSIMEO_DCPP337.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.52
PGA RSN77_SFERN_PUL254.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.48
PGA RSN80_SFERN_PSL270.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.49
PGA RSN643_WHITTIER.A_A-WON165.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.5
PGA RSN680_WHITTIER.A_A-KRE360.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.7
PGA RSN703_WHITTIER.A_A-VAS090.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.61
PGA RSN765_LOMAP_G01090.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.56
PGA RSN1011_NORTHR_WON185.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.54
PGA RSN1050_NORTHR_PAC265.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.43
PGA RSN1051_NORTHR_PUL194.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.68
PGA RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.68
PGA RSN1649_SMADRE_VAS090.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.56
PGA RSN2996_CHICHI.05_HWA003W.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.52
PGA RSN3548_LOMAP_LEX090.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.46
PGA RSN8167_SANSIMEO_DCPP247.AT2 en surface [g]	Modèle (02)	0.44
PGA moyen [g]	---	0.54
Facteur de site (S)	---	1.55

Références bibliographiques

- [1] H. B. Seed and I. M. Idriss, "Influence of soil conditions on ground motions during earthquakes," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, vol. 95, 1969.
- [2] E. Kausel and D. Assimaki, "Seismic simulation of inelastic soils via frequency-dependent moduli and damping," *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, vol. 128, no. 1, pp. 34-47, 2002.
- [3] *MATLAB*, Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc, 2018.
- [4] G. A. ORDONEZ, "SHAKE2000: A computer program for the 1D analysis of geotechnical earthquake engineering problems.," Geomotions, LLC, USA, 2000.
- [5] J. Bardet, K. Ichii and C. Lin, "EERA -A Computer Program for Equivalent-Linear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits," Dept of Civil Eng, University of Southern California, California, 2000.
- [6] A. R. KOTTKE and E. M. RATHJE, "Technical manual for Strata," Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California, 2009.
- [7] Y. Hashash, M. Musgrove, J. Harmon, O. Ilhan, G. Xing, O. Numanoglu, D. Groholski, C. Phillips and D. Park, "DEEPSOIL 7.0, User Manual," Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, 2020.
- [8] N. Yoshida, "A computer program for DYNAMIC response analysis of level ground by EQUIVALENT linear method, Revised in 2004 (version 3.25)," Tohoku Gakuin University, Sendai, Miyagi, Japon, 2004.
- [9] N. Yoshida and I. Towhata, "YUSAYUSA-2 and SIMMDL-2, theory and practice, revised in 2003 (version 2.1)," Tohoku Gakuin University and University of Tokyo, Sendai, Miyagi, Japon, 2003.
- [10] D. Asimaki and J. Shi, "SeismoSoil User Manual, v1.3," 2017.
- [11] JICA, "Report on the seismic risk microzonation of Algiers metropolitan city study," The Japanese International Cooperation Agency, OYO International corp. and the National Centre for Applied Research on Earthquake Engineering (CGS), Algiers, Algeria, 2006.
- [12] W. T. THOMSON, "Transmission of elastic waves through a stratified solid medium," *Journal of applied Physics*, vol. 21, no. 2, pp. 89-93, 1950.
- [13] E. Kausel, "An explicit solution for the Green's functions for dynamic loads in layered media," Cambridge, MA, 1981.
- [14] G. Waas, "Linear two-dimensional analysis of soil dynamics problems in semi-infinite layered media," PhD Thesis, Berkeley, University of California, 1972.
- [15] J. Park, "Point sources in cylindrically laminated rods," S.M Thesis, Cambridge, Massachusetts, Department of Civil and Environmental Engineering, 1998.
- [16] J. Park, "Wave motion in finite and infinite media using the Thin-Layer Method," PhD Thesis, Cambridge, Massachusetts, Department of Civil and Environmental Engineering, MIT, 2002.
- [17] R. Ghibril, "On the partial discretization of coupled plane stratified systems," PhD Thesis, Cambridge, Massachusetts, Department of Civil and Environmental Engineering, MIT, 1992.
- [18] V. Lotfi, J. M. Roësset and J. L. Tassoulas, "A technique for the analysis of the response of dams to earthquakes," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, no. 15, pp. 463-489, 1987.
- [19] H. H. Tan, "Displacement approach for generalized Rayleigh waves in layered solid-fluid media," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 04, no. 76, pp. 1251-1263, 1989.



