

ONDES DANS LES SOLS ARTIFICIELEMENT STRUCTURÉS PAR COUCHES HORIZONTALES

Wave propagation in artificial structured soils with horizontal layers

Stéphane BRÛLÉ¹, Stefan Enoch², Sébastien Guenneau²

¹ Ménard, Nozay, France

² Institut Fresnel, Marseille, France

RÉSUMÉ – L'enjeu des vibrations causées sur les existants par les travaux en zones urbaines active l'idée d'une quête de « maîtrise » des ondes ainsi générées. Une piste pour y parvenir est la structuration horizontale artificielle du milieu de propagation. Cette communication explore les possibilités offertes pour un sol multi-couche.

ABSTRACT – The issue of structures under vibration disturbance because of works achieved in urban areas activates the idea of a quest for "control" of the waves. One way to reach this objective is the propagation medium structuring. This paper explores the possibilities offered by a multilayer soil.

1. Introduction

La valorisation des remblais de friches industrielles en zones urbaines (Brûlé et al., 2010) par techniques de compactage dynamique (Ménard, 1974) a conduit notamment au développement du suivi et du contrôle des vibrations des ondes générées par ce type de source. Les expérimentations réalisées sur des chantiers montraient depuis les années 70 l'efficacité de barrières physiques constituées par de simples tranchées de quelques mètres de largeur et de profondeur (Allard, 1981 ; Liausu, 1981).

La recherche d'alternatives aux tranchées a notamment conduit à explorer les sols structurés et parmi ceux-ci une catégorie particulière constitués des métamatériaux sismiques (Brûlé et al., 2012). L'étude ces structures 2D et 3D aux propriétés exotiques (Brûlé et al., 2017a) n'interdit pas l'exploration de modèles de sol 1D, bicouches voire multicouches à stratification horizontale pour lesquels il est possible de percevoir l'influence des paramètres mécaniques avant et après travaux de densification de sols. Cet article est une étude de sensibilité de ces modèles.

2. Physique des milieux structurés pour la Géotechnique

Revenons tout d'abord au cas des sols renforcés par un ensemble d'inclusions verticales, sous sollicitation dynamique. D'un point de vue pragmatique vis-à-vis des vibrations, l'intérêt de ces structures est d'obtenir un ratio satisfaisant entre l'efficacité du dispositif et le taux de substitution du sol initial ($V_{\text{inclusions}}/V_{\text{sol}}$) par des vides ou des colonnes de matériaux d'apport (Brûlé et al., 2014, 2017b). L'efficacité de tels dispositifs s'apprécie sur différents critères comme la diminution de l'énergie totale reçue par la structure à préserver sur la durée du signal, la modification du contenu fréquentiel du signal incident, la modification de la forme d'onde en temporel.

Ces modifications apportées à un signal incident font appel à l'interaction des ondes avec les sols structurés (diffraction, résonances locales), à l'homogénéisation et à l'atténuation matérielle apparente. Dans ce contexte, la physique des ondes compose avec des effets de réflexion, de directivité, d'indice de réfraction négatif, etc.

Le lien entre les attentes du génie civil (problématique de contrôle des vibrations), la sismologie des sols superficiels, la dynamique des sols et les contraintes du génie parasismique s'effectue grâce au registre des sols « mous ». En effet, les sols peuvent avoir des caractéristiques mécaniques particulièrement faibles avec des modules de déformation de quelques MPa en petites déformations. L'étude des sédiments de la Vallée de Mexico donne une indication précise sur ce type de matériau, offrant parfois des valeurs de $V_{s,30}$ de l'ordre de 30 à 60 m/s. Considérant une valeur moyenne de $V_s = 60$ m/s pour la vitesse des ondes de cisaillement, le module de cisaillement moyen G_{\max} ou G_0 est compris entre 4.3 et 6.5 MPa pour des bornes de 1 200 à 1800 kg/m³ dans les argiles supérieures (AFPS, 2017). Avec de telles vitesses, pour une gamme fréquentielle allant de 1 à 5 Hz, il est question de longueur d'onde de quelques dizaines de mètres.

Dans ces conditions si singulières conduisant à avoir le même ordre de grandeur pour les longueurs d'onde et les dimensions caractéristiques des ouvrages de surface (Betbeder-Matibet, 2003), l'analogie avec des phénomènes physiques décrits en acoustique et en électro-magnétisme devient perceptible, comme la propagation des ondes dans les milieux périodiques.

