

# Vers les métamatériaux sismiques

## Towards seismic metamaterials

Brûlé S., Javelaud E.  
*Ménard*

Guenneau S., Enoch S.  
*Institut Fresnel*

**RÉSUMÉ :** Cet article présente le concept des métamatériaux en génie sismique ainsi que le dispositif d'une expérience en vraie grandeur réalisée avec une source de vibration de type vibrocompactage. La façon la plus simple pour interagir sur une onde sismique est de modifier les propriétés du milieu de propagation en agissant sur la densité du sol et donc sur la vitesse des ondes. Le concept est alors de réduire l'amplification des ondes sismiques à la surface libre ou l'effet de site lithologique décrit en ingénierie des ouvrages en zone sismique. Cependant, une autre façon d'interagir avec le signal sismique consisterait à modifier