

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

New composite geomaterials for the mitigation of seismic effects

Les nouveaux géomatériaux composites pour l'atténuation des effets sismiques

Stéphane BRULE, *Ménard, France, stephane.brule@menard-mail.com*

Younes ACHAOU, *Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, younes.achaoui@fresnel.fr*

Bogdan UNGUREANU, *Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, bogdan.ungureanu@fresnel.fr*

André DIATTA, *Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, andre.diatte@fresnel.fr*

Ronald AZNAVOURIAN, *Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, ronald.aznavourian@fresnel.fr*

Stefan ENOCH, *Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, stefan.enoch@fresnel.fr*

Sébastien GUENNEAU, *Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, sebastien.guenneau@fresnel.fr*

ABSTRACT: The high density of deep foundation or ground reinforcement techniques in urban area, leads researchers to believe in a significant interaction of these buried structures with a certain component of the seismic signal. A promising way to cause a modification on the seismic disturbance is to create a complete dynamic artificial anisotropy by implementing geometrical elements, full or empty, in the soil. The physical process is the interference of waves (body or surface waves) scattered from surfaces or objects. The effects of the dynamic anisotropy are reinforced by the local resonance of implemented, which are disposed along a grid according to transformation elastodynamics and morphing tools that could theoretically lead to an ideal cloak detouring waves around a protected area. In this periodic or non-periodic media, the desired effects are total reflection (Bragg's effect), band-gaps, wave-path control, attenuation by energy-dissipation, etc.

RÉSUMÉ : La forte densité des fondations profondes ou des renforcements de sol en zone urbaine, amène les chercheurs à envisager une interaction significative de ces structures sismiques avec certaines composantes du signal sismique. Une approche prometteuse pour modifier le signal sismique entrant est de créer une complète anisotropie dynamique artificielle en positionnant des éléments géométriques dans le sol, pleins ou vides. Les phénomènes physiques provoqués sont les interférences des ondes (de volume ou de surface) diffractées sur les surfaces et les objets. Les effets de l'anisotropie dynamique sont renforcés par les résonances locales des éléments insérés dans le sol et par le dimensionnement issu des techniques d'élasticité transformationnelle et du morphing pouvant conduire théoriquement jusqu'aux capes d'invisibilité qui détournent les ondes autour d'une zone protégée. Dans ces milieux périodiques ou non, les effets désirés sont la réflexion totale (effet de Bragg), les bandes interdites, le contrôle du cheminement des ondes, l'atténuation par dissipation d'énergie, etc...

KEYWORDS: composite geomaterials, seismic metamaterials, mitigation of seismic effect, transformation elastodynamics.

1 GEOTECHNIQUE ET SOLS STRUCTURÉS

Les techniques de fondations profondes (pieux, barrettes, parois moulées, etc.), d'amélioration de sol (compactage dynamique, vibrocompactage, etc.) et de renforcement de sol (inclusions rigides, inclusions souples, etc.) évoluent vers l'augmentation des longueurs des éléments constitutifs avec des records de profondeur pouvant aller de 50 à 70 m pour les inclusions rigides par exemple (Figure 1). D'autre part, une amélioration de l'industrialisation de ces procédés permet d'envisager un degré croissant de densification des éléments incorporés dans le sol hôte. Ainsi, le taux de substitution du sol, défini comme le rapport des volumes $V_{inclusions} / V_{sol}$ soit le volume des inclusions sur le volume de sol est croissant au point de rechercher à définir les propriétés mécaniques de ce nouveau milieu « composite » (Brûlé, Enoch et Guenneau 2016), que nous regroupons sous le terme générique géomatériaux composites, englobant notamment les métamatériaux sismiques (Brûlé et al. 2012). Par analogie avec l'Optique et l'acoustique (cristaux phononiques), avec ces géomatériaux composites d'un nouveau genre, les effets suivants sont recherchés : création de bandes fréquentielles interdites pour les premiers modes de vibration des ouvrages, influencer la distribution d'énergie sismique en faveur de la construction, agir sur la diminution de la composante horizontale du signal, nuisible aux structures, etc.