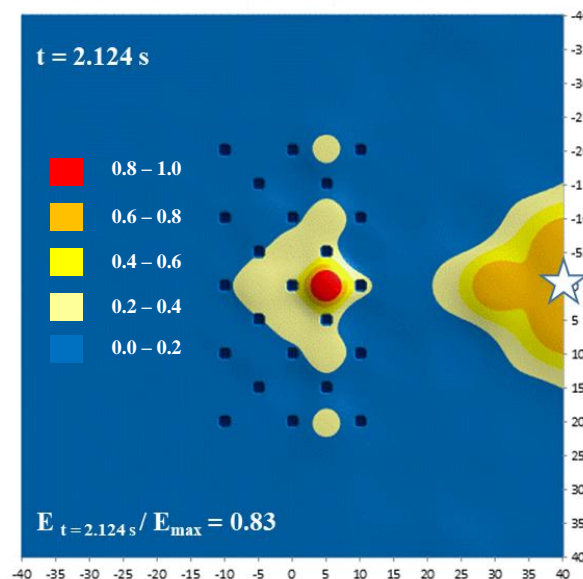


Figure 1. Exemple de réalisation sur sol structuré : distribution de l'énergie sismique dans un réseau de 23 trous (2 m de diamètre, 5 m de profondeur, maille carrée de 7.07 x 7.07 m tournée de 45°) avec une source générée par un impact en surface au moyen d'une masse de 17t ($x = 40$, $y = 0$). Le contenu fréquentiel moyen de la source est de 8 Hz (Brûlé et al., 2017b).

Dans ce référentiel d'étude, les Physiciens peuvent rechercher la démonstration de phénomènes exacerbés comme la maîtrise des ondes dans un volume composite fait de sol et de matériaux incorporés (Achaoui et al., 2017), allant jusqu'à obtenir des bandes fréquentielles interdites, autrement dit, des fréquences d'intérêt pour lesquelles, aucun signal n'aboutit à la structure à préserver.

L'approche géotechnique consiste plutôt à agir suffisamment sur un ou plusieurs paramètres (paramètres de sol ou de matériaux, les actions) afin de s'éloigner d'une situation jugée insatisfaisante d'un point de vue de la stabilité d'un ouvrage. Aussi pour y parvenir, de fortes modifications d'une donnée d'entrée, ne sont pas forcément indispensables et c'est l'illustration apportée dans cet article pour un cas d'onde volumique de type S et d'onde de surface de Rayleigh.

3. Modèle de sol 1D pour ondes S

Pour une situation géologique donnée avec stratification à dominante tabulaire et mouvement sismique en surface fonction de x ou y , l'hypothèse du modèle 1D est considérée satisfaisante (Figure 2-a). Considérons des ondes incidentes majoritairement planes et de type cisaillement (ondes S) avec une incidence verticale et une polarisation dans le plan (O, x, z) .

Nous faisons l'hypothèse de la validité de l'élastique linéaire pour le modèle de sol en considérant des déformations inférieures à 10^{-5} pour une sollicitation sismique du site en champ lointain. Retenant également l'hypothèse d'une onde plane réfléchie en surface et en phase avec l'onde incidente, il est possible d'exprimer une fonction de transfert théorique définie comme le rapport des amplitudes spectrales du déplacement en surface et au rocher (Figure 2-b). Cette fonction est sensible à l'épaisseur de couverture sur le rocher, à la vitesse V_S des ondes de cisaillement et à l'amortissement ξ_{sol} retenu. Dans ces conditions, la période $T_{0\ sol}$ pour le premier mode fondamental est obtenue par l'expression suivante (Equation 1) :

