

INFLUENCE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET GÉOMÉTRIQUES DES SOLS POREUX ÉLASTIQUES SUR LES SPECTRES DE RÉPONSE

MOHAMED HADID¹, HAMZA BENSEKIRIFA²

¹ Maître de Conférences, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, ENSTP, hadid_mohamed2003@yahoo.fr

² Post-graduant, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, ENSTP

RÉSUMÉ

L'objectif de ce travail consiste à développer une procédure d'évaluation des spectres de réponse en tenant compte des effets de site et ce, en utilisant la méthode des matrices de rigidités élaborée par Rajapakse et Senjuntichai pour l'évaluation de la réponse dynamique de sol. Dans ce contexte, nous considérons le sol comme étant un milieu poro-élastique (modèle bi phasique de Biot). A cet effet, un code de calcul permettant la simulation et l'analyse du comportement dynamique est mis au point. Une étude paramétrique a été effectuée montrant l'influence de quelques facteurs cardinaux sur les spectres de réponse (incidence de l'onde SV, porosité, degré de saturation, perméabilité, module de cisaillement, densité des grains de sable, indice de plasticité des argiles et épaisseur de profil de sol).

MOTS-CLEFS : effets de site, fonction d'amplification, spectre de réponse, méthode des matrices de rigidités, sols poro-élastiques.

ABSTRACT

The objective of this work consists on development of a procedure for evaluation of response spectra by taking account the site effects. So, the stiffness matrix method established by Rajapakse and Senjuntichai is used to evaluate the soil dynamic response. In this context, the soil profile is modeled as a poro-elastic medium (Biot model). For this purpose, a computer code allowing the simulation and the analysis of the dynamic behavior is developed. Parametric study is carried out and showing the influence of several cardinal factors on the response spectra (incidence of SV waves, porosity, saturation degree, permeability, shear modulus, density of the sand, plasticity index of clays and thickness of soil profile).

KEY-WORDS : site effects, amplification function, response spectra, stiffness matrix method, poro-elastic soils.

1. Introduction

La complexité caractérisant la structure souterraine des sols (stratification, porosité, non homogénéité, degré de saturation, imperméabilité, présence d'aspérités,...) est à l'origine des diverses altérations que subissent les ondes sismiques durant leur propagation de la source sismique à la surface du sol. Ainsi, plusieurs phénomènes contribuant à l'amplification des mouvements de sol ont été identifiés et regroupés dans les deux points suivants : effets de site liés à la structure et à la nature du sol, et effets de site topographiques. Dans ce cadre, l'évaluation des effets de site sur la réponse des structures et en particulier sur leurs spectres de réponse permet de prédire les dommages qui peuvent être engendrés pour un niveau d'accélération spécifique sur un site donné et

par conséquent, nous pouvons intégrer la particularité de site dans le dimensionnement des structures.

Le règlement parasismique algérien RPA99/2003 autorise, à l'instar des autres règlements parasismiques étrangers, l'utilisation des méthodes de calcul dynamique par spectre de réponse ou par intégration directe en utilisant des accélérogrammes réels ou synthétiques. Dans ce cas, l'excitation sismique est spécifiée sous forme de spectre de réponse dépendant de la nature du site. Cependant, le spectre de réponse du RPA99/2003 ne prend pas en considération les effets de l'amplification de site. De ce fait, il s'avère donc nécessaire de développer une méthodologie permettant de déterminer un spectre de réponse tenant compte des effets de site en faisant intervenir les paramètres physiques et géométriques de sol (porosité, stratification, rapport d'impédance, masse volumique, imperméabilité, module de cisaillement, non homogénéité, etc.).

