

EFFET DE LA VARIATION VERTICALE DES PROPRIÉTÉS DE SOL SUR LA FONCTION D'AMPLIFICATION D'UN PROFIL DE SOL NON-HOMOGÈNE

EFFECT OF VERTICAL VARIATION OF SOIL PROPERTIES ON THE AMPLIFICATION FUNCTION OF NON-HOMOGENEOUS SOIL PROFILE

Réception : 17/02/2019**Acceptation : 23/06/2019****Publication : 30/06/2019**

ZAHAFI Amina, HADID Mohamed

École Nationale Supérieure des Travaux Publics, ENSTP Rue Sidi Garidi, BP 32, Kouba, 16051, Alger, Algérie E-mail : amina_zahafi@yahoo.com

Résumé. L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de la variation verticale des propriétés de sol sur la fonction d'amplification d'un profil de sol viscoélastique non-homogène. La non-homogénéité du sol est prise en considération en utilisant les corrélations de Wichtmann et Triantafyllidis [1, 2] et Hardin et Black [3] pour estimer le module de cisaillement G et le coefficient de Poisson ν du sol. Dans cet article, la fonction d'amplification d'un profil de sol est calculée par la méthode des couches minces (TLM). A ce titre, une étude paramétrique relative à l'influence de la variation verticale de l'indice d'uniformité C_u , l'angle de frottement φ , la masse volumique ρ , l'indice des vides e , le pourcentage de fines FC , l'indice de plasticité IP et l'indice de sur-consolidation OCR sur la fonction d'amplification d'un profil de sol non-homogène a été faite. Les résultats de ce travail ont montré que les paramètres qui ont une influence prépondérante sur la fonction d'amplification d'un profil de sol non-homogène sont l'indice des vides et le coefficient d'uniformité, l'indice de plasticité et l'indice de sur-consolidation. En revanche, il ressort que la variation de la masse volumique, de l'angle de frottement et le pourcentage de fines peut être négligée.

MOTS-CLES : Fonction d'amplification, Sol non-homogène, Variation des propriétés de sol, Méthode des couches minces.

Abstract. The aim of this paper is to study the effect of the vertical variation of soil properties on the amplification function of a non-homogeneous viscoelastic soil profile. Non-homogeneity of the soil is taken into account by using the correlations of Wichtmann and Triantafyllidis [1,2] and Hardin and Black [3] to estimate the shear modulus and the Poisson's ratio of the soil. In this article, the amplification function of a soil profile is calculated by Thin Layer Method (TLM). As such, a parametric study relating to the influence of the vertical variation of the uniformity index C_u , the friction angle φ , the density ρ and the void ratio e , the percentage of fines FC , the plasticity index IP and the over-consolidation index OCR on the amplification function of a non-homogeneous soil profile were made. The results of this work have shown that the parameters which have a predominant influence on the amplification function of a non-homogeneous soil profile are the void ratio, the uniformity coefficient, the index of plasticity and the index of on consolidation. On the other hand, it appears that the variation of the density, the angle of friction and the percentage of fines can be neglected.

Keywords: Amplification function, Non-homogeneous soil, Variation of the soil properties, Thin layer method.

1- Introduction

Les réponses des sols aux séismes indiquent que les propriétés locales du sol telles que le module de cisaillement, l'amortissement, le coefficient de Poisson, la masse volumique, le rapport d'impédance, la stratification du sol, etc. jouent un rôle déterminant dans ces réponses.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de la variation verticale des propriétés de sol sur la fonction d'amplification d'un profil de sol viscoélastique non-homogène. La non-homogénéité du sol est prise en considération par la variation du module de cisaillement et le coefficient de Poisson en profondeur en utilisant les corrélations de Wichtmann et Triantafyllidis [1, 2] et Hardin et Black [3].

Dans cet article, la fonction d'amplification d'un profil de sol viscoélastique non-homogène est calculée par la méthode des couches minces (TLM). Cette méthode consiste à subdiviser les couches d'un sol en sous couches suffisamment minces, ainsi, il est possible de linéariser les fonctions transcendantes incluses dans la matrice de rigidité et aboutir à des expressions algébriques. A ce titre, une étude paramétrique relative à l'influence de la variation verticale de l'indice d'uniformité C_u , l'angle de frottement φ , la masse volumique ρ , l'indice des vides e , le pourcentage de fines FC , l'indice de plasticité IP et l'indice de sur-consolidation OCR sur la fonction d'amplification d'un profil de sol non-homogène a été faite et ce, pour deux types de sol (grenu et cohérent).

2- Équation de mouvement

La version discrète de l'équation d'onde de cisaillement SH est un système d'équations à dérivées partielles de la forme suivante [4]

$$M \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - A \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + Gu = p(x, t) \quad (1)$$

avec :

- M , A et G sont des matrices bloc-triangulaire et symétriques et qui

dépendent seulement de l'ordre d'expansion de linéarisation des fonctions transcendantes et des propriétés matérielles des couches [5] ;

- $u = u(x, t)$ est le vecteur déplacement du mouvement à l'interface des couches ;
- $p(x, t)$ est le vecteur chargement ;
- x est la coordonnée horizontale ;
- t est le temps.