$$T_{0\ sol} = \frac{4H}{V_S} \quad (1)$$

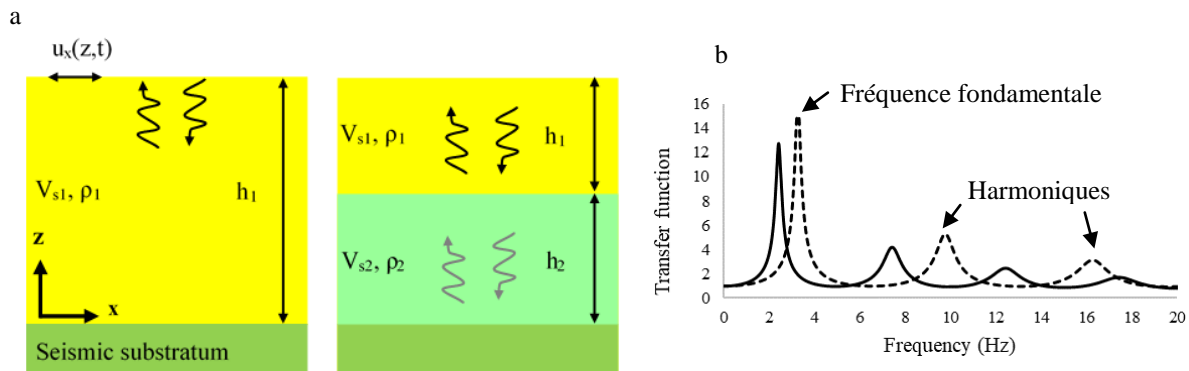


Figure 2. (a) Modèle 1D de sol et polarisation des ondes de cisaillement de vitesse V_S dans le plan (O, x, y) , soit dans un milieu bi-couche (à gauche) soit multicouche (à droite).
(b) Principe de la fonction de transfert pour un modèle de sol 1D.

Regardons le cas d'un sol de 30 m d'épaisseur reposant sur un substratum sismique (bicouche initial) et examinons deux situations après amélioration mécanique du sol de couverture : soit l'amélioration toute hauteur sur 30 m, soit l'amélioration sur les 10 premiers mètres. La vitesse initiale des ondes de cisaillement est de 200 m/s et nous considérons ici que l'amélioration des sols porte cette valeur à 260 m/s, soit +30% de la valeur initiale (Bitri et al., 2013). Pour les trois cas, l'amortissement matériel ξ_m est fixé à 5%.

Ces modèles simples pour des ondes S montrent qu'une modification des paramètres de sol en petite déformation peut conduire à faire évoluer significativement les fonctions de transfert. Toutefois, cette augmentation de la valeur V_s doit être significative. En effet, 30% d'augmentation d'un tel paramètre en petite déformation, cela représente la mobilisation d'une énergie importante en compactage dynamique, souvent sans commune mesure avec les chantiers habituels et surtout, l'atteinte de tels critères n'est pas nécessaire pour les objectifs de réduction des tassements sous fondation.

Le traitement de la totalité des 30 m avec ces hypothèses conduit à 30% d'augmentation de fréquence fondamentale f_0 , avec un passage de 1.67 à 2.16 Hz. Un traitement partiel sur 10 m n'entraîne qu'une faible modification de cette fréquence.

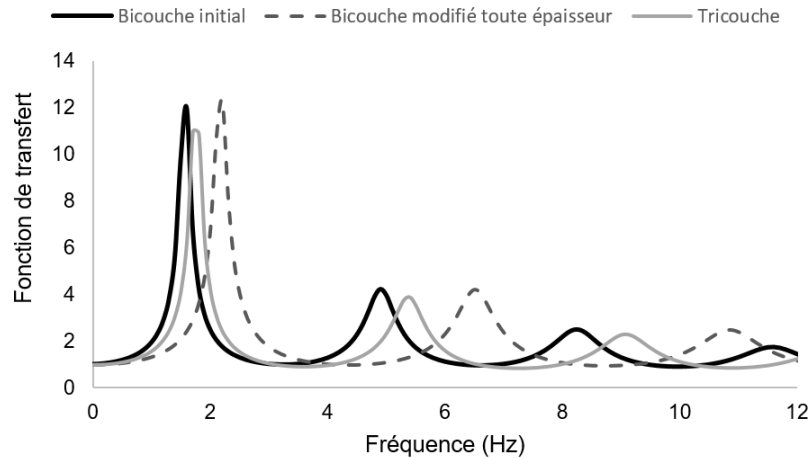


Figure 3. Fonction de transfert pour trois modèles : sol bicouche de 30 m d'épaisseur ($V_s = 200$ m) sur substratum sismique (courbe continue noire), le même modèle mais avec $V_s = 260$ m/s (courbe grise discontinue) et le modèle tricouche ($V_s = 260$ de 0 à 10 m et 200 m/s de 10 à 30 m, $\xi_m = 5\%$).