Dans ce papier, un modèle analytique de spectre de réponse en tenant compte de l'effet de site basé sur la méthode des matrices de rigidités a été élaboré. Dans ce contexte, le sol est considéré comme un milieu poreux à deux phases (théorie de Biot, squelette solide et fluide interstitiel). A ce titre, une étude paramétrique relative à l'influence de l'incidence des ondes SV, de la densité des grains du sable, de l'indice de plasticité des argiles, de degré de saturation, de degré de la porosité et de degré de perméabilité sur le spectre de réponse est effectuée

2. Propagation des ondes sismiques dans les milieux poreux

La méthode consiste à écrire les équations d'équilibre de chaque phase et les équations inter-phases (forces d'interaction). La théorie de la consolidation tridimensionnelle de Terzaghi rentre dans cette catégorie. Dans ce travail, nous nous intéressons à l'approche macroscopique basée sur le modèle dynamique de Biot (Biot, 1956 et 1962).

2.1. Formulation physique de problème

Conservation de la quantité de mouvement

$$\mu \nabla^2 u + (\lambda_d + \alpha^2 M + \mu) \nabla e - \alpha M \nabla \zeta = \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\rho u + \rho_f w) \quad (1)$$

Où w est le mouvement relatif de fluide, u est le déplacement de solide, ρ et ρ_f sont respectivement les masses volumiques du mélange solide-fluide et de la phase fluide, λ_d et μ sont les constantes de Lamé, α et M sont les coefficients de Biot, e représente la déformation volumique du solide et

$$\zeta = \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} \right)$$

est l'incrément volumétrique du fluide.

Équilibre dynamique du fluide

L'équilibre du fluide sous l'action des forces de gravité et des forces d'inertie est régi par la loi de Darcy généralisée :

$$\nabla(\alpha M e - M \zeta) = \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\rho_f u + \frac{\rho_f}{n} w \right) + \frac{\eta}{k} \frac{\partial w}{\partial t} \quad (2)$$

où η est la viscosité du fluide, k la perméabilité en m^2 , et n est la porosité.

2.2. Equations de mouvement

En utilisant la décomposition de Helmholtz pour le champ de déplacement telle que :

$$u = \nabla \varphi_s + \text{rot} \psi_s \quad (3)$$

$$w = \nabla \varphi_f + \text{rot} \psi_f \quad (4)$$

dans laquelle φ_s et ψ_s sont les potentiels associés à la phase solide et φ_f et ψ_f les potentiels associés à la phase fluide, les équations de mouvement (1) et (2) deviennent :

$$\begin{bmatrix} \rho & \rho_f \\ \rho_f & \rho_f/n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\varphi}_s \\ \ddot{\varphi}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\varphi}_s \\ \dot{\varphi}_f \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu + \alpha^2 M & \alpha M \\ \alpha M & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nabla^2 & 0 \\ 0 & \nabla^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \rho & \rho_f \\ \rho_f & \rho_f/n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\psi}_s \\ \ddot{\psi}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\psi}_s \\ \dot{\psi}_f \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} \mu & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nabla^2 & 0 \\ 0 & \nabla^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \psi_s \\ \psi_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

avec : $b = \eta/k$

Les équations (5) et (6) représentent la propagation d'ondes de compression et de cisaillement dans le milieu poreux.

2.3. Comportement dynamique des sols

L'une des connaissances de base nécessaire pour évaluer la réponse du sol lors d'un séisme, est l'étude de ses propriétés sous chargement cyclique dans son état naturel.

Les différentes relations (τ - γ) obtenues par chargement et déchargement montrent que le sol a un comportement non linéaire et non élastique (Hardin, 1978). L'énergie de dissipation intervient à cause de l'amortissement du sol.

3. Evaluation de la fonction de transfert

L'évaluation de la fonction de transfert entre la surface libre et l'espace semi infini est un passage important pour étudier l'influence de la géologie locale du site sur la réponse sismique des structures.

3.1 Fonction de transfert entre la surface libre et le substratum rocheux

Cette partie fournit le fondement théorique du calcul de la fonction de transfert d'un milieu poro-élastique stratifié horizontalement sollicité par plusieurs types d'ondes sismiques (P1, P2 et SV) qui se propagent sous divers angles d'incidence à partir d'un espace semi-infini poro-élastique. On a adopté dans ce travail la méthode des matrices de rigidité proposée par Rajapakse et Senjuntichai (1995).

