

## EFFET DE LA VARIATION DE LA POROSITE EN PROFONDEUR SUR LA REPONSE SISMIQUE BI-DIRECTIONNEL D'UN PROFIL DE SOL INHOMOGENE SATURE

### EFFECT OF THE POROSITY VARIATION IN THE DEPTH ON THE BI- DIRECTIONAL SEISMIC RESPONSE OF AN INHOMOGENEOUS SATURATED SOIL PROFILE

Toufiq OUZANDJA<sup>1</sup> & Mohamed HADID<sup>2</sup>

---

réception : 14/12/2016

acceptation : 29/12/2017

publication : 30/06/2018

---

<sup>1</sup>Laboratory of Construction Engineering and Architecture (LGCA) / Faculty of Technology,  
University A. Mira Bejaia, Targua Ouzemmour Road, Bejaia 06000, Algeria.

<sup>2</sup>Laboratoire de Travaux Publics Ingénierie de Transport et Environnement (TPiTE)/ École Nationale  
Supérieure des travaux Publics (ENSTP), 01 Rue Sidi Garidi, Vieux Kouba, 16051, Alger, Algeria  
Hadid\_mohamed2003@yahoo.fr et ouzandja.toufiq@yahoo.fr

**RESUME** - Cet article présente l'effet de la variation de la porosité en profondeur sur la réponse sismique d'un profil de sol inhomogène saturé. Le sol est supposé dans cet étude comme étant viscoélastique (monophasique solide), puis poro-viscoélastique (bi-phasique) caractérisé par la théorie de Biot (1956). Ce profil est considéré comme multicouche, ayant un module de cisaillement, une porosité et une perméabilité variables en profondeur selon les modèles de Wichtmann (2015), Zhou (2013) et William (1975) respectivement. Il est sollicité par l'incidence verticale des ondes sismiques planes  $P$ - $SV$ , où la réponse sismique en cas de la poro-viscoélasticité est calculée via la méthode de matrice de rigidité, développée par Rajapakse et Senjuntichai en 1995, dans le domaine fréquentiel. Les composantes horizontale et verticale enregistrées au port de la ville de Kobe (profondeur = 32 m), pendant le séisme de Kobe 1995, ont été utilisées comme des excitations au niveau d'affleurement rocheux. Les résultats indiquent que la variation de la porosité en profondeur provoque le même effet sur l'amplification horizontale en cas de sol viscoélastique et poro-viscoélastique, où l'augmentation du paramètre d'inhomogénéité induit une diminution des pics d'amplification avec un décalage vers les hautes fréquences. Cependant, l'amplification verticale est plus influencée par la variation du paramètre d'inhomogénéité dans les deux cas de sol monophasique et bi-phasique saturé

Mots-Clés : Milieu poreux, Sol inhomogène, Théorie de Biot, Porosité, Perméabilité.

**ABSTRACT** - This paper presents the effect of the porosity variation in the depth on the linear seismic response of an inhomogeneous saturated soil profile. The soil is supposed to be viscoelastic, then poroviscoelastic characterized by the Biot's theory (1956). The soil profile is idealized as a multi-layered medium and having a shear modulus, porosity and permeability varying continuously with depth according the Wichtmann (2015), Zhou (2013) and William (1975) model, respectively. It is solicited by the vertical incoming of  $P$ - $SV$  waves, with assuming that horizontal and vertical response due only to the  $SV$  and  $P$  wave respectively. The seismic response analysis for the case of proviscoelastic soil is carried out via the exact stiffness matrix method (Rajapakse and Senjuntichai 1995) in frequency domain. Moreover, The two components seismic accelerograms (horizontal

and vertical) recorded at the Kobe port island (depth=32 m), during the 1995 earthquake, have been selected as a rock outcropping motion to excite the soil profile. Results indicate that the porosity variation in the depth have the same effect on the horizontal seismic response in the case of viscoelastic and poroviscoelastic saturated soil; where the increase of the inhomogeneity parameter  $a'$  induces a decrease of the horizontal acceleration values and the peaks amplification with a shift of the site frequencies to the high-frequency. However, its effect on the vertical response is more pronounced for a monophasic soil than multiphasic soil profile.

Key-Words: Porous media, Inhomogeneous soil profile, Biot's theorie, Porosity, Permeability.