Explorons à présent le cas d'une alternance de deux couches aux propriétés contrastées. Chaque couche fait 5 m d'épaisseur mais nous alternons les propriétés : la première est une couche pour laquelle $V_{s1} = 100$ m/s, $\rho_1 = 1\,800$ kN/m³, $\xi_{m1} = 3\%$ (type 1) et pour la seconde, $V_{s2} = 800$ m/s, $\rho_2 = 2\,300$ kN/m³, $\xi_{m2} = 1\%$ (type 2). Le modèle comporte 5 doublets empilés. Avec ces propriétés le contraste d'impédance (type 2 / type 1) est supérieur à 10.

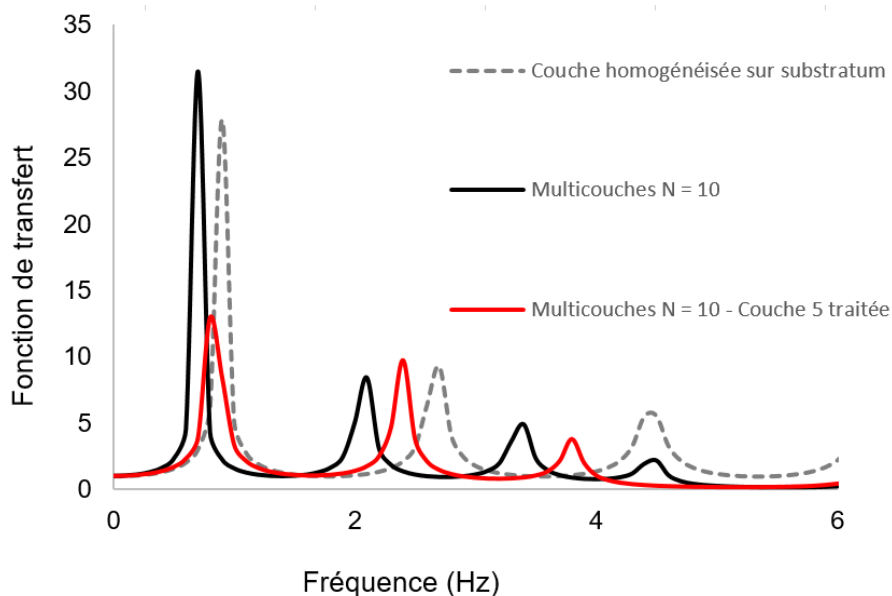


Figure 4. Comparaison de la fonction de transfert pour 3 cas : un sol multicouche ($N = 10$) avec une alternance de deux propriétés (courbe noire continue), un modèle d'épaisseur équivalente avec propriétés homogénéisées (courbe grise discontinue) et un modèle pour lequel la couche n°5, de type 1, est traitée pour avoir les caractéristiques de la couche de type 2 (courbe continue rouge).

La Figure 4 montre que l'homogénéisation des propriétés sur les 10 couches offre une approximation pour la période fondamentale mais les écarts sont importants pour les harmoniques. Le traitement d'une couche au centre du complexe (couche n°5), de type 1, pour lui conférer les propriétés du type 2, permet une forte diminution de l'effet d'amplification.

4. Approche qualitative de la dispersion des ondes de surface de type Rayleigh

Examinons l'influence de la propagation des ondes de surface quand un milieu homogène est transformé en un sol bi-couche. Dans un semi-espace infini, homogène et isotrope, la solution analytique du déplacement selon x et z (u_x et u_z) s'exprime ainsi pour des ondes de Rayleigh (Semblat et Pecker, 2009) :

$$u_x = \frac{i\omega}{V_R} A \left(e^{az} - \frac{2ab}{b^2 + \frac{\omega^2}{V_R^2}} e^{bz} \right) e^{i\frac{\omega}{V_R}(x - V_R t)} \quad (2)$$

$$u_z = aA \left(e^{az} - \frac{2\frac{\omega^2}{V_R^2}}{b^2 + \frac{\omega^2}{V_R^2}} e^{bz} \right) e^{i\frac{\omega}{V_R}(x - V_R t)} \quad (3)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{V_R} \quad (4)$$

Le terme imaginaire i dans u_x signifie que le déplacement horizontal est déphasé de 90° par rapport au déplacement vertical. La trajectoire des particules sont des ellipses. Avec les relations suivantes, exprimons l'équation reliant la vitesse des ondes de Rayleigh à celle des ondes S :

$$a = -k \sqrt{1 - \frac{V_R^2}{V_P^2}} \quad (5)$$

$$b = -k \sqrt{1 - \frac{V_R^2}{V_S^2}} \quad (6)$$

Ces solutions sont obtenues grâce à une relation de dispersion (équation de Rayleigh) obtenue en appliquant la condition de contrainte nulle à la surface libre ($\sigma_{zz} = \sigma_{xx} = 0$).