Pour les ondes SH planes se propageant selon un angle θ par rapport à la verticale et dans le domaine fréquences-nombres d'ondes, l'équation de mouvement Eq. (1) s'écrit comme suit [6] :

$$(G - \omega^2 M_{eqv}) \bar{U} = \bar{P} \quad (2)$$

Avec :

$$M_{eqv} = M - \frac{\sin^2 \theta}{c_s^2} A \quad (3)$$

$\bar{P}$ est le vecteur chargement dans le domaine fréquences-nombres d'ondes et les déplacements $\bar{U}$ sont obtenus par inversion de la matrice $(G - \omega^2 M_{eqv})$, cela nécessite la résolution du problème aux valeurs propres quadratiques suivant :

$$(G - k_j^2 M_{eqv}) \phi_j = 0, \quad j = 1, \dots, N \quad (4)$$

avec : k_j la $j^{\text{ème}}$ valeur propre et ϕ_j le $j^{\text{ème}}$ vecteur propre ; $\Phi = \{\phi_j\}$ et $K = \text{diag}\{k_j\}$.

Le déplacement dans le domaine fréquence-nombre d'ondes est déterminé par Kausel [4] par :

$$\bar{U} = \Phi D \Phi^t \bar{P} \quad (5)$$

Où :

$$D = (k^2 I - K^2)^{-1} \quad (6)$$

3- La fonction d'amplification

La fonction d'amplification $\bar{H}(\omega)$ est le rapport entre le vecteur déplacement et le déplacement à la base (Fig. 1)

$$\bar{H}(\omega) = \frac{\bar{U}}{u_0} \quad \text{avec : } u_0 = 1 \quad (7)$$

d'où :

$$\bar{H}(\omega) = \Phi D_L \Phi^t \bar{P} \quad (8)$$

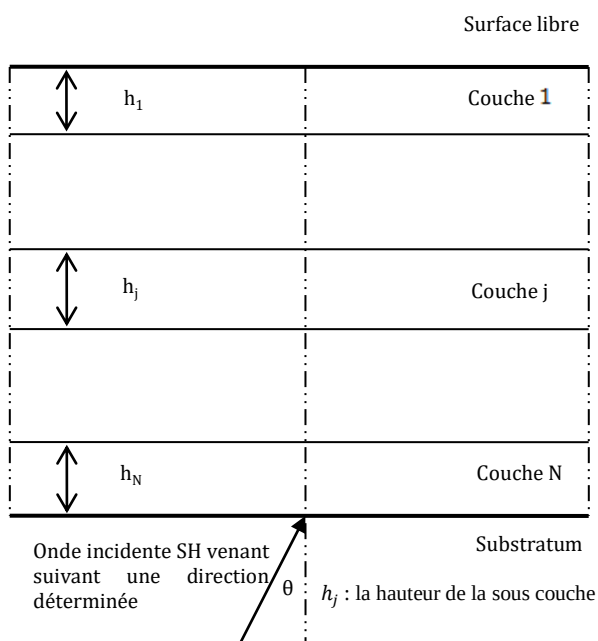


Figure 1: Sol stratifié reposant sur un substratum rocheux

Figure 1: Stratified soil on bedrock

3.1- Validation des résultats

Pour valider le code de calcul établi dans cette étude, on va traiter l'exemple d'un profil de sol viscoélastique homogène surmontant un substratum rocheux. Le profil de sol est modélisé par une couche d'une hauteur égale à 30 m est subdivisée en 120 sous-couches. Les propriétés du profil de sol sont présentées dans le Tab. 1. Les résultats obtenus sont comparés avec la fonction d'amplification obtenue analytiquement en utilisant le logiciel DEEPSOIL.

A partir de la Fig. 2 il ressort très nettement qu'il y a une concordance parfaite entre les résultats de calcul de la fonction d'amplification calculée à travers une formulation semi-analytique basée sur la TLM et la fonction d'amplification exacte calculée analytiquement en utilisant la matrice de transfert, d'où la validation et la précision de l'algorithme développé.

Tableau 1: Propriétés du profil de sol homogène

Table 1 : Homogeneous soil profile properties

Module de cisaillement G_{max} [MPa]	Masse volumique ρ [kg/m ³]	Coefficient d'amortissement β [%]	Coefficient de Poisson ν
120	2000	5	0,3

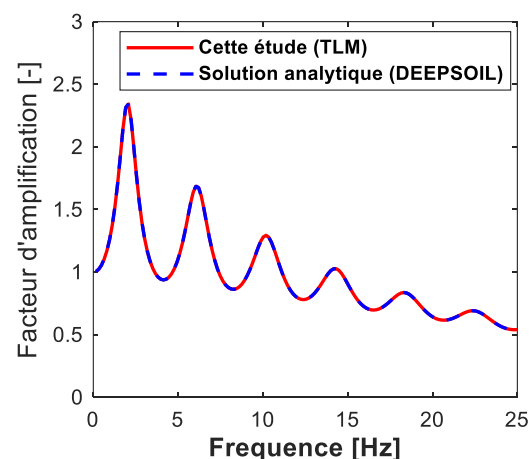


Figure 2: Comparaison entre la fonction d'amplification calculée par la TLM et la fonction d'amplification calculée analytiquement (DEEPSOIL)

Figure 2: Comparison between the amplification function calculated by the TLM and that calculated analytically (DEEPSOIL)

4- Estimation du module de cisaillement et coefficient de Poisson d'un sol non-homogène

En se basant sur plusieurs études, des procédures et des tests de laboratoire et in-situ, des corrélations ont été évaluées au cours de ces dernières années, pour l'estimation du module de cisaillement et du coefficient de

Poisson du sol. Les travaux les plus remarquables dans l'établissement de corrélation théorique ont été faits par Hardin et Black [3], Hardin et Drnevich [7], Richart [8], et Wichtmann et Triantafyllidis [1, 9]. Les expressions suggérées par eux ont été utilisées par de nombreux ingénieurs. Dans cette section, on va présenter certaines de ces expressions.