## 1. Introduction

Les conditions géotechniques locales ont un effet majeur sur la concentration des dégâts dans certaines zones lors d'un séisme fort, comme le séisme de Mexico 1985, Loma Prieta 1989 et le séisme de Boumerdés du 21 mai 2003. Donc, afin d'affiner la description des effets de site, les études devraient prendre en compte les différentes propriétés de sol (stratification, porosité, inhomogénéité du module de cisaillement, perméabilité...) notamment dans les premiers 30 mètres, pour augmenter le nombre de paramètres descriptifs [1].

Certaines études effectuées dans ce contexte qui ne prennent en considération que les caractéristiques mécaniques, en particulier, le module de cisaillement, qui varie en fonction de la profondeur (inhomogène), ne sont disponibles que pour le sol monophasique solide [2-5]. Néanmoins, les dépôts de sol ont une rigidité augmentant avec la profondeur et ils sont souvent sous la forme d'un milieu poreux saturé dans la nature (milieux bi-phasique squelette solide et fluide interstitiel), en particulier dans les zones côtières.

D'autre part, malgré que les résultats de plusieurs investigations géotechniques montrent l'effet important de la porosité sur le module de cisaillement du sol à faible niveau de distorsion, ainsi que la vitesse de propagation des ondes sismique, la variation de la porosité en profondeur est ignorée dans un calcul sismique. La porosité est principalement en fonction de l'arrangement des grains de sol et le vide entre eux, ces derniers qui peuvent varier en fonction de la profondeur sous l'effet d'augmentation de la contrainte de confinement où les grains deviennent plus serrés ce qui réduit le volume des pores [6]. Ce qui montre que l'inhomogénéité de la porosité du sol est une caractéristique naturelle dans la formation des dépôts sédimentaires.

L'objectif principal visé par ce travail est d'évaluer l'effet de la variation de la porosité en profondeur sur la réponse sismique d'un profil de sol considéré viscoélastique ainsi que poro-viscoélastique selon la théorie de Biot [7-9], en tenant compte de l'inhomogénéité du module de cisaillement [10]. Le profil de sol est sollicité par l'incidence verticale des ondes sismiques planes  $P$ - $SV$ , où la réponse sismique en cas de poro-viscoélasticité est effectuée via la méthode de matrice de rigidité exacte [11] dans le domaine fréquentiel. À ce titre, les résultats d'une étude paramétrique en termes de la fonction d'amplification et les rapports des pics d'accélération sont présentés et discutés pour les deux cas de sol viscoélastique et poro-viscoélastique.

## 2. Modèle de sol

Le mouvement dans le sol poro-viscoélastique est supposé être régi par la théorie de Biot de la propagation des ondes sismique dans un milieu poro-élastique (bi-phasique) saturé, le milieu est considéré continu avec la coexistence des deux phases différentes ayant des cinématiques différentes. Les équations de mouvement régissant le comportement dynamique des milieux

poreux homogène saturé, peuvent être écrites comme ci-dessous [12] en fonction du déplacement du squelette solide  $\mu_i$  et le déplacement relatif du fluide  $w_i$  ( $i=x,y$ ):

$$\mu \nabla^2 u + (\lambda + \alpha^2 M + \mu) \nabla \varepsilon - \alpha M \nabla \zeta = \rho \ddot{u} + \rho_f \dot{w} \quad (1)$$

$$\alpha M \nabla \varepsilon - M \nabla \zeta = \rho_f \ddot{u} + m \dot{w} + b w \quad (2)$$

$\rho = (1 - n)\rho_s + n\rho_f$  est la masse volumique, où  $n$ ,  $\rho_s$  et  $\rho_f$  sont la porosité, la masse volumique du squelette solide et du fluide respectivement, avec  $\rho_f/n$ .  $\varepsilon$  est la déformation volumétrique associée au squelette solide,  $\zeta$  est l'incrément volumétrique du fluide,  $\mu$  et  $\lambda$  sont les coefficients de Lamé,  $b = \eta/k$  est un paramètre qui présente la force dissipative (frottement interne) due au mouvement relatif entre la phase solide et fluide, où  $k$  est la perméabilité en  $m^2$  et  $\eta$  est la viscosité du fluide.  $\alpha$  et  $M$  sont les constantes de Biot qui permettent de prendre en compte la compressibilité des grains solide et du fluide ( $0 \leq \alpha \leq 1$  et  $0 \leq M \leq \infty$ ), ceux-ci s'expriment en fonction des modules d'incompressibilité et de la porosité sous la forme suivante:

$$K_b = \lambda + \frac{2}{3} \mu \quad (3)$$

$$\alpha = 1 - \frac{K_b}{K_s} \quad (4)$$

$$\frac{1}{M} = \frac{\alpha - n}{K_s} + \frac{n}{K_w} \quad (5)$$

$K_w$ ,  $K_b$  et  $K_s$  sont les modules d'incompressibilité de l'eau, des grains solides et du squelette respectivement.

Dans cette étude, le module de cisaillement du sol est considéré inhomogène, variable en profondeur selon les formules empiriques proposées par Wichtmann [10] en se basant sur les équations de Hardin et Black, [13]:

$$G_{\max} = A \frac{(a-e)^2}{1+e} \left( \frac{\sigma'_0}{P_{atm}} \right)^{n'} P_{atm} \quad (6)$$

où

$$a = 1.94 \exp(-0.066 C_u) \quad (7)$$

$$n' = 0.40 C_u^{0.18} \quad (8)$$

$$A = 1563 + 3.13 C_u^{2.98} \quad (9)$$

$$\sigma'_0 = \frac{\sigma'_v}{3} (3 - 2 \sin \phi') \quad (10)$$

$e$  : indice de vide ;  $\sigma'_0$  : contrainte effective moyenne ;  $\sigma'_v$  : contrainte effective verticale ;  $\phi'$  : angle de frottement du sable ;  $C_u$  : coefficient d'uniformité et  $P_{atm} = 100 \text{ Kpa}$  : pression atmosphérique.

Dans les équations précédentes, Wichtmann et al. ont considéré que la porosité est constante dans le sol alors que cette dernière est une caractéristique très variable, dépendant de la granulométrie du sol (forme et taille des grains) et de l'état de compaction du matériau. A cet effet, il est supposé dans la présente étude que la porosité du sol diminue progressivement avec la profondeur selon la formule suivante de Zhou [14] :

$$n(z) = [n(0) - n(H)] \left[ \left( \frac{H - z}{H} \right)^{a'} \right] + n(H) \quad (11)$$

$H$  : épaisseur du profil de sol ,  $n(0)$  porosité à la surface ,  $n(H)$  porosité à la profondeur et  $a'$  est un paramètre d'inhomogénéité .

D'autre part, la dépendance perméabilité-porosité a été prise en considération aussi dans cet article, conformément à l'étude de William R. Bryant et al, [15] où la perméabilité du sable peut être décrite par cette formule empirique:

$$k (m^2) = e^{n(17.51) - 26.93} \quad (12)$$

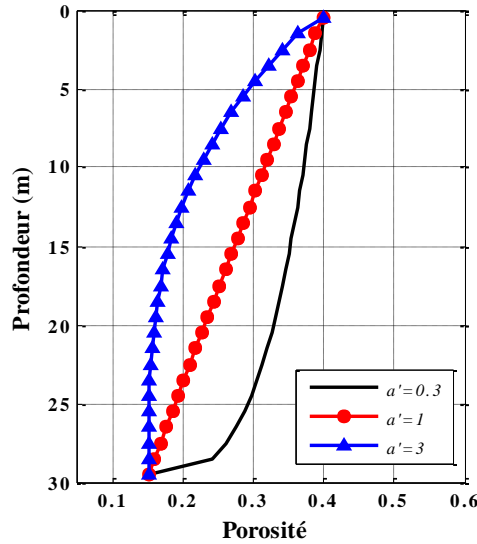


Fig.1. Variation de la porosité en profondeur avec différentes valeurs du paramètre d'inhomogénéité  $a'$

Fig.1. Variation of porosity in the depth with different values of inhomogeneity parameter  $a'$