1.1 Analyse pseudo-statique des sols structurés

En Géotechnique, les sols composites étudiés en condition pseudo-statique font l'objet d'une attention spécifique notamment quand il s'agit d'obtenir une augmentation du module de cisaillement du sol initial pour limiter la déformation du massif sol-fondations profondes.

En dimensionnement des structures, le problème dynamique est souvent converti en problème statique équivalent (analyse pseudo-statique), à partir d'un chargement temporel ou d'un spectre. Pour obtenir ces nouvelles propriétés, deux approches sont identifiables. La première consiste à renforcer un sol initial plutôt « mou » avec adjonction d'éléments verticaux plus « rigides », souvent cylindriques, en béton, mortier, métal voire en bois (AFPS-CFMS 2012). A ce titre, les travaux de Patrick De Buhan ont été précurseurs sur la qualification de ces matériaux renforcés (De Buhan 1986) avec des applications remarquables en génie civil comme les fondations du Pont Rion-Antirion dans le Golfe de Corinthe (Pecker et al. 2009). Ces avancées ont été poursuivies par des recherches récentes en conditions de chargement statique et dynamique (Guéguin 2014 ; Nguyen 2014). La caractérisation du matériau équivalent fait appel à des techniques d'homogénéisation (Sanchez-Palencia E. 1980).

La seconde approche consiste à augmenter les propriétés mécaniques des sols dans leur masse par densification (Brûlé et al. 2010 ; AFPS 2012 ; Bitri et al. 2013 ; Brûlé et al. 2016a), ce qui peut offrir à la fois la possibilité de contraindre l'intensité de l'amplification du signal sismique dans le cas d'un modèle bi-couche, avec rai sismique incident verticalisé et polarisation

des ondes de cisaillement dans le plan horizontal, et d'obtenir une meilleure résistance mécanique des sols ainsi densifiés.

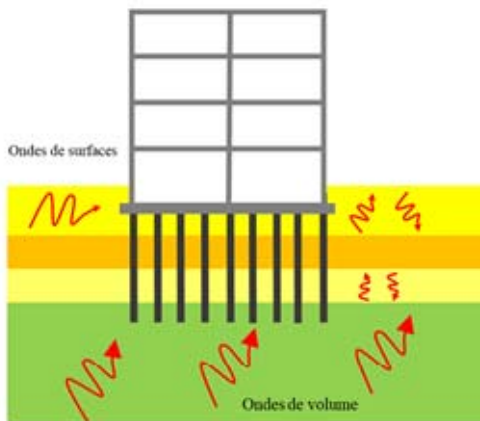


Figure 1. Ondes de volume (pression P et cisaillement S) avec réfractions multiples dans un milieu stratifié et ondes de surface (Rayleigh R et Love L) apparaissant à l'interface libre sol-air.

1.2 Analyse temporelle et spectrale des sols structurés sous chargement dynamique

Selon notre approche, la finalité de sols structurés consiste à rechercher des effets complémentaires à leur rôle traditionnellement recherché, à savoir s'opposer à un effort ou à un déplacement imposé avec de nouvelles propriétés mécaniques. Le regard nouveau proposé est d'essayer d'agir sur la propagation géométrique du signal lui-même et sur son contenu fréquentiel : infléchir le trajet d'un rai sismique, filtrer certaines fréquences du signal, guider, etc. Nous distinguerons donc les matériaux structurés de nature « composite » soumis à des sollicitations monotones, des « métamatériaux » offrant des propriétés inédites en sollicitations dynamiques. Dans les deux cas, il s'agit de structurer les sols mais le positionnement des éléments additionnels peut être ajusté spécifiquement dans le cas des métamatériaux.