$$\left(2 - \frac{V_R^2}{V_S^2}\right)^2 = 4\left(1 - \frac{V_R^2}{V_P^2}\right)^{0.5} \left(1 - \frac{V_R^2}{V_S^2}\right)^{0.5} \quad (7)$$

Dans ces conditions, en surface libre ($z=0$), il existe une solution réelle telle que $0 < V_R < V_S$, satisfaisant la relation de dispersion. Une relation approchée reliant V_R et V_S par l'intermédiaire du coefficient de Poisson ν est donnée par Viktorov (1967) :

$$V_R \approx \left[\frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} \right] V_S \quad (8)$$

La vitesse de phase des ondes de Rayleigh se révèle ainsi étroitement liée à la vitesse de cisaillement V_S et au coefficient de Poisson ν du milieu. Par exemple, en choisissant une valeur de ν "réaliste" entre 0.2 et 0.4, alors il est possible de borner la valeur de V_R : $0.874.V_S < V_R < 0.955.V_S$.

En traçant les courbes des déplacements u_x et u_z , pour une valeur donnée de coefficient de Poisson (Figure 5), il apparaît que les ondes de Rayleigh mobilisent essentiellement une épaisseur de terrain correspondant à la longueur d'onde du signal considéré. Selon le contenu fréquentiel, cette profondeur varie mais pour des fréquences de quelques hertz dans les sols, cette dernière est comprise entre quelques mètres et quelques dizaines de mètres.

Ainsi, une modification des propriétés des sols sur ces profondeurs, est à même d'influencer de façon significative la propagation de ces ondes de surfaces, notamment si un sol initialement homogène est transformé en un sol bi-couche.

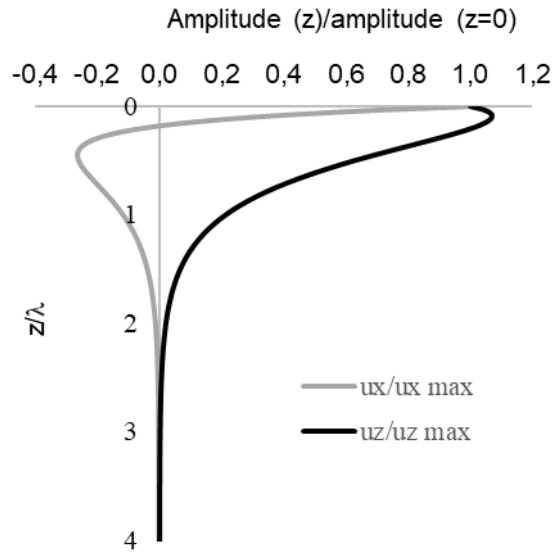


Figure 5 : Milieu constitué d'un demi-espace infini, homogène et isotrope. Mouvement normalisé des particules en horizontal ($u_x/u_x(z=0)$) et en vertical (u_z) selon la profondeur normalisée par la longueur d'onde z/λ et pour $\nu = 0.3$.

Examinons de façon qualitative, la transformation d'un sol homogène en un sol bi-couche. Pour une fréquence donnée, la relation de dispersion présente un nombre fini de racines réelles. Il existe un nombre discret de nombres d'onde k possibles. Les ondes de Rayleigh présentent donc différents modes de propagation. Les solutions modales pour le cas d'un demi-espace constitué de deux couches sont comparées à celle d'un demi-espace homogène sur la Figure 5 (Bodet, 2005). Ces modes de propagation peuvent être interprétés par la présence d'interférences constructives pour un milieu continûment hétérogène ou entre ondes transmises et réfléchies pour un milieu "multi-couches" (Foti, 2000). Ils reflètent en général les variations de vitesse de cisaillement du milieu avec la profondeur. C'est généralement le mode fondamental qui prédomine (Tokimatsu et al., 1992), mais la participation de chaque mode dépend de la stratification du sol autant que de la fréquence (Foti, 2000 ; Gucunski et Woods, 1991), ainsi que de la profondeur et de la nature de la source sismique.

Cette propriété de dispersion est celle retenue par les méthodes géophysiques générant des signaux en surface et détectant des ondes de surface portant une information sur les caractéristiques des matériaux du sous-sol.