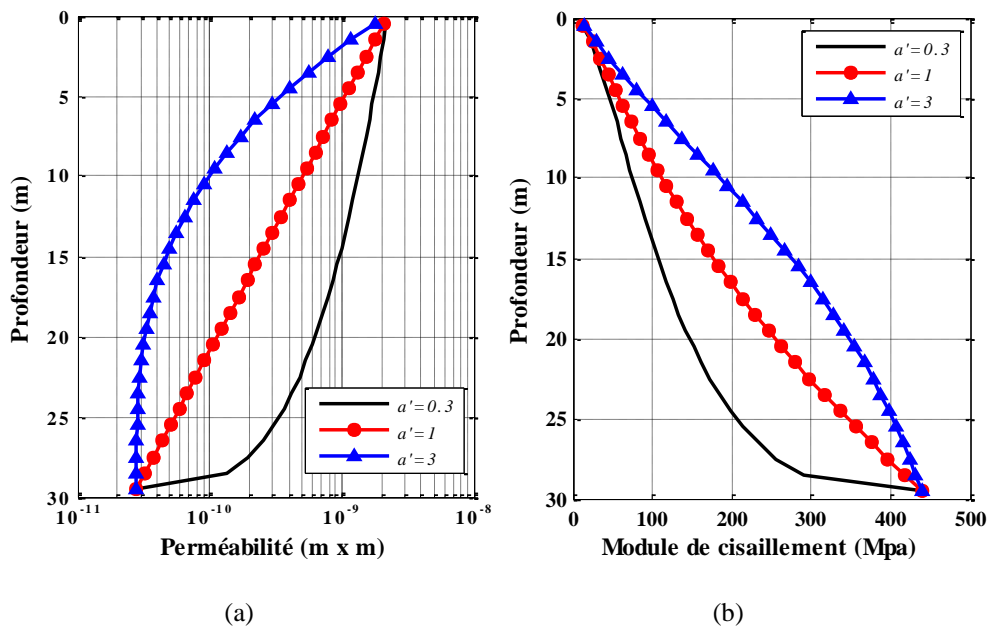


Fig.2. Effet de la variation de la porosité en profondeur sur (a) le module de cisaillement, (b) la perméabilité

Fig.2. Effect of porosity variation in the depth on (a) shear modulus, (b) permeability

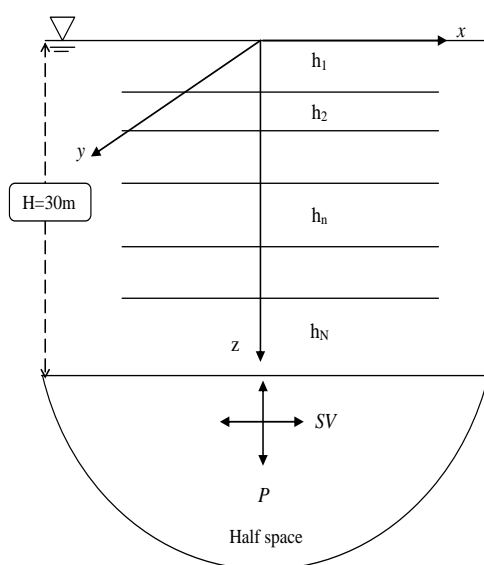


Fig.3. Géométrie du profil de sol

Fig.3. Geometry of the soil profile

### 3. Etude paramétrique

Une étude paramétrique est présentée dans cette section afin d'analyser l'effet de la variation de la porosité en profondeur sur la réponse sismique d'un profil de sol recouvrant une formation rocheuse. Dans ce contexte, on suppose un profil du sol sableux ( $H=30\text{m}$ ) inhomogène, discrétisé en plusieurs couches qui présentent des propriétés constantes à l'intérieur de chaque sous-couche. Ce profil est sollicité par l'incidence verticale des ondes sismiques planes  $P$ - $SV$  (Fig.3)

Le profil de sol et le demi-espace sont considérées comme un milieu viscoélastique d'abord, puis poro-viscoélastique caractérisé par un module de cisaillement  $G$ , une porosité  $n$ , une perméabilité  $k$ , un amortissement  $\xi_\mu$ , (on considère le même amortissement matériel  $\xi_\mu$ , pour les deux ondes  $SV$  et  $P$ ) et la compressibilité du solide et du fluide. Les propriétés du demi-espace rocheux et du sable constituant le profil de sol utilisé sont présentées dans le tableau 1.