1.3 Avancées récentes

Venant du domaine de l'optique et de l'acoustique et en particulier depuis une quinzaine d'années (Ma et al., 2016 ; Sheng, 2014), des travaux de recherche portant sur l'optique transformationnelle (Nicolet et al., 2004), les modèles de plaque (Farhat et al., 2009 ; Colombi et al., 2015) et les ondes hydrodynamiques à la surface de l'eau (Farhat et al., 2008 ; Berraquero et al., 2013 ; Dupont et al., 2015) ont contribué à la transposition aux ondes mécaniques sismiques avec des expérimentations sur site avec des réseaux de forages verticaux vides sollicités à 50 Hz et entre 3 et 12 Hz (Brûlé et al., 2014 ; Brûlé et al., 2016b). Les études théoriques sur les dispositifs anti-vibration relatifs aux sources telles le trafic routier ou ferroviaire sont abondantes cependant les expériences réalisées en vraie grandeur sont plus rares. En 2004, pour valider le principe d'homogénéisation des milieux hétérogènes pour des conditions déterminées, des sols rendus artificiellement hétérogènes, constitués d'une planche d'essai horizontale avec 5 unités de matériaux, alternant un sol homogène et un sol constitué rangées de briques ont été testés par émissions d'ondes de surface sur des modèles réduits (Abraham et al., 2004). Le signal, de fréquence comprise entre 80 et 1 000 Hz, était généré par la chute d'une masse métallique de 2.5 cm de diamètre impactant le sol après quelques centimètres de hauteur de chute. Semblat et Pecker (Semblat et al., 2009) reportent les

travaux réalisés in situ par Woods en 1968 sur des barrières anti-vibratiles circulaires ou linéaires, testées avec des sources produisant des fréquences allant de 200 à 350 Hz. Ces travaux montrent une réduction d'amplitude du signal en fonction des caractéristiques géométriques de la barrière. Très récemment, des liens indirects avec les réseaux cristallins, dont celui du graphène (Aznavourian et al., 2016) sont identifiables dans la littérature comme les cellules d'abeille décrites par Takemiya et al. en 2002, montrant des pieux au centre des structures hexagonales faites de colonnes jointives de sol-ciment. L'objectif était plutôt d'améliorer la raideur de l'ensemble du massif « sol et pieux » et d'utiliser ces colonnes comme dissipatrice d'énergie à la faveur de leur endommagement lors de forts séisme.

2 EFFETS DES RESONANCES LOCALES

Nous devons d'abord définir notre système mécanique. Il est constitué à la fois d'un volume de sol à la surface duquel se trouvent des bâtiments, les fondations implantées dans le sol pour chacun de ces ouvrages (par exemple des fondations sur pieux de 10 à 50 m de profondeur) et la superstructure elle-même, à savoir les bâtiments. Il s'agit là d'un ensemble complexe de matériaux aux propriétés mécaniques différentes (le sol, le béton, le bois, l'acier etc.), mais il est possible de représenter le comportement dynamique de toute structure linéaire à l'aide d'un nombre réduit de paramètres modaux que sont par exemple les fréquences propres, l'amortissement et les formes propres associée (Piranda, 2001). Le comportement dynamique d'un tel système sous des conditions d'excitations particulières, comme les secousses sismiques, ne requiert que la seule connaissance de ces paramètres. En posant la problématique de cette façon, les chercheurs se sont déjà offert la possibilité d'identifier les propriétés de résonance des structures, considérées individuellement (sol, fondations, structures) et dans leur ensemble. Dans le domaine des cristaux phononiques, les physiciens (Liu et al., 2000, Achaoui et al., 2013), considèrent que l'origine des bandes interdites peut avoir deux origines : l'interférence de Bragg des ondes diffusées et l'hybridation des résonances locales. Ainsi, l'approche permettant de créer des bandes interdites à basse fréquence, plus en adéquation avec le contenu fréquentiel du signal sismique, par rapport aux gaps de Bragg, est l'utilisation des résonances locales pour constituer des structures avec un pas de réseau inférieur à la longueur d'onde du signal incident (structure sub-longueur d'onde). Le milieu solide avec ses inclusions, sphériques par exemple, peut être modélisé par une discrétisation 3D de l'espace où les éléments sont reliés par des liaisons élastiques. Il est possible d'aller plus loin en considérant l'inclusion, pas seulement avec une masse, mais avec une masse imbriquée (Achaoui et al., 2016, Krodell et al., 2015). Cette approche permet de concevoir des bandes interdites dans le diagramme de dispersion. Ces approches conceptuelles permettent une étude plus riche des systèmes mécaniques ; les éléments sollicités à leur fréquence fondamentale de résonance et aux harmoniques associées, deviennent des sources spécifiques, produisant dans le cas présent un signal mécanique qui, dans certaines conditions, peut interagir avec la sollicitation affectant le système dans son ensemble. Cette interaction peut se traduire par une diminution des effets de la sollicitation elle-même sur le système. Mais cette seule description du phénomène physique ne suffit pas et il faut introduire la notion de milieux périodiques.