Partant du cas d'un modèle théorique, toutefois peu réaliste avec les conditions sédimentaires conduisant toujours à une hétérogénéité par stratification naturelle, la Figure 5 illustre simplement le principe de la dispersion occasionnée pour les ondes de surface, dès modification des propriétés mécaniques des sols des premiers mètres sous la surface. Cette modification est sensible, non seulement sur le profil de vitesse V_s mais peut aussi conduire à créer un guide d'ondes.

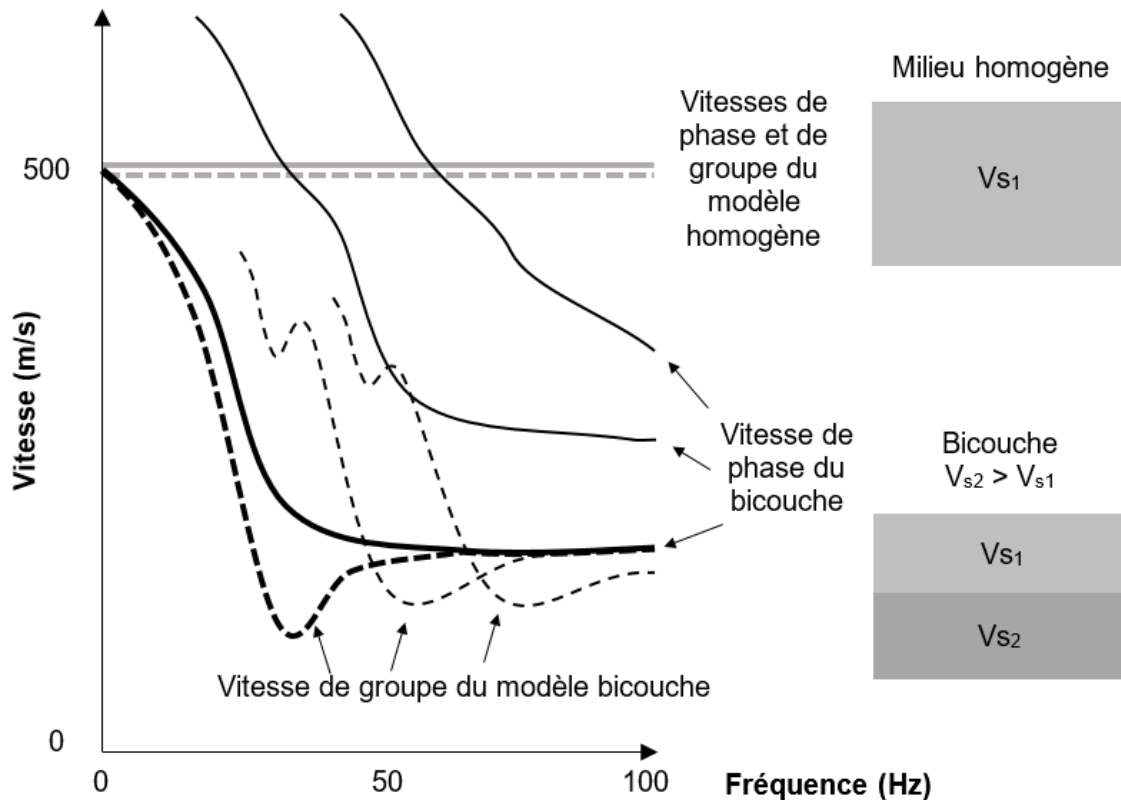


Figure 5 : Principe des courbes de dispersion de l'onde de Rayleigh (d'après Bodet, 2005). Comparaison entre le cas du demi-espace infini homogène et le modèle bi-couche à interface horizontale. Vitesses de phase et de groupe sont confondues pour le milieu homogène (traits en gris) car le milieu n'est pas dispersif tandis que ces vitesses sont distinctes et dispersives pour le modèle bi-couche (courbes en noir ; la courbe en trait épais correspond au mode fondamental et les autres, aux modes supérieurs ou harmoniques).

5. Conclusions

Dans le concept de la compréhension des phénomènes de propagation des ondes sismiques dans les sédiments situés dans la tranche des premiers mètres à plusieurs dizaines de mètres sous la surface du sol, des modèles simples, 1D, comme ceux présentés dans ce document, permettent d'apprécier la sensibilité de la propagation d'onde selon les paramètres mécaniques et géométriques.