Table:1 Propriétés de sol du système profil de sol poreux inhomogène saturé/Bedrock  
Table:1 Soil properties of saturated inhomogeneous porous soil/bedrock system

Propriétés	Sable	Demi espace
Thickness $H$ (m)	30	/
Shear modulus $G$ (Gpa)	/	1.5
Permeability $k$ (m <sup>2</sup> )	William	$10^{-13}$
Porosity $n$	Zhou	0.05
Solid grains density $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2600	2600
Bulk modulus of solid grains $K_s$ (Gpa)	36	36
Bulk modulus of pore water $K_w$ (Gpa)	2.2	2.2
Fluid viscosity $\eta$ (Ns/m <sup>2</sup> )	$10^{-3}$	$10^{-3}$
Damping $\xi_\mu$ (%)	5	1
Coefficient of uniformity, $C_u$	4	/
Friction angle	25°	/
Poisson's ratio	0.3	0.3

Deux composantes sismiques d'un accélérogramme (horizontale et verticale) ont été choisi comme des excitations sismiques au niveau d'affleurement rocheux. Ces composantes sismiques ont été enregistrées au port de Kobe (profondeur 32 m), lors du séisme de Kobe 1995, où les pics d'accélération sont 0.46g et 0.2g pour la composante horizontale et verticale respectivement (Fig.4).

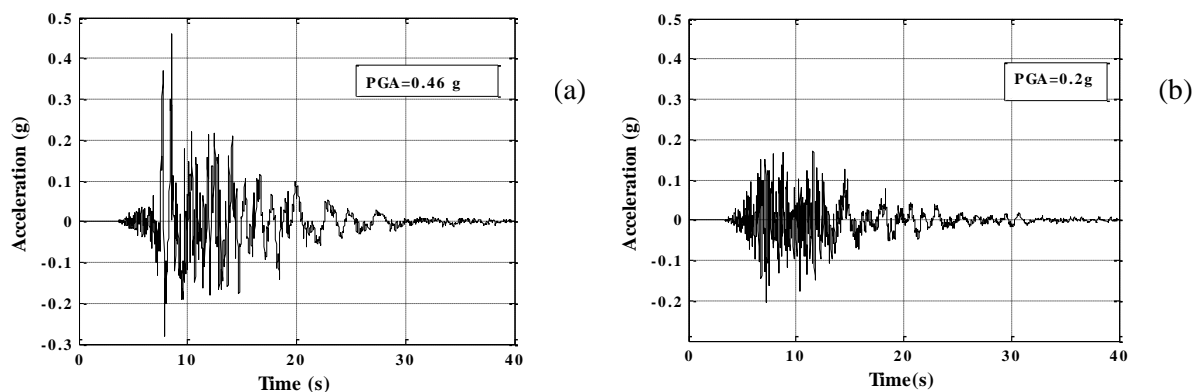


Fig.4 Accélérogramme de Kobe à 32 m de profondeur (a) composante horizontale, (b) composante verticale

Fig.4 Time histories of Kobe earthquake 1995 (depth=32 m) (a) horizontal component, (b) vertical component

Les résultats obtenus dans cette étude, en terme de fonction d'amplification et des rapports des pics d'accélération pour des différents valeurs du paramètre d'inhomogénéité de la porosité  $a'$ , sont représentés ci-après pour le cas d'un sol visco-élastique et d'un sol poro-viscoélastique. Il est à noter que le rapport des pics d'accélération est défini comme étant le rapport entre les pics d'accélération calculés aux niveaux des sous-couches et celui calculé à la base du profil.

### 3.1. Profil du sol visco-élastique

#### 3.1.1. Incidence verticale d'onde SV

La figure 5 illustre l'effet important du paramètre d'inhomogénéité  $a'$  sur la fonction d'amplification horizontale d'un profil de sol visco-élastique : il apparaît que l'augmentation de la valeur de  $a'$ , de  $a' = 0.3$  jusqu'à  $a' = 1$  et  $a' = 3$ , provoque des amplifications moins importantes, où l'amplification du premier pic diminue de 3.66 à 3.25 et 2.63 respectivement et ceci conjointement avec un décalage de la fréquence vers les hautes fréquences. Ce qui indique que le sol devient plus rigide. En revanche, on constate aussi que le rapport des pics d'accélération horizontales à la surface décroît par l'augmentation du coefficient  $a'$  de 1.79 à 1.61 et 1.47 (Fig. 6).