4.1- Estimation du module de cisaillement d'un sable non-homogène propre

Wichtmann et Triantafyllidis [1] se sont basés sur les formules de Hardin et Black [3] ainsi que celles de Seed et Idriss [10] pour développer des formules qui dépendent du coefficient d'uniformité C_u de la courbe granulométrique des sols comme suit :

$$G_{max} = A \frac{(a - e)^2}{1 + e} \sigma'_0{}^n \quad (9)$$

Avec :

$$a = 1.94 e^{-0.066 C_u} \quad (10)$$

$$n = 0.40 C_u^{0.18} \quad (11)$$

$$A = 1563 + 3.13 C_u^{2.98} \quad (12)$$

e est l'indice des vides;

$\sigma'_0 = \frac{\sigma_v}{3} (3 - 2 \sin \varphi)$ est la contrainte effective de confinement ;

$\sigma'_v = \rho g z$ est la contrainte effective verticale;

ρ est la masse volumique du sol;

g est l'accélération de la gravité;

z est la profondeur de la couche de sol;

φ est l'angle de frottement du sol;

e est l'indice des vides;

$C_u = d_{60}/d_{10}$ est le coefficient d'uniformité;

d_{60} est le diamètre du tamis correspondant aux passant de 60%;

d_{10} est le diamètre du tamis correspondant aux passant de 10%;

Wichtmann et Triantafyllidis [9] ont développé aussi une corrélation du module de cisaillement qui dépend de la densité relative D_r comme suit :

$$G_{max} = A_D \frac{1 + D_r/100}{(a_D - D_r/100)^2} p_{atm}^{1-n_D} \sigma'_0{}^{n_D} \quad (13)$$

Avec :

$$a_D = 11.6 \quad (14)$$

$$n_D = 0.48 \quad (15)$$

$$A_D = 740000 \quad (16)$$

$p_{atm} = 100 kPa$: pression atmosphérique

4.2- Estimation du module de cisaillement d'un sable cimenté non-homogène

Les dépôts de sable légèrement cimenté sont rencontrés dans de nombreuses parties du monde. Le matériau de cimentation dans les dépôts de sable est principalement du carbonate de calcium. Récemment, les résultats de plusieurs projets de recherche portant sur les propriétés de sable légèrement cimenté ont été publiés. Il apparaît que le comportement de ce dernier peut être reproduit en laboratoire par mélange de sable et du ciment Portland dans les proportions requises.

Wichtmann et Triantafyllidis [2] ont étendu les équations Eq. (9) à Eq. (12) pour étudier l'influence du pourcentage de fines (FC)

$$G_{max}(FC) = A \frac{(a - e)^2}{1 + e} \sigma'_0{}^n \quad (17)$$

Avec :

$$a = 1.94 \exp(-0.066 C_u) \exp(0.065 FC) \quad (18)$$

$$n = 0.40 C_u^{0.18} [1 + 0.116 \ln(1 + FC)] \quad (19)$$

$$A = (1563 + 3.13 C_u^{2.98}) \frac{1}{2} \quad (20)$$

$$[\exp(-0.3 FC^{1.1}) + \exp(-0.28 FC^{0.85})]$$

4.3- Estimation du module de cisaillement d'une argile non-homogène

Le module de cisaillement G des argiles peut être exprimé sous la forme suivante [7] :

$$G_{max} = \frac{3230(2.97 - e)^2}{1 + e} (OCR)^K \sqrt{\sigma'_0} \quad (21)$$

avec : OCR est l'indice de sur-consolidation du sol

$$OCR = \frac{\sigma'_{vc}}{\sigma'_v} \quad (22)$$

K est une constante qui dépend de l'indice de plasticité IP

$$K = -5 \times 10^{-8}(IP)^3 - 4 \times 10^{-5}(IP)^2 + 92 \times 10^{-4}(IP) + 25 \times 10^{-4} \quad (23)$$

4.4- Estimation du coefficient de Poisson du sol

Pour l'estimation du coefficient de Poisson ν Wichtmann et Triantafyllidis [12,13] ont proposé l'ensemble des équations suivantes, sur la base de la formule empirique de Hardin [14, 15]

$$\nu = \frac{\alpha}{4(1 - \alpha)} + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{4(1 - \alpha)}\right)^2 - \frac{\alpha - 2}{2(1 - \alpha)}} \quad (24)$$

avec :

$$\alpha = \frac{M_{max}}{G_{max}} \quad (25)$$

où : M_{max} est le module élastique contraint ; d'après Wichtmann et Triantafyllidis [13] il est exprimé par les équations suivantes :

$$M_{max} = A \frac{(a - e)^2}{1 + e} p_{atm}^{1-n} \sigma_0^m \quad (26)$$

Avec :

$$a = 2.16 \exp(-0.055 C_u) \quad (27)$$

$$n = 0.344 C_u^{0.126} \quad (28)$$

$$A = 3655 + 25.7 C_u^{2.42} \quad (29)$$

5- Etude paramétrique

Cette section a pour objectif d'étudier l'effet de la variation des propriétés de sol (l'indice d'uniformité C_u , l'angle de frottement φ , la masse volumique ρ , l'indice des vides e , le pourcentage de fines FC , l'indice de plasticité IP et l'indice de sur-consolidation OCR) sur la fonction d'amplification d'un profil de sol non-homogène reposant sur un substratum rocheux et ce, pour les deux types de profil de sol (sable et argile).

Pour déterminer la fonction d'amplification d'un profil de sol, les procédures décrites ci-dessus sont codées dans un programme informatique en utilisant le logiciel MATLAB R2007b. A l'origine, ce programme est utilisé uniquement pour un profil de sol homogène. En lui permettant de supporter la corrélation des propriétés de sol, en l'occurrence le module de cisaillement et le coefficient de Poisson, il est possible de déterminer la fonction d'amplification d'un profil de sol non-homogène. Ces procédures (corrélation et calcul de la réponse du profil de sol) sont codées dans un programme développé à cet effet.