L'idée attractive est de pouvoir agir voire « contrôler » cette propagation, de déplacer la valeur des périodes ou d'agir sur l'effet d'amplification.

Pour des modèles de sol à couches horizontales, l'action humaine à base de travaux d'amélioration de sol, économiquement raisonnables, reste limitée au traitement d'une voire deux couches de quelques mètres d'épaisseur.

Pour les ondes de volume de type S le traitement de tout le volume de sol jusqu'au substratum (compactage ou vibro-compactage) peut conduire à une modification significative de la réponse dynamique en surface. Dans le cas d'un alternat de couches aux propriétés contrastées comme dans l'exemple choisi, un traitement sélectif d'une des couches « molles » peut produire une nette diminution de l'amplification en surface.

Pour les ondes de surface, partant d'un espace semi-infini homogène, la création d'une couche de sol aux propriétés nouvelles entre la surface et une profondeur donnée ou une

couche intercalaire, constitue une véritable possibilité d'interaction sur la réponse dynamique en surface.

6. Références bibliographiques

- Achaoui Y., Antonakakis T., Brûlé S., Craster R.V., Enoch S., Guenneau S. (2017). Clamped seismic metamaterials: Ultra-Low Broad Frequency stop-bands. *New J. Phys.* (19) 063022.
- AFPS (2017). Rapport de la Mission Post-Sismique sur le séisme du Mexique du 19 septembre 2017.
- Allard P. (1981). Analyse des vibrations générées par pilonnage dynamique. *Revue Française de Géotechnique*, n°43bis, pp.127-133.
- Liausu P. (1981). Vibrations engendrées par le compactage dynamique. *Revue Française de Géotechnique*, n°43bis, pp.134-138.
- Betbeder-Matibet J. (2003). Génie Parasismique. Prévention parasismique. Vol. 3. Hermes Science Publications - Lavoisier, Cachan. 395 p.
- Bitri A., Samyn K., Brûlé S., Javelaud E.H. (2013). Assessment of ground compaction using multi-channel analysis of surface wave data and cone penetration tests. *Near Surface Geophysics*, 11, 683-690.
- Bodet L. (2005). Limites théoriques et expérimentales de l'interprétation de la dispersion des ondes de Rayleigh : apport de la modélisation numérique et physique, Thèse de l'Ecole Centrale et de l'Université de Nantes.
- Brûlé S., Javelaud E., Meneveaux P. (2010). Réhabilitation des friches industrielles par les techniques Ménard d'amélioration des sols. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2010*, 7-9 juillet 2010, Grenoble, France, pp. 933-940.
- Brûlé S., Javelaud E., Guenneau S., Enoch S., D. Komatitsch. (2012). Seismic metamaterials. *Proceedings of the 9th International Conference of the Association for Electrical, Transport and Optical Properties of Inhomogeneous Media in Marseille, France*.
- Brûlé S., Javelaud E. (2013). Méthode H/V en géotechnique. Application à un modèle bicouche, *Revue Française de Géotechnique*, n°142, pp.3-15.
- Brûlé S., Javelaud E.H., Enoch S., Guenneau S. (2014). Experiments on Seismic Metamaterials: Molding Surface Waves. *Physical Review Letters*, n°112, 133901.
- Brûlé S., Enoch S., Guenneau S. (2017a). Sols structurés sous sollicitation dynamique : des métamatériaux en géotechnique, *Revue Française de Géotechnique*, 151.
- Brûlé S., Javelaud E.H., Enoch S., Guenneau S. (2017b). Flat lens for seismic waves. *Sci. Rep.*, n°7, 18066.
- Foti S. (2000). Multistation Methods for Geotechnical Characterisation using Surface Waves. Ph. D. thesis, Politecnico di Torino.
- Gucunski N., Woods R. D. (1991). Use of Rayleigh modes in interpretation of SASW test, *Proc. 2nd Int. Conf. on Rec. Adv. in Geotech. Earth. Eng. and Soil Dyn.*, S. Louis 2, 1399–1408.
- Ménard L. (1974). La consolidation dynamique des sols de fondations. *Annales ITBTP*, pp. 194-222.
- Semblat J.F., Pecker A. (2009). Waves and vibrations in soils: earthquakes, traffic, shocks, construction works. *IUSS Press*, 499 p.
- Tokimatsu K., Tamura S., Kojima H. (1992). Effects of multiple modes on Rayleigh wave dispersion characteristics. *J. Geotech. Eng.* 118 (2), 1529–1543.