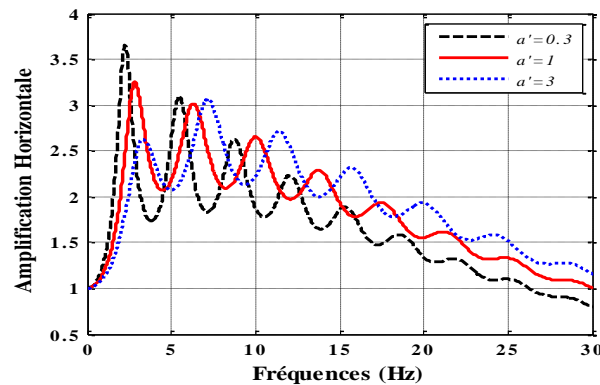


Fig.5 Effet du paramètre d'inhomogénéité  $a'$  sur l'amplification horizontale en cas de sol viscoélastique

Fig.5 Effect of the inhomogeneity parameter  $a'$  on the horizontal amplification in case of viscoelastic soil

Nous pouvons expliquer cette observation plus clairement à l'aide des figures (1 et 2a), qui représentent la variation de  $G$  et de la porosité  $n$  en profondeur et en fonction de  $a'$  qui traduit une augmentation du module de cisailment due essentiellement par la diminution du nombre des pores dans le sol.

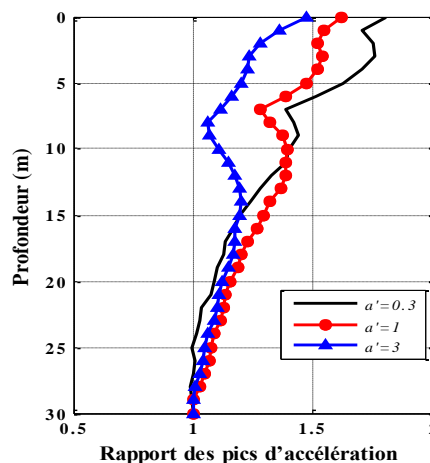


Fig.6 Effet du paramètre d'inhomogénéité  $a'$  sur les rapports des pics d'accélération horizontale en cas de sol viscoélastique

Fig.6 Effect of the inhomogeneity parameter  $a'$  on the horizontal peak acceleration ratios in the case of viscoelastic soil



Selon les conditions de la conversion des ondes  $P$ - $SV$ , l'incidence verticale de l'onde  $SV$  engendre seulement des ondes  $SV$  qui ne se propagent pas dans le fluide interstitiel, ce qui implique que réponse sismique horizontale du profil pour les deux cas de sol monophasique et bi-phasique saturé est la même. Pour cette raison, nous avons présenté l'effet de l'inhomogénéité de la porosité sur la fonction d'amplification et les rapports des pics d'accélération horizontale seulement dans le cas d'un profil de sol viscoélastique.

### 3.1.2. Incidence verticale d'onde $P$

En autre terme, il est observé que l'amplification verticale est fortement influencée aussi par le paramètre d'inhomogénéité  $a'$ , où l'augmentation de  $a'$  de  $a'=0.3$  jusqu'à  $a'=3$  décroît l'amplitude du premier pic par 26.5% avec un décalage vers les haute fréquences de  $f=4.4$  Hz à  $f=6$  Hz (Fig. 7) et aussi diminue le rapport des pics d'accélération verticale (Fig. 8).

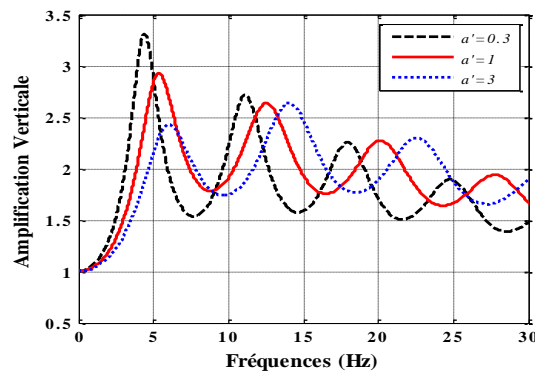


Fig.7 Effet du paramètre d'inhomogénéité  $a'$  sur l'amplification verticale en cas de sol viscoélastique

Fig.7 Effect of the inhomogeneity parameter  $a'$  on the vertical amplification in case of viscoelastic soil