La méthode consiste en un calcul de la réponse dynamique de l'espace semi-infini et le multicouche due à un chargement appliqué à l'interface. Ce calcul passe par la détermination des

matrices de rigidité caractérisant le multicouche et le rocher. Considérons un profil stratifié, comportant N couches de sol poro-élastiques, et reposant sur un semi-espace poro-élastique. La numérotation des différentes couches de sol ainsi que des interfaces entre couches se fait comme indiquée dans la figure 1

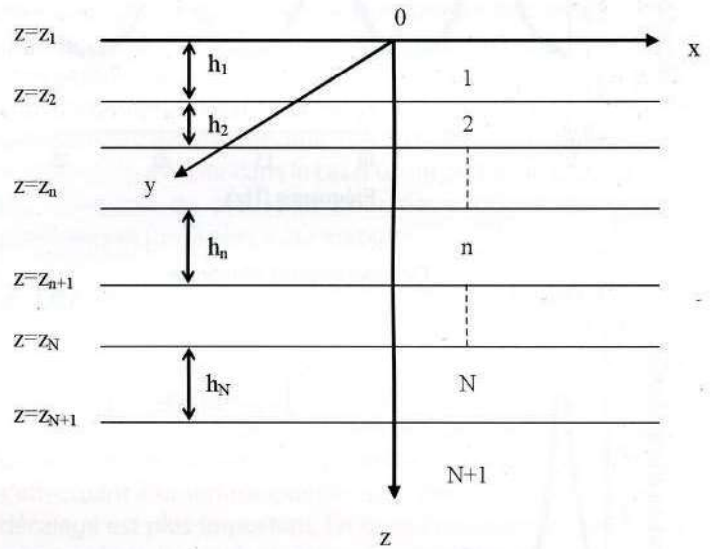


Figure 1 : Géométrie d'un profil de sol multicouches poro-élastique

La matrice de rigidité globale est obtenue en assemblant les matrices de rigidités élémentaires des différentes couches de sol et la matrice de rigidité du semi-espace sous-jacent.

3.2 Validation des résultats

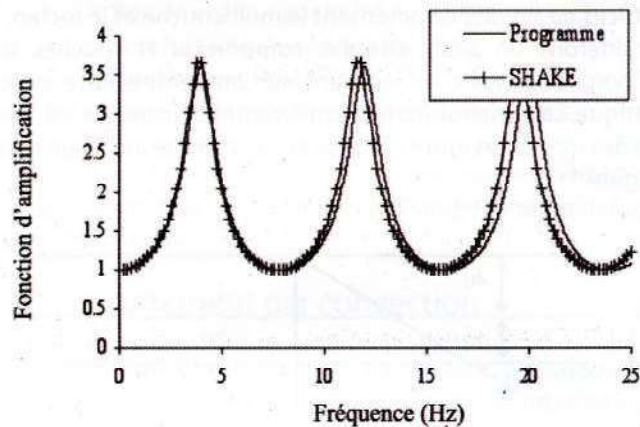
Pour valider les résultats de cette phase, on a tracé les mêmes courbes avec le programme SHAKE2000. Il apparaîtra que les courbes obtenues ont la même allure, donc les deux logiciels conduisent à des valeurs pratiquement identiques.

L'excitation utilisée dans les exemples de validation est représentée par l'accélérogramme de Treasure Island dont la valeur maximale est égale à 0.16 g, avec un pas de temps de 0.02 s.

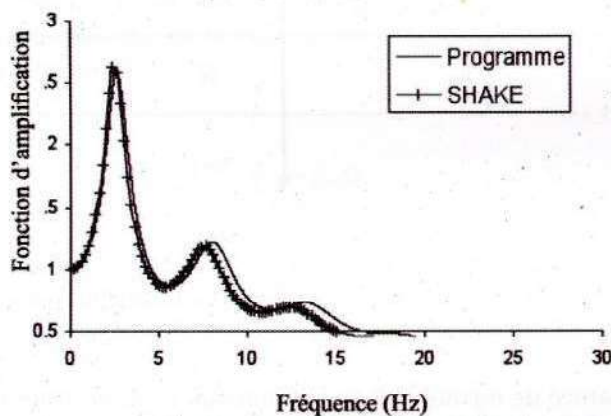
Il s'agit d'une couche homogène d'épaisseur h surmontant un demi-espace dont les paramètres géotechniques sont donnés par le tableau 1.