3 PHYSIQUE DES MILIEUX PERIODIQUES

Un milieu périodique est un volume dans lequel un motif est

reproduit selon l'une, les deux ou les trois directions de l'espace. Par un exemple, un minéral, qui est un solide naturel homogène avec une structure atomique ordonnée et une composition chimique définie, peut être décrit par son système cristallin de Bravais caractérisé par une maille élémentaire (maille cubique, hexagonale, etc.). Cette maille élémentaire, caractérisée par trois côtés (a , b et c) et trois angles caractéristiques (α , β et γ) est reproduite successivement dans les trois directions de l'espace sur la base des propriétés de symétrie de la maille elle-même, grâce aux transformations de type « isométrie » (groupe des transformations de l'espace) : centre, plans et axes de symétrie. Intervenant sur les caractéristiques géométriques des réseaux de fondations profondes en 2 dimensions (2D), constitués par exemple de pieux, c'est-à-dire d'éléments cylindriques verticaux (en béton, en métal voire en bois) plus rigides que le sol dans lequel ils sont fichés, les Physiciens ont fait l'analogie de ce système ainsi constitué de sol et d'un matériau exogène (les inclusions) avec la structure périodique des cristaux.

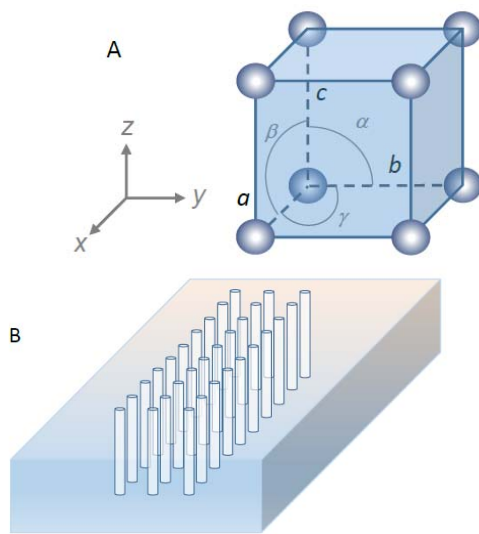


Figure 2. A - Exemple de maille cristalline élémentaire, cubique simple ($a = b = c$ et $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) et réseau d'inclusions rigides fichées verticalement dans le sol (B).

Comme pour un cristal, ces nouveaux milieux artificiels constitués de sol et d'éléments géométriques pleins ou vides, sont rendus anisotropes, c'est-à-dire que leur réponse à une sollicitation donnée (passage d'une onde électromagnétique pour les cristaux ou passage d'une onde mécanique pour les sols structurés), est différente selon la direction d'application. En combinant la physique des milieux périodiques et l'interférence des ondes diffractées sur les surfaces des objets aux propriétés de résonance des éléments constituant ce système mécanique, l'objectif est voir des phénomènes tels que les bandes interdites (le signal ne traverse pas le système pour certaines gammes de fréquence), la directivité des ondes (Diatta et al., 2016), l'atténuation, etc. Cependant, de simples structures périodiques ne pourraient suffire à atteindre le but que constitue la recherche d'une maîtrise de l'onde franchissant le système mécanique. Il faut pour cela explorer d'avantage l'anisotropie des milieux en recherchant des maillages non-réguliers dont le dimensionnement fait notamment appel à la physique transformationnelle.