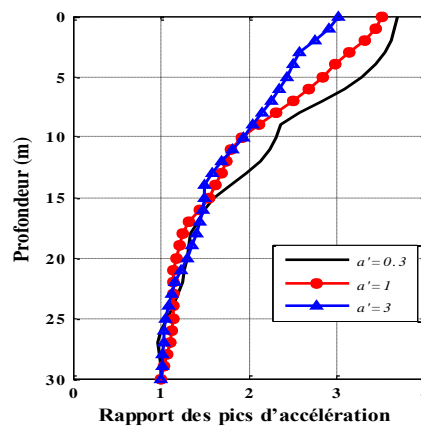


Fig.8 Effet du paramètre d'inhomogénéité  $a'$  sur les rapports des pics d'accélération verticale en cas de sol viscoélastique

Fig.8 Effect of the inhomogeneity parameter  $a'$  on the vertical peak acceleration ratios in the case of viscoelastic soil

### 3.2. Profil de sol poro-viscoélastique sollicité par l'incidence verticale de l'onde $P$

En ce qui concerne la réponse verticale du profil de sol poro-viscoélastique saturé, la figure 9 montre que la variation de l'amplification verticale en fonction du paramètre d'inhomogénéité présente un comportement similaire à celui d'un sol viscoélastique mais avec une faible amplitude et une fréquence élevée. En outre, dans ces conditions de sol, les rapports des pics d'accélération verticale sont légèrement influencé par  $a'$  (Fig. 10) à cause des valeurs importantes de la vitesse de propagation de l'onde  $P$  dans les milieux saturés.

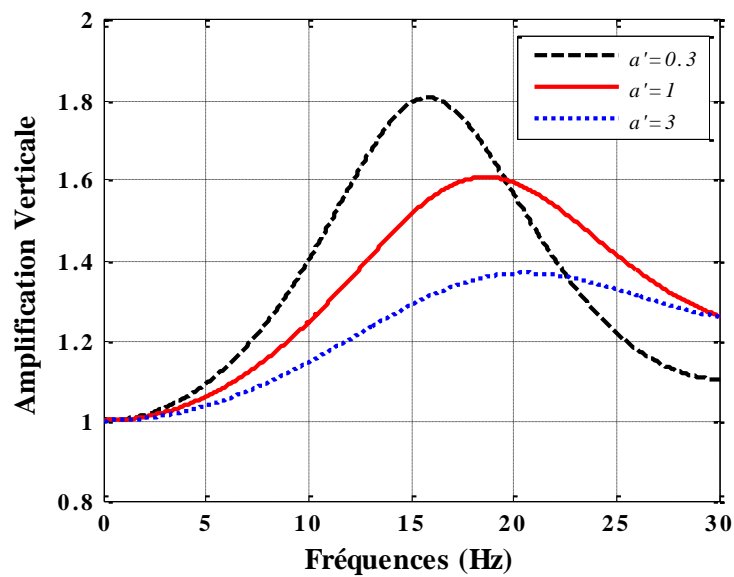


Fig.9 Effet du paramètre d'inhomogénéité  $a'$  sur l'amplification verticale en cas de sol poro-viscoélastique

Fig.9 Effect of the inhomogeneity parameter  $a'$  on the vertical amplification in case of poroviscoelastic soil

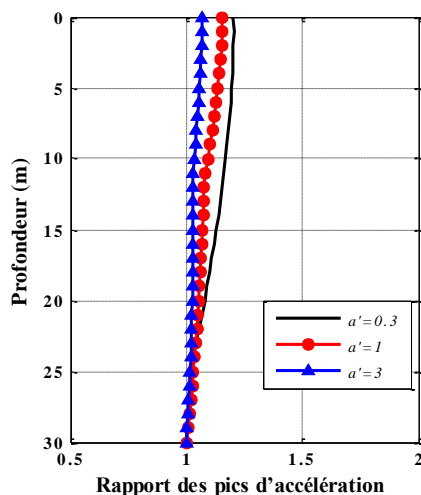


Fig.10 : Effet du paramètre d'inhomogénéité  $a'$  sur les rapports des pics d'accélération verticale en cas de sol poro-viscoélastique

Fig.10 : Effect of the inhomogeneity parameter  $a'$  on the vertical peak acceleration ratios in the case of poroviscoelastic soil

#### 4. Conclusion

Dans ce travail, l'effet de l'inhomogénéité de la porosité en profondeur sur la réponse sismique d'un profil de sol est présenté. On a considéré un profil de sol sableux inhomogène de 30m d'épaisseur surmontant un demi-espace rocheux. Le sol sableux est supposé viscoélastique (monophasique solide) puis poro-viscoélastique (bi-phasique), dont la réponse sismique en cas de poro-viscoélasticité est calculée par la méthode de matrice de rigidité.