- [20] C. Tsai, G. Lee and R. Ketter, "A semi-analytical method for time-domain analyses of dam reservoir interactions," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 05, no. 29, pp. 913-933, 1990.
- [21] S. Bougacha, J. Tassoulas and J. Roësset, "Journal of Engineering Mechanics," *Analysis of foundations on fluid-filled poroelastic stratum*, vol. 119, no. 08, pp. 1632-1648, 1993.
- [22] J. Lysmer, "Lumped mass method for Rayleigh waves," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 60, no. 1, pp. 89-104, 1970.
- [23] J. Lysmer and G. Waas, "Shear waves in plane infinite structures," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 98, no. 1, pp. 85-105, 1972.
- [24] J. Tassoulas and E. Kausel, "Elements for the Numerical Analysis of Wave Motion in Layered Strata," *Int. J. Num. Meth. Eng.*, vol. 19, pp. 1005-1032, 1983.
- [25] J. Tassoulas and E. Kausel, "On the Dynamic Stiffness of Circular Ring Footings on an Elastic Stratum," *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech*, vol. 8, pp. 411-426, 1983.
- [26] A. Boumekik, "Fonctions impédances d'une fondation vibrante en surface ou partiellement encastrée dans un sol multicouche," Ph.D. Thesis, Free University of Bruxelles, Bruxelles, 1985.
- [27] M. HADID, "Approche intégrée pour le traitement des problèmes d'interactions multiples entre structures via le sol," Ecole Nationale Polytechnique (ENP), Alger, 2003.
- [28] B. Sbartai, "Réponse dynamique des structures enterrées : application aux fondations adjacentes encastrée," Université de Annaba, Annaba, 2007.
- [29] S. MESSIOUD, "Etude de l'interaction Sol-Fondation 3D Sous Sollicitations Sismiques," جامعة 20 لاوث Thèse de doctorat, 1955, Skikda.
- [30] A. ZAHAFI and M. HADID, "Simplified frequency-independent model for vertical vibrations of surface circular foundations," *World Journal of Engineering*, vol. 16, no. 05, pp. 592-603, 2019.
- [31] R. BENCHARIF, M. HADID et N. MEZOUAR, «Hybrid BEM-TLM-PML method for the dynamic impedance functions calculation of a rigid strip-footing on a nearly saturated poroelastic soil profile,» *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 116, pp. 31-47, 2020.
- [32] E. KAUSEL, «The thin-layer method in seismology and earthquake engineering,» *chez Wave motion in earthquake engineering*, 2000, pp. 193-213.
- [33] E. Kausel, "Wave Propagation in Anisotropic Layered Media," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 23, pp. 1567-1578, 1986.
- [34] A. Chakraborty, S. .. Gopalakrishnan and E. Kausel, "Wave propagation analysis in inhomogeneous piezo-composite layer by the thin-layer method," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 64, pp. 567-598, 2005.
- [35] A. E. Joanni and E. Kausel, "Heat diffusion in layered media via the thin-layer method," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 78, no. 6, pp. 692-712, 2009.
- [36] M. Badaoui, A. Nour, A. Slimani and M. K. Berrah, "Consolidation statistics investigation via thin layer method analysis," *Transport in porous media*, vol. 67, no. 1, pp. 69-91, 2007.
- [37] S. Seale and E. Kausel, "Dynamic loads in layered halfspaces," *Proceedings, Fifth Engineering Mechanics Division Specialty Conference, ASCE, I, 201-204, Laramie, Wyoming*, August 1984.
- [38] S. Seale, "Dynamic loads in layered halfspaces," PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, MIT, Cambridge, Massachusetts, 1985.



- [39] S. Seale and E. Kausel, "Point loads in cross-anisotropic layered halfspaces," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 115, no. 03, pp. 509-542, 1989.
- [40] E. KAUSEL, "Thin-layer method: Formulation in the time domain," *International journal for numerical methods in engineering*, vol. 37, no. 6, pp. 927-941, 1994.
- [41] E. KAUSEL, *Fundamental solutions in elastodynamics: a compendium*, Cambridge University Press, 2006.
- [42] J. Lysmer, "Analytical Procedures in Soil Dynamics," California, 1978.
- [43] M. Darendeli, "Development of new family of normalized modulus reduction and material damping curves," PhD thesis. University of Texas, Austin, Austin, 2001.
- [44] A. R. Mortezaie and M. Vucetic, "Small-strain cyclic testing with standard NGI simple shear device," *Geotech Test J*, vol. 35, no. 6, pp. 935-948, 2012.
- [45] A. Mortezaie and M. Vucetic, "Threshold shear strain for cyclic degradation and cyclic pore water pressure generation in two clays," *Geotech Geoenviron*, vol. 142, no. 5, 2016.
- [46] S. BEDR, N. MEZOUAR, L. Verrucci and G. Lanzo, "Investigation on shear modulus and damping ratio of Algiers marls under cyclic and dynamic loading conditions," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 78, no. 4, pp. 2473-2493, 2019.
- [47] S. Bedr, "Détermination expérimentale des propriétés dynamiques des marnes de la région d'Alger - Application à l'évaluation des effets de site," PhD Thesis, École Nationale supérieure des Travaux Publics (ENSTP), Alger, Algeria, 2019.
- [48] C. B. PARK, R. D. MILLER and J. XIA, "Multichannel analysis of surface waves," *Geophysics*, vol. 64, no. 3, pp. 800-808, 1999.
- [49] J. SANTAMARINA, K. K. Carlos and M. A. FAM, *Soils and waves*, New York: Wiley & Sons, 2001.
- [50] N. RYDÉN, "Surface wave testing of pavements," Lund University, Lund, Suède, 2004.
- [51] S. K. NATH, "Seismic microzonation framework—principles & applications," in *In : Proceedings of Workshop on Microzonation*, 2007.