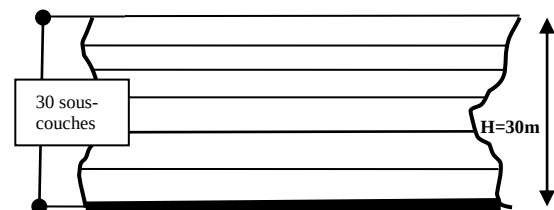


Figure 3: Monocouche non-homogène reposant sur un substratum rocheux

Figure 3: Non-homogeneous monolayer resting on a bedrock

5.1- Données du problème

On considère un profil de sol viscoélastique ($\beta = 5\%$) non-homogène, modélisé par une couche d'une hauteur égale à 30 m est subdivisé en 30 sous-couches (figure

3). Les propriétés du profil de sol sont présentées dans le Tab.2.a pour le sable non-homogène et le Tab.2.b pour l'argile non homogène. Chaque propriété de sol est variée séparément en gardant la valeur moyenne des autres propriétés (la valeur N° 2).

Tableau 2.a : Propriétés du sable non-homogène

Table 2.a : Non-homogeneous sand properties

N°	C_u	$\varphi [^\circ]$	$\rho [kg/m^3]$	e	FC [%]
1	2,5	40	1800	0,4	0
2	5	50	2000	0,6	20
3	10	60	2200	0,8	40

Tableau 2.b : Propriétés de l'argile non-homogène

Table 2.b : Non-homogeneous clay properties

N°	IP	OCR	$\rho [kg/m^3]$	e
1	20	2	1400	0,4
2	40	4	1600	0,6
3	60	6	1800	0,8

5.2- Résultats et analyse

Dans cette partie, on va étudier l'influence de la variation de l'indice d'uniformité C_u , l'angle de frottement φ , la masse volumique ρ , l'indice des vides e , le pourcentage de fines FC , l'indice de plasticité IP et l'indice de sur-consolidation OCR sur le module de cisaillement et la fonction d'amplification d'un profil de sol non-homogène surmontant un substratum rocheux en considérant deux types de sol : (i) sable non-homogène et (ii) argile non-homogène.

5.2.1- Sable non homogène

• Variation du coefficient d'uniformité C_u

Les figures 4 et 5 montrent respectivement la variation du module de cisaillement et de la fonction d'amplification en fonction du coefficient d'uniformité C_u du sable non-homogène. On voit bien qu'à chaque fois que C_u augmente, le module de cisaillement diminue et le sol devient plus meuble. Par ailleurs, on observe que l'augmentation de C_u induit aussi le décalage de la fréquence

fondamentale vers les basses fréquences et une augmentation de l'amplitude de la fonction d'amplification, ce qui indique un sol meuble.

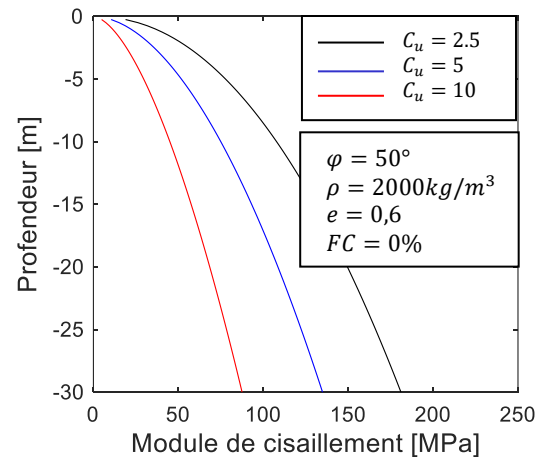


Figure 4: Module de cisaillement d'un sable non-homogène en fonction du coefficient d'uniformité

Figure 4: Shear modulus of non-homogeneous sand according to the coefficient of uniformity

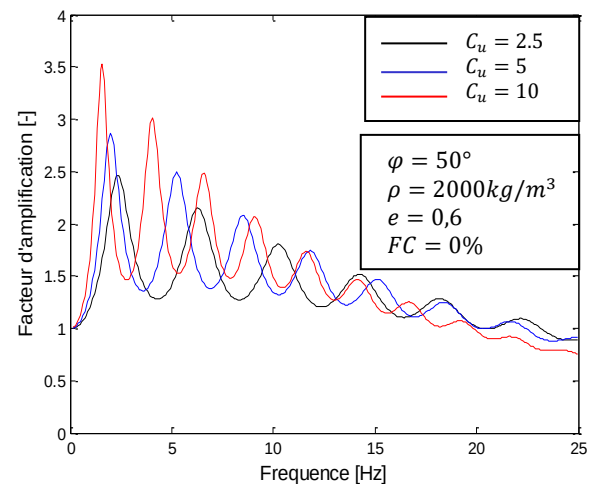


Figure 5 : Amplification d'un sable non-homogène en fonction du coefficient d'uniformité

Figure 5 : Amplification of non-homogeneous sand according to the coefficient of uniformity

• Variation de l'angle de frottement φ

Il est bien illustré dans les figures 6 et 7 que la variation de l'angle de frottement a un effet négligeable sur le module de cisaillement ainsi que le contenu fréquentiel et l'amplitude

de la fonction d'amplification du sable non-homogène.