D'après les résultats obtenus, en terme de fonction d'amplification et des rapports des pics d'accélération, il ressort ce qui suit :

- Les pics d'amplification horizontale diminuent par l'augmentation du paramètre d'inhomogénéité  $a'$  avec un décalage de la fréquence vers les hautes fréquences et une diminution des rapports des pics d'accélération horizontale.
- L'amplification verticale du profil en cas de sol poro-viscoélastique présente un comportement similaire à celui d'un sol viscoélastique, mais avec des amplitudes plus faibles et des fréquences élevées.
- La variation du paramètre d'inhomogénéité a un effet significatif sur l'amplification verticale en cas d'un sol monophasique, mais un effet moins important en cas d'un sol poro-viscoélastique.
- Les rapports des pics d'accélération verticale en cas d'un sol poro-viscoélastique saturé sont légèrement influencés par la variation des valeurs de  $a'$ .

À l'issue de ces résultats, on peut déduire que la variation de la porosité est d'une importance significative dans le calcul de la réponse sismique du sol qui sera utile à prendre en considération dans les calculs de dimensionnement des ouvrages en zone fortement sismiques.

#### Références bibliographiques

- [1] Trifunac, M. D.: Site conditions and earthquake ground motion—A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 90, 88-100 (2016).

- [2] Idriss, I.M.; Seed, H.B.: Seismic response of horizontal layers . Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 94(SM4): 1003-31 (1968).
- [3] Gazetas, G.: Vibrational Characteristics of Soil Deposits with Variable Wave Propagation Velocity. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 6, 1–20 (1982).
- [4] Hadid, M.; Afra, H.: Sensitivity Analysis of Site Effects on Response Spectra of Pipelines. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 20, 249–260 (2000).
- [5] Durante, M.G.; Karamitros, D.; Di Sarno, L.; Sica, S.; Taylor, C.A.; Mylonakis, G.; Simonelli, A.L.: Characterisation of shear wave velocity profiles of nonuniform bi-layer soil deposits: analytical evaluation and experimental validation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 75, 44–54 (2015).
- [6] Wang, X.S.; Jiang, X.W.; Wan, L.; Song, G.; Xia, Q.: Evaluation of depth-dependent porosity and bulk modulus of a shear using permeability–depth trends. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46, 1175–1181 (2009).
- [7] Biot, M.A.: Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid-Low Frequency Range. Journal of Acoustic Society of America 28(2), 168-178 (1956).
- [8] Biot, M.A.: Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid-Higher Frequency Range. Journal of Acoustic Society of America 28(2), 179-191 (1956).
- [9] Biot, M.A.: Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media. Journal of Applied Physics 33(4), 1482-1498 (1962).
- [10] Wichtmann, T.; Triantafyllidis, T.: On the influence of the grain size distribution curve of quartz sand on the small strain shear modulus  $G_{max}$ . Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 135(10), 1404–1418 (2009).
- [11] Rajapakse, R.K.N.D.; Senjuntichai, T.: Dynamic response of a multi-layered poroelastic medium. Earthquake Engineering and Structural Dynamic 24, 703-722 (1995).
- [12] Yang, J.; Sato, T.: Influence of Viscous Coupling on Seismic Reflection and Transmission in Saturated Porous Media. Bulletin of the Seismological Society of America 88(5), 1289-1299 (1998).
- [13] Hardin, B.O.; Black, W.L.: Vibration Modulus of Normally Consolidated Clays. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 94(2), 353-369 (1968).
- [14] Zhou, F.X.; Lai, Y.M.; Song, R.X.: Propagation of plane wave in non-homogeneously saturated soils. Science China Technological Sciences 56(2), 430-440 (2013).
- [15] Bryant, W. R.; Hottman, W.; & Trabant, P. : Permeability of unconsolidated and consolidated marine sediments, Gulf of Mexico. Marine Georesources & Geotechnology, 1(1), 1-14(1975).