Afin d'illustrer l'analogie de l'interaction des ondes avec la matière à différentes échelles et revenir aux conditions géotechnique, prenons le cas de l'expérience réalisée en laboratoire en 1998 par Vasseur et co-auteurs. L'expérience consistait à tester pour des fréquences de plusieurs dizaines de

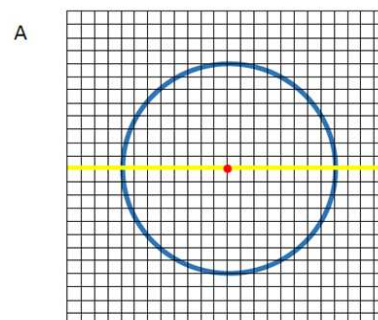
kHz un modèle physique contenant les cylindres verticaux de Duralium (diamètre 16mm, entraxe a de 20 mm) dans une matrice cubique de 10 cm de côté en résine époxy (Vasseur et al., 1998). Ces deux matériaux ont été choisis pour le contraste de leurs caractéristiques mécaniques : $E_{\text{duralium}}/E_{\text{epoxy}} = 17.65$. Ce rapport de module est à comparer par exemple avec celui du béton et d'un sol compressible $E_{\text{béton}}/E_{\text{sol}} > 40$. Les rapports de module $E_{\text{duralium}}/E_{\text{epoxy}}$ et $E_{\text{béton}}/E_{\text{sol}}$ sont du même ordre de grandeur avec les hypothèses choisies (Brûlé et al., 2015). Sur le modèle physique, les auteurs ont en effet observé des bandes de fréquences interdites telles que $0.43 < a/\lambda < 0.97$, c'est-à-dire que l'entraxe a était plus petit que les longueurs d'onde de la bande des fréquences employées. Revenons à présent sur la géotechnique des fondations profondes ou du renforcement des sols avec éléments cylindriques verticaux dans le sol, sachant que les fréquences enregistrées pour les sollicitations sismiques sont comprises entre 0.1 et 10 Hz et que les vitesses des ondes de cisaillement V_s des sols non-rocheux de surface sont inférieures à 800 m/s (norme EN 1998). En faisant l'hypothèse de milieux élastiques, toutes proportions gardées, si un rapport $a/\lambda \sim 0.5$ est recherché avec un maillage carré d'inclusions verticales à entraxe de l'ordre du mètre, il faut nécessairement considérer des sols à la vitesse de propagation très faible ($V_s < 150$ m/s) pour espérer observer des bandes de fréquences interdites. Cependant, en laboratoire, le taux de substitution était de 50%, ce qui, à part pour des travaux exceptionnels, ne serait pas atteint en fondations spéciales ni en renforcement de sol. De surcroît, l'objectif n'est pas uniquement de rechercher des effets de type « miroir de Bragg », observés expérimentalement sur chantier (Brûlé et al., 2014), i.e. longueur d'onde comparable à l'entraxe des éléments car, à part pour les vibrations anthropiques de quelques dizaines de Hz, l'application aux fréquences des séismes imposerait des structures de forte emprise dans le sol.

Ce sont les raisons pour lesquelles il est nécessaire d'explorer des sols structurés de type « sub-longueur d'onde » c'est-à-dire avec des mailles très inférieures à la longueur d'onde des signaux les sollicitant.

4 OPTIQUE TRANSFORMATIONNELLE

Nous utilisons les outils permettant de décrire le passage d'un problème exact comme la propagation des ondes dans un milieu continu, régit par une équation aux dérivées partielles, au problème approché discret, comme la méthode des éléments finis. Dans ce cas, nous allons fictivement introduire une anisotropie dans le milieu de propagation (Figure 3A) en procédant à de multiples possibilités de distorsions de l'espace discrétisé (Figure 3B) grâce à la physique transformationnelle.