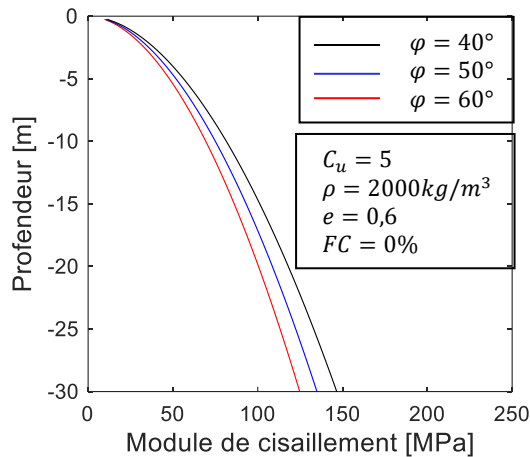


Figure 6: Module de cisaillement d'un sable non-homogène en fonction de l'angle de frottement

Figure 6: Shear modulus of non-homogeneous sand according to the angle of friction

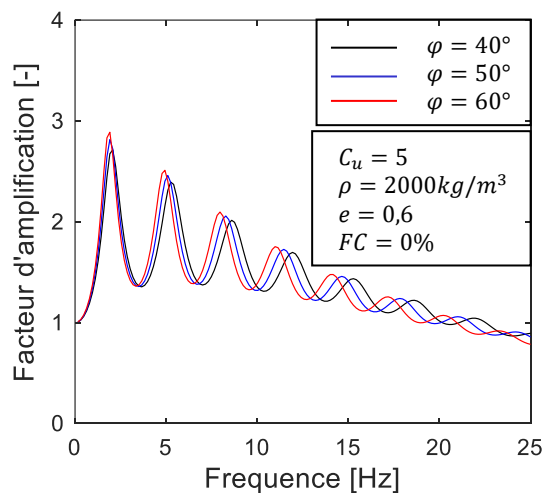


Figure 7: Amplification d'un sable non-homogène en fonction de l'angle de frottement

Figure 7: Amplification of non-homogeneous sand according to the angle of friction

• Variation de la masse volumique ρ

Les figures 8 et 9 montrent le module de cisaillement et la fonction d'amplification en fonction de la masse volumique ρ du profil de sable non-homogène respectivement. On remarque que ρ n'a pas d'effet sur le module de cisaillement ni sur la fonction d'amplification du sable non-homogène.

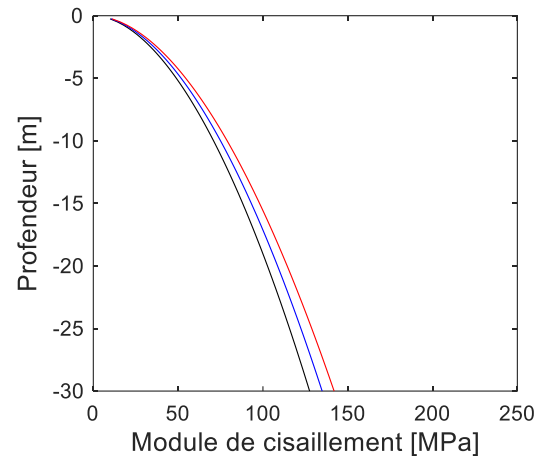


Figure 8: Module de cisaillement Amplification d'un sable non-homogène en fonction de la masse volumique

Figure 8: Shear modulus of non-homogeneous sand according to the density

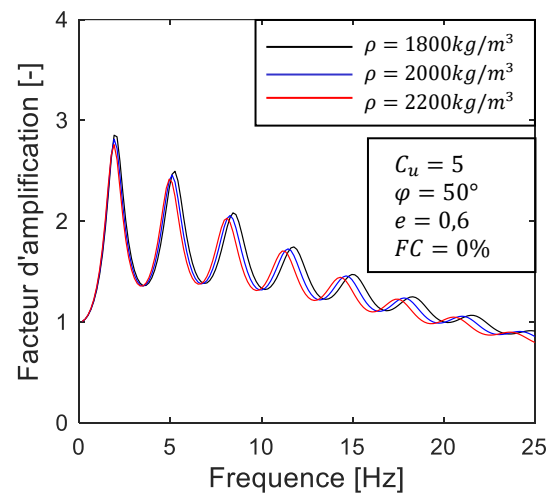


Figure 9: Amplification d'un sable non-homogène en fonction de la masse volumique

Figure 9: Amplification of non-homogeneous sand according to the density

• Variation de l'indice des vides e

L'effet de la variation de l'indice des vides e sur le module de cisaillement et la fonction d'amplification du sable non-homogène est présenté dans les figures 10 et 11 respectivement. On observe que l'augmentation de e fait diminuer le module de cisaillement significativement ce qui signifie que le sol devient meuble. Donc, la fréquence fondamentale de la fonction d'amplification est décalée vers les basses fréquences et

l'amplification devient plus importante pour les grandes valeurs de e .

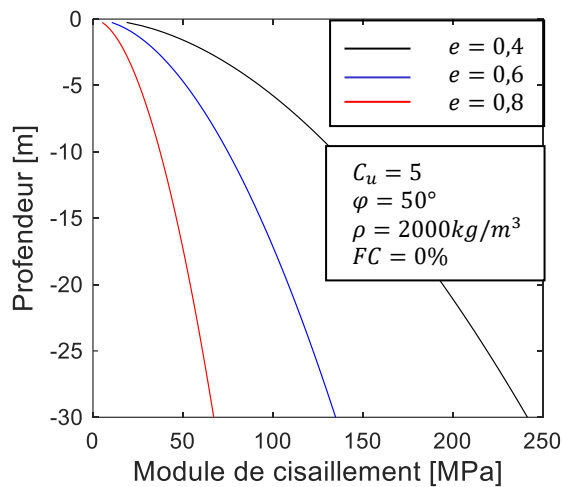


Figure 10: Module de cisaillement d'un sable non-homogène en fonction de la masse volumique