Couche	h (m)	ρ (t/m^3)	G (MPa)	ζ (%)
1	10	1.96	50	5
Substratum rocheux	-	2.13	600	2

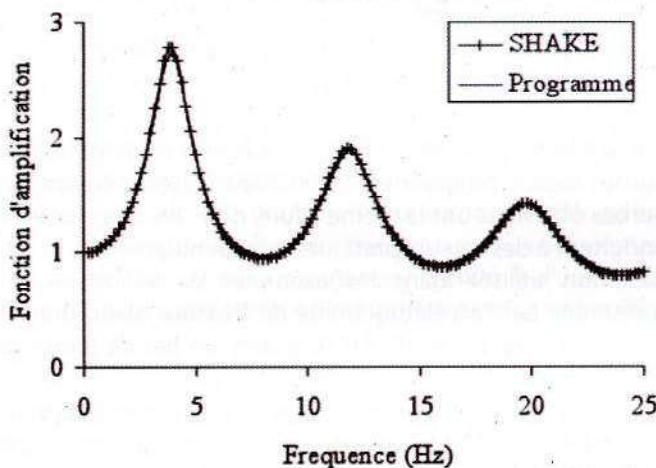
Tableau 1 Caractéristiques géotechniques d'un profil de sol monocouche



Comportement élastique



Comportement linéaire équivalent



Comportement viscoélastique

Figure 2 Fonctions d'amplification d'un monocouche

D'après les courbes de la fonction d'amplification fournies par les figures 2, nous remarquons que la fonction d'amplification atteint des proportions plus importantes dans le cas d'un sol à comportement élastique que dans celui à comportement viscoélastique ou linéaire équivalent, ce qui signifie que l'amortissement influe sur la valeur de l'amplification en l'atténuant. On observe aussi une très bonne concordance entre les résultats obtenus avec notre programme et les résultats obtenus avec son homologue.

4 Etude paramétrique

Dans ce qui suit, nous présenterons une étude paramétrique portant sur l'effet de différents facteurs mentionnés précédemment sur le comportement dynamique du site. Les résultats de l'étude paramétrique sont exprimés en terme de fonctions d'amplification horizontale et verticale et de spectre de réponse.

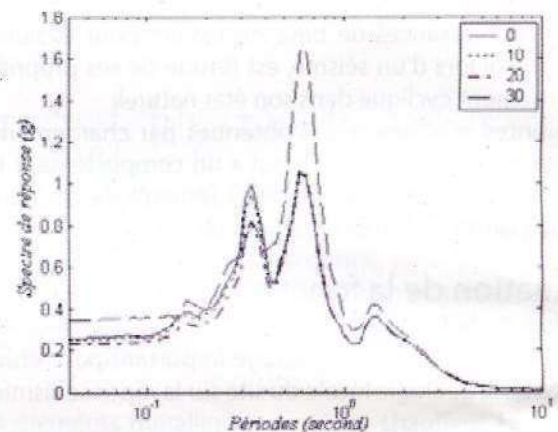
Deux profils de sols ont été utilisés composé chacun d'une seule couche de sol d'épaisseur $h=10$ m reposant sur le même demi-espace poro-élastique rocheux. L'excitation utilisée est représentée par l'accélérogramme de Treasure Island.

Caractéristiques	Sable	Argile	Demi-espace
Densité des grains solides (kg/m^3)	2600	2700	2700
Porosité	0.3	0.4	0.3
Module de cisaillement (MPa)	70	100	600
Module de compressibilité du squelette solide (Mpa)	83.33	190	1300
Module de compressibilité des grains solides (Gpa)	36	36	36
Module de compressibilité de l'eau interstitielle (Gpa)	2.2	2.2	2.2
Viscosité du fluide (Ns/m^2)	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
Perméabilité (m^2)	10^{-11}	10^{-9}	10^{-14}

Tableau 2 Caractéristiques géotechniques du sable et de l'argile (Yang, 2000)

4.1 Effet d'incidence d'onde SV

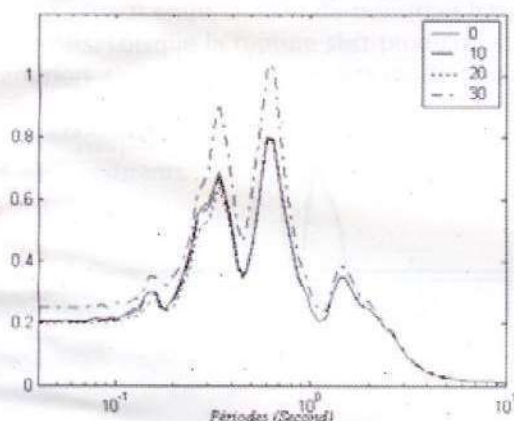
La figure 3, montre que le spectre de réponse à la surface de sol est considérablement influencé par l'incidence de l'angle 30° alors que l'effet de l'incidence de l'angle pour 10° et 20° peut être négligé.



(a)

Figure 3 : Spectre de réponse pour différents angles d'incidence d'ondes sismique

(a) : couche sableuse



(b)

Figure 3 : Spectre de réponse pour différents angles d'incidence d'ondes sismique

(b) : couche argileuse

4.2 Effet de la densité des grains du sable

Afin de mettre en évidence l'effet de la granulométrie, on propose l'étude de la variation de type de sable en tenant compte d'un angle d'incidence de 10° .

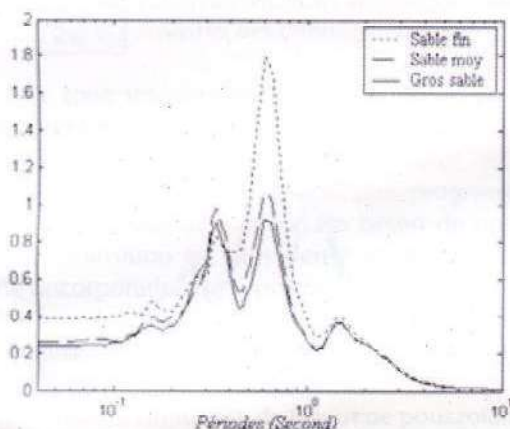


Figure 4 Spectre de réponse de la couche sableuse pour différents types de sable

A partir de la figure 4, il apparaît que la granulométrie de sol provoque des amplifications plus importantes en augmentant le spectre de réponse dans le cas des sables fins.

4.3 Effet de l'indice de plasticité des argiles

A partir des essais au laboratoire ou in situ, les argiles sont définies selon leurs indices de plasticité variant de $I_p=0$ jusqu'à $I_p=200$ %. Sur cette base, nous étudions l'effet de la variation des indices de plasticité.

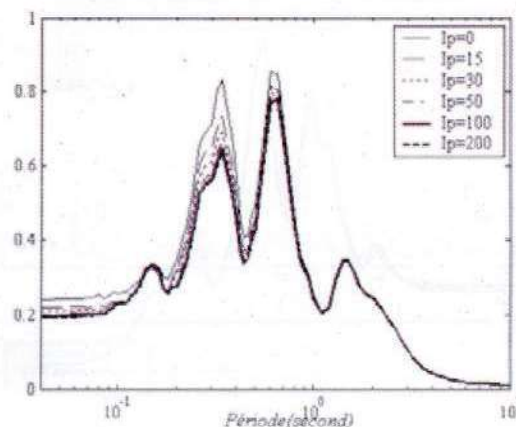


Figure 5 : Spectre de réponse à la surface libre pour différents types d'argiles

On constate que le spectre de réponse des sols argileux est plus intense dans les périodes courtes proportionnellement avec la diminution de l'indice de plasticité.

4.4 Effet de la saturation

Nous étudions la saturation de sol en variant son degré entre 95% et 100%. La variation de degré de saturation n'a aucune influence sur le spectre de réponse (Figure 6)

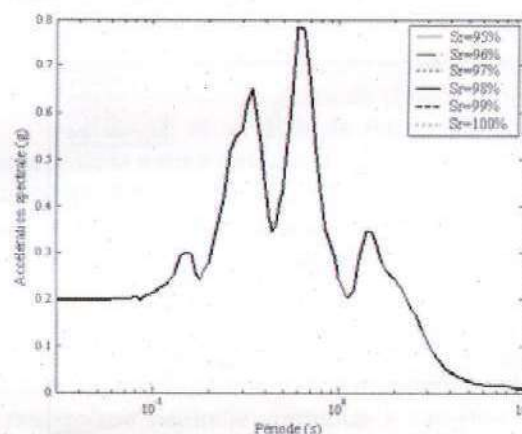


Figure 6 : Effet de la variation de degré de saturation sur le spectre de réponse (Incidence à 20°).

4.5 Effet de la porosité

La porosité a été variée entre 0.1 et 0.5 pour une couche de sol totalement saturé.

A partir de la figure 7, il apparaît que l'augmentation de la porosité du sol provoque une réduction insignifiante aux basses périodes de spectre de réponse, ce qui explique que l'amplification augmente avec la diminution de la densité relative.

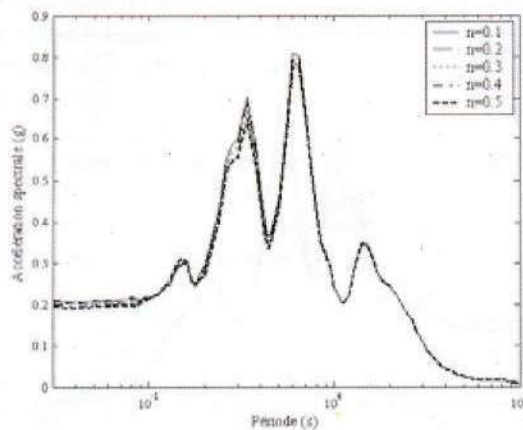


Figure 7 : Effet de la variation de la porosité sur le spectre de réponse

4.6 Effet du module de cisaillement

Le module de cisaillement prend successivement les valeurs suivantes : 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa et 200 MPa. La figure 8 montre la variation des spectres de réponse correspondants aux différents modules de cisaillement. Il est observé que plus le module de cisaillement diminue plus l'accélération spectrale à la surface de sol est élevée

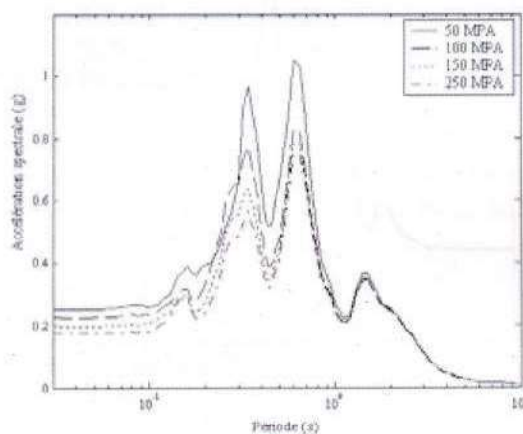


Figure 8: Effet de la variation de module de cisaillement sur le spectre de réponse

4.7 Effet de la perméabilité

Considérons la couche de sol suivante : $H = 10$ m et le coefficient de perméabilité prend successivement des valeurs $k = 10^{-1}$, 10^{-3} et 10^{-7} m/s. Les non drainés ($k = 0$) sont également considérés. Les résultats (figure 9) montrent que la perméabilité a une influence négligeable sur la réponse dynamique ou sismique du site. Le mouvement vibratoire de sol sous l'effet d'une sollicitation sismique est tellement rapide que l'eau interstitielle n'a pas le temps à s'évacuer dans les

pores et le sol se comporte donc comme un milieu poreux très peu perméable.

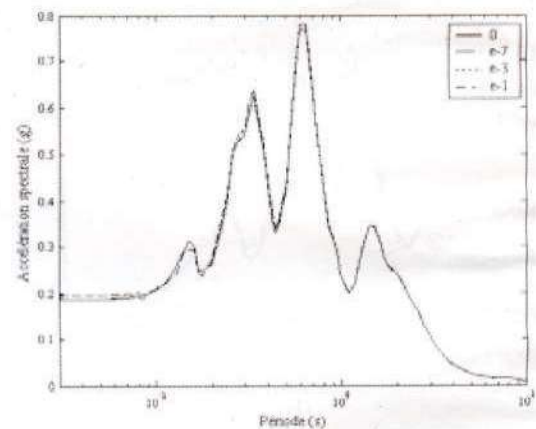


Figure 9 : Effet de la variation de la perméabilité sur le spectre de réponse

4.8 Effet d'épaisseur du profil

Considérons une couche de sol avec un rapport d'impédance $q = 0.4$. Son épaisseur prend successivement les valeurs suivantes $H = 10$ m, 20 m et 30 m.

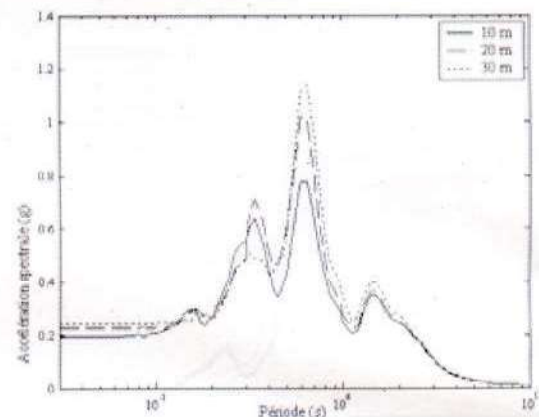


Figure 10 Effet de la variation de la profondeur sur le spectre de réponse

Les résultats illustrés sur la figure 10 montrent que l'effet d'amplification du mouvement à la surface libre dépend de l'épaisseur. C'est à dire plus la couche est épaisse plus la valeur du spectre de réponse est importante.

Conclusion

Dans ce papier, en premier lieu, nous avons développé une procédure d'évaluation analytique et numérique des spectres de réponse en tenant compte des effets de site et en deuxième lieu, nous avons établi une étude paramétrique faisant intervenir les paramètres physiques et géométriques de sol tels que l'angle d'incidence de l'onde SV, le degré de saturation, la porosité, le module de cisaillement, la perméabilité, la densité des grains de sable, l'indice de plasticité des argiles et l'épaisseur de profil de sol.

Dans ce contexte, un code de calcul (programme informatique) a été établi permettant le calcul de la réponse sismique d'un profil de sol poro-élastique horizontalement stratifié ainsi que le calcul des spectres de réponse en tenant compte des effets de site.

Les principales conclusions déterminées dans ce travail sont brièvement décrites ci-dessous :

Les résultats de notre modèle numérique (donnés par le code de calcul élaboré dans ce travail) sont en bonne concordance avec les résultats donnés par le code de calcul SHAKE2000.

La porosité, le contraste d'impédance, le module de cisaillement, l'incidence de l'onde SV, la densité des grains de sable et l'indice de plasticité des argiles peuvent modifier de manière relativement importante le mouvement en surface du profil de sol. Par contre, l'imperméabilité et le degré de saturation peuvent être négligés dans le calcul des spectres de réponse.

Références

Biot, M. A. (1956). Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. *Journal of Acoustic Society of America*. 28, 168-191.

Biot, M. A. (1962). Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media. *Journal of Applied Physics*. 33:4, 1482-1498.

Hardin, B. O. (1978). The nature of stress-strain behaviour of soils. *Proceeding of the Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference, ASCE, Pasadena, Ca, June 19-21, I*, 33-90.

Rajapakse, R. K. N. D. and Senjuntichai, T. (1995). Dynamic response of a multi-layered poroelastic medium. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*. 24. 703-722.

Yang, J. (2000). Influence of water saturation on horizontal and vertical motion at a porous soil interface induced by incident P wave. *Soil Dynam*