Sont retenues les configurations théoriques apportant des propriétés intéressantes comme une directivité efficace des ondes, comme par exemple une configuration permettant le contournement de tout ou partie de l'énergie (sismique) menaçant de solliciter un objet (un bâtiment). Ensuite, il s'agit de déterminer s'il est possible de donner une réalité à ce matériau théorique (Diatta et al., 2016) en convertissant son anisotropie sur le terrain, c'est-à-dire grâce à une distribution d'objets ou de vides dans un sol (Figure 3 B).



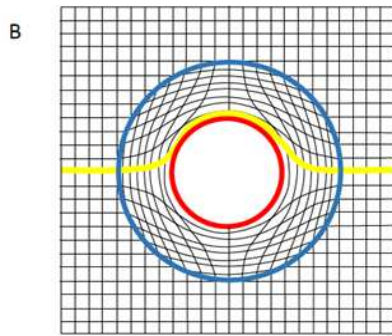


Figure 3. Illustration de l'application d'un disque (A) sur une couronne (B). Figure inspirée de Pendry, Schurig et Smith, 2006.

5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les sols structurés sont déjà une réalité dans l'Acte de Construire. En comparant les ordres de grandeurs des contrastes de propriétés mécaniques des différents éléments et en examinant les longueurs d'onde sismiques, des similitudes existent entre les cristaux phononiques venant du domaine de l'Acoustique et un sol contenant des cylindres verticaux constitués d'un matériau beaucoup plus rigide. Dans un premier temps, de tels métamatériaux pourront voir le jour si, par exemple, un traitement plus classique pour le renforcement des sols est déjà prévu pour la portance et le tassement. Les pistes à explorer sont à rechercher dans les maillages non-réguliers, faisant appel à l'optique transformationnelle et l'anisotropie dynamique finement dimensionnée (Guenneau et al., 2015 ; Diatta et al., 2016) et dans les taux de substitution importants (cellules en paroi sol-béton, en réseau 2D, voire 3D).

6 REFERENCES

Abraham O., Chammas R., Cote Ph., Pedersen H.A., Semblat J.F. 2004. Mechanical characterization of heterogeneous soils with surface waves: experimental validation on reduced-scale physical models. *Near Surface Geophysics*, Vol. 2, N°4, pp. 249-258.

Achaoui Y., Laude V., Benchabane S., Khelif A. 2013. Local resonances in phononic crystals and in random arrangements of pillars on a surface. *Journal of Applied Physics*, 114, 104503.

Achaoui Y., Ungureanu B., Enoch S., Brûlé S., Guenneau S. 2016. Seismic waves damping with arrays of inertial resonators. *Extreme Mechanics Letters*.

AFPS et CFMS, 2012. Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous action sismique. Guide technique, Presses des Ponts.

Aznavorian R, Puvirajesinghe T, Brûlé S, Enoch S, Guenneau S, 2016. Bio-inspired seismic metamaterials with transformed elastic crystals, *Journal of Physics: Condensed Matter*. Submitted.

Berraquero C.P., Maurel A., Petitjeans P., Pagneux V. 2013. Experimental realization of a water-wave metamaterial shifter. *Physical Review E* 88, 051002.

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.

Brûlé S., Javelaud E.H., Enoch S., Guenneau S. 2014. Experiments on Seismic Metamaterials: Molding Surface Waves. *Physical Review Letters*, 112, 133901.

Brûlé S., Enoch S., Guenneau S. 2015. Structured soils under seismic disturbance. Proceedings of the 9th Colloque National de l'AFPS, 30 novembre to 2 december 2015. Special session on Seismic Metamaterials. Marne La Vallée, France.

Brûlé S., Enoch S., Guenneau S. 2016. Les métamatériaux en géotechnique. *Revue Française de Géotechnique*. Soumis.

Brûlé S., Duquesnoy S. 2016a. Change of ground type by means of dynamic compaction: Consequences on the calculation of seismic loadings. *Innovative Infrastructure Solutions*. 1:39. DOI

10.1007/s41062-016-0037-4.

Brûlé S., Javelaud E., Enoch S., Guenneau S. 2016b. Flat lens for seismic waves. *Scientific Reports, Nature*, in progress. <https://arxiv.org/abs/1602.04492>.