Figure 10: Shear modulus of non-homogeneous sand according to the density

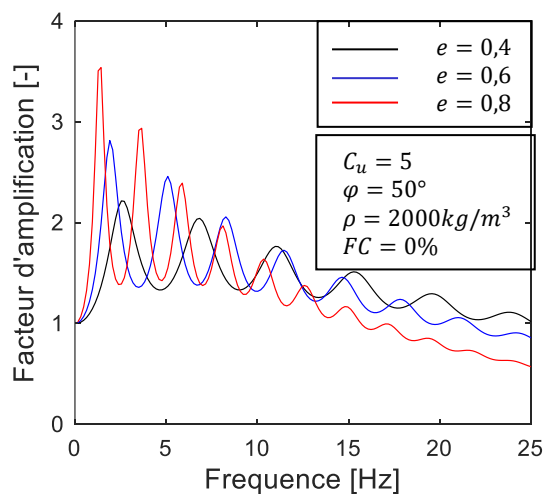


Figure 11: Amplification d'un sable non-homogène en fonction de l'indice des vides

Figure 11: Amplification of non-homogeneous sand according to the void ratio

• Variation du pourcentage des fines FC

Les figures 12 et 13 présentent respectivement le module de cisaillement et la fonction d'amplification d'un sable non-homogène en fonction du pourcentage de fines FC . Il est bien illustré que l'effet de FC peut être négligé.

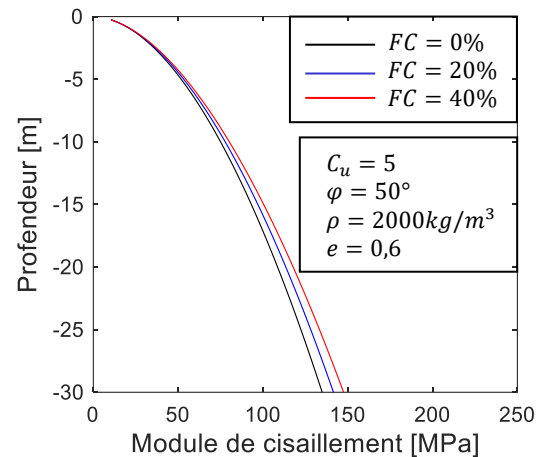


Figure 12: Module de cisaillement d'un sable non-homogène en fonction du pourcentage de fines

Figure 12: Shear modulus of non-homogeneous sand according to the fines percentage

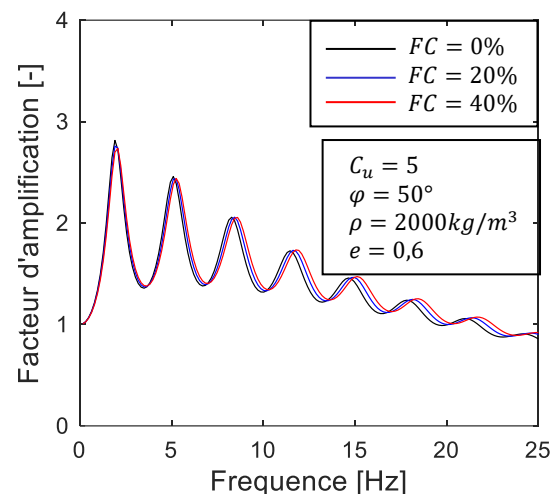


Figure 13: Amplification d'un sable non-homogène en fonction du pourcentage de fines

Figure 13: Amplification of non-homogeneous sand according to the fines percentage

5.2.2- Argile non homogène

• Variation de l'indice de plasticité IP

Le module de cisaillement et la fonction d'amplification des figures 14 et 15 sont déterminés en fonction de l'indice de plasticité IP . Il est montré que plus le sol est plastique (IP grand) plus le module de cisaillement augmente c.-à-d. le sol devient

plus rigide. Ce qui est en parfait accord avec les courbes de la Fig. 15 concernant la fonction d'amplification où il est bien clair que l'amplitude de l'amplification est atténuée et la fréquence fondamentale est décalée vers les hautes fréquences, ce qui indique un sol ferme.

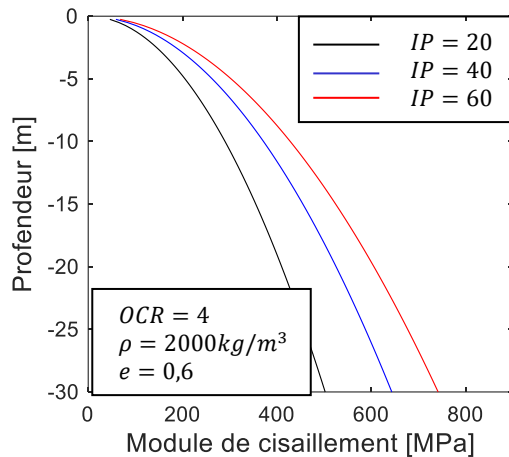


Figure 14: Module de cisaillement d'une argile non-homogène en fonction de l'indice de plasticité

Figure 14: Shear modulus of non-homogeneous clay according to the plasticity index

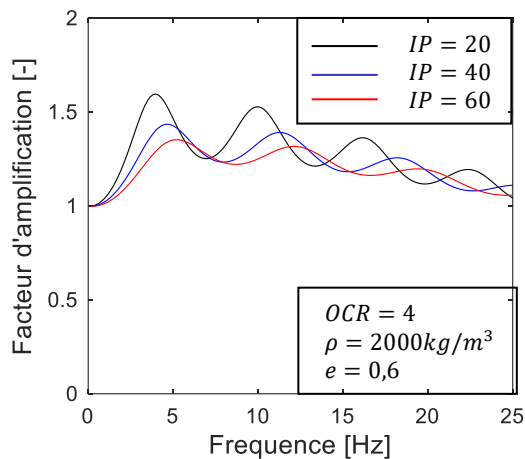


Figure 15: Amplification d'une argile non-homogène en fonction de l'indice de plasticité