Brûlé S., Javelaud E., Guenneau S., Enoch S., Komatitsch D. 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.H., Ohmachi T., Nakamura Y., Inoue S., 2010. H/V method used to qualify the modification of dynamic soil characteristics due to ground improvement work by means of heavy compaction process. A case study: the former Givors's glass factory area. 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 5th International Conference on Earthquake Engineering in Tokyo, Japan 02-026, 451-455.

Colombi A., Roux P., Guenneau S., Rupin M. 2015. Directional cloaking of flexural waves in a plate with a locally resonant metamaterial. *The Journal of The Acoustical Society of America* 137, 1783-1789.

De Buhai P. 1986. Approche fondamentale du calcul à la rupture des ouvrages en sols renforcés. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6.

Diatta A., Achaoui Y., Brûlé S., Enoch S., Guenneau S. 2016. Control of Rayleigh-like waves in thick plate Willis metamaterials. Submitted to AIP Advances. See also ArXiv:1609.08456.

Farhat M., Enoch S., Guenneau S., Movchan A.B. 2008. Broadband cylindrical acoustic cloak for linear surface waves in a fluid. *Physical Review Letters*, 101, 1345011.

Farhat M., Guenneau S., Enoch S. 2009. Ultrabroadband elastic cloaking in thin plates. *Physical Review Letters*, 103, 024301.

Guégin M. 2014. Approche par une méthode d'homogénéisation du comportement des ouvrages en sols renforcés par colonnes ou tranchées. Thèse de l'Université Paris Est.

Guenneau S., Enoch S., Brûlé S. 2015. Invisibilité en physique transformationnelle. Actes de la conférence AFPS'15, 30 novembre au 2 décembre 2015, Marne La Vallée, France.

Krodel S., Thome N., Daraio C. 2015. Wide band-gap seismic metastructures. *Extreme Mechanics Letters*, 4, 111-117.

Liu Z., Zhang X., Mao Y., Zhu Y., Yang Z., Chan C.T, Sheng P. 2000. Locally resonant sonic materials, *Science*, 289, 5485, pp. 1734-1736.

Piranda J. 2001. Analyse modale expérimentale - Systèmes à N degrés de liberté. *Techniques de l'Ingénieur*.

Ma G., Sheng P. 2016. Acoustic metamaterials: From local resonances to broad horizons. *Science Advances*, 26 Feb 2016: Vol. 2, no. 2, e1501595.

Nguyen V. 2014. Analyse sismique des ouvrages renforcés par inclusions rigides à l'aide d'une modélisation multiphasique, Thèse de l'Université Paris Est.

Nicolet A., Remacle J.F., Meys B, Genon A., Legros W. 1994. Transformation methods in computational electromagnetics. *Journal of Applied Physics*, 75, 10, 6036-8.

Nicolet A., Zolla F., Guenneau S. 2004. Modelling of twisted optical waveguides with edge elements. *The European Physical Journal Applied Physics*, 28, 153.

Pecker A., Teyssandier P. 2009. Conception parasismique du pont de Rion-Antirion. 19ème Congrès Français de Mécanique à Marseille, 24-28 août 2009.

Pendry J.B., Schurig D., Smith D.R. 2006. Controlling Electromagnetic Fields. *Science* 312 (5781): 1780-1782.

Sanchez-Palencia E. 1980. Non homogeneous media and vibration theory. (Lecture Notes in Physics 127) Springer, Berlin, 398 pages.

Semblat J.F., Pecker A. 2009. Waves and vibrations in soils: earthquakes, traffic, shocks, construction works. IUSS Press, Pavia.

Sheng P. 2014. Viewpoint: A Step towards a seismic cloak. *Physics* 7, 34.

Vasseur J.O., Deymier P.A., Frantzikonis G., Hong G., Djafari-Rouhani B., Dobrzynski L. 1998. Experimental evidence for the existence of absolute acoustic band gaps in two-dimensional periodic composite media. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 10, 6051 - 6064.