Figure 15: Amplification of non-homogeneous clay according to the plasticity index

• Variation de l'indice de sur-consolidation *OCR*

Les figures 16 et 17 présente le module de cisaillement et la fonction d'amplification en fonction de la variation de l'indice de sur-consolidation *OCR* d'une argile non-homogène. A partir des courbes tracées, on peut dire que l'augmentation de *OCR* fait augmenter le module de cisaillement, ce qui rend le sol plus ferme d'où la diminution de l'amplification et le décalage de la fréquence fondamentale vers les hautes fréquences.

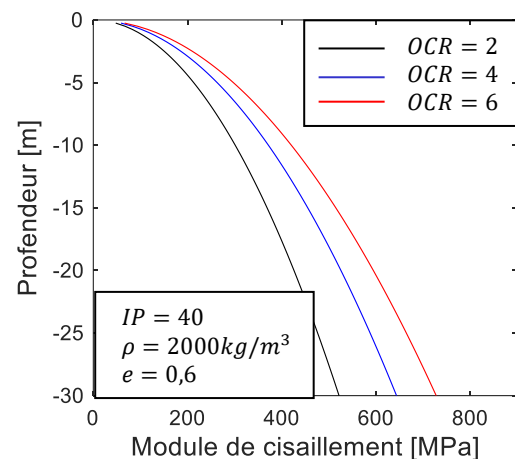


Figure 16: Module de cisaillement d'une argile non-homogène en fonction de l'indice de sur-consolidation

Figure 16: Shear modulus of non-homogeneous clay according to the over consolidation ratio

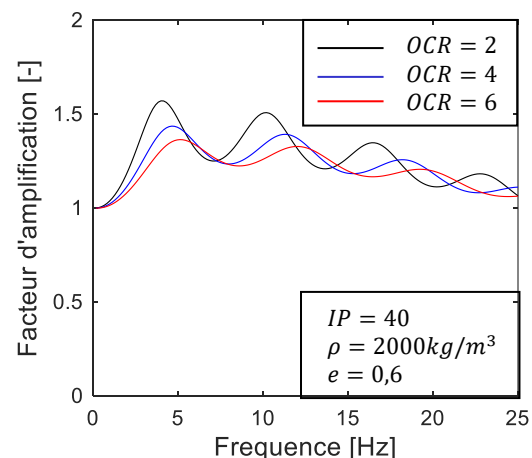


Figure 17: Amplification d'une argile non-homogène en fonction de l'indice de sur-consolidation

Figure 17: Amplification of non-homogeneous clay according to the over consolidation ratio

• Variation de la masse volumique ρ

Les figures 18 et 19 montrent la variation du module de cisaillement et de la fonction d'amplification d'une argile non-homogène en fonction de la masse volumique ρ . On remarque que la variation de ρ a une influence négligeable aussi bien sur le module de cisaillement que sur la fonction d'amplification de l'argile non-homogène.

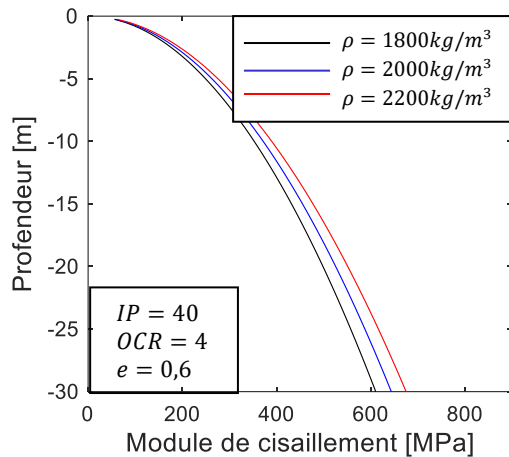


Figure 18: Module de cisaillement d'une argile non-homogène en fonction de la masse volumique

Figure 18: Shear modulus of non-homogeneous clay according to the density

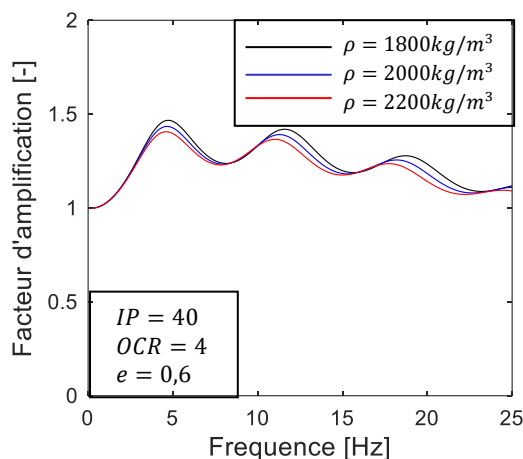


Figure 19: Amplification d'une argile non-homogène en fonction de la masse volumique

Figure 19: Amplification of non-homogeneous clay according to the density

• Variation de l'indice des vides e

L'effet de la variation de l'indice des vides e sur le module de cisaillement et la fonction d'amplification de l'argile non-homogène est présenté dans les figures 20 et 21 respectivement. On observe que l'augmentation de e fait diminuer le module de cisaillement significativement, ce qui signifie que le sol devient plus meuble. Aussi, on remarque que la fréquence fondamentale est décalée vers les basses fréquences et l'amplification devient plus importante, ce qui implique également que le sol devient souple.

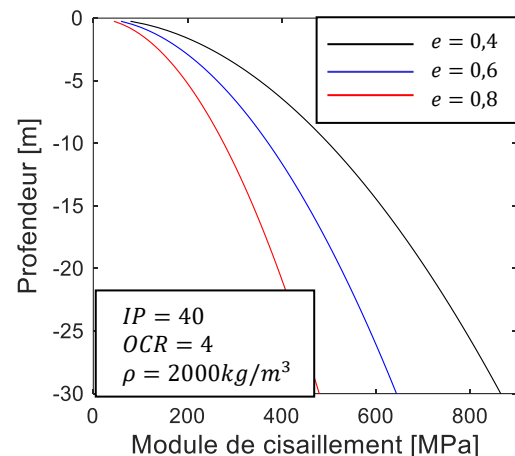


Figure 20: Module de cisaillement d'une argile non-homogène en fonction de l'indice des vides

Figure 20: Shear modulus of non-homogeneous clay according to the void ratio

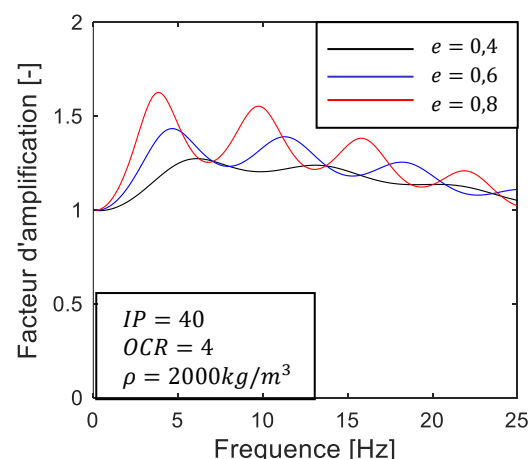


Figure 21: Amplification d'une argile non-homogène en fonction de l'indice des vides

Figure 21: Amplification of non-homogeneous clay according to the void ratio

6- Conclusion

Dans cet article, on s'est intéressé à l'étude de l'effet de la variation de la fonction d'amplification d'un profil de sol non-homogène reposant sur un substratum rocheux et ce, pour deux types de sol: sable et argile. Les propriétés du sol considérées sont l'indice d'uniformité C_u , l'angle de frottement φ , la masse volumique ρ , l'indice des vides e , le pourcentage de fines FC , l'indice de plasticité IP et l'indice de sur-consolidation OCR .

Il ressort des résultats obtenus que les paramètres qui ont une influence sur la fonction d'amplification d'un sable non-homogène sont l'indice des vides e et le coefficient d'uniformité C_u , par contre la masse volumique ρ , l'angle de frottement φ et le pourcentage de fines FC n'ont pas d'effet sur l'amplification. Dans le cas d'une argile non-homogène, on a constaté que les paramètres qui ont une influence prépondérante sur la fonction d'amplification sont l'indice des vides e , l'indice de plasticité IP et l'indice de sur-consolidation OCR , en contrepartie la masse volumique n'a pas d'effet.

Références bibliographiques

- [1] Wichtmann, T., and Triantafyllidis, T., (2009). 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, ASCE, 135(10): 1404-1418.
- [2] Wichtmann, T., Navarrete Hernández B. M.A., and Triantafyllidis, T., (2015). On the influence of a non-cohesive fines content on small strain stiffness, modulus degradation and damping of quartz sand. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 69 (2015)103–114.
- [3] Hardin, B. O., and Black, W. L., (1968). Vibration Modulus of Normally Consolidated Clays, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 94, No. SM2, pp. 353-369.
- [4] Kausel, E., (1986). Wave Propagation in Anisotropic Layered Media, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 23, pp. 1567-1578.
- [5] Kausel, E., (1994). Thin-Layer Method: Formulation in The Time Domain, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 37, pp. 927-941.
- [6] Hadid, M., Zahafi, A., (2011). Effet de la variabilité verticale des propriétés des sols sur la fonction d'amplification d'un profil de sol multicouche. Algérie Equipement, N° 50, pp. 14-21.
- [7] Hardin, B. O., and Drnevich, V. P., (1972). Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 98, No. SM7, pp. 667–692.
- [8] Richart, F. E., Hall, J. R. and Woods R. D., (1970). Vibration of soils and foundations. 1970, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- [9] Wichtmann, T. and Triantafyllidis, T., (2014). Stiffness and damping of clean quartz sand with various grain size distribution curves. J Geotech Geoenviron Eng 2014;140(3).
- [10] Seed, H.B. and Idriss, I.M., (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. Technical Report EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [11] Booker, E. W., and Ireland, H. O., (1965). Earth Pressure at Rest Related to Stress History, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 2, No. 1, pp. 1–15.
- [12] Wichtmann, T., and Triantafyllidis, T., (2010). On the influence of the grain size distribution curve on P-wave velocity, constrained elastic modulus M_{max} and Poisson's ratio of quartz sands. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30(8):757-766.
- [13] Wichtmann, T., and Triantafyllidis, T., (2013). Effect of uniformity coefficient on $G=G_{max}$ and damping ratio of uniform to well graded quartz sands. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 139(1):59–72.
- [14] Hardin, B.O., and Richart, Jr. F.E., (1963). Elastic wave velocities in granular



soils. J. Soil Mech. Found. Div., 1963;
89(SM1):33–65.

[15] Hardin, B.O., and Black, W.L., (1966).
Sand stiffness under various triaxial stresses.
Journal of the Soil Mechanics and Foundations
Division, ASCE, 92(SM2):27–42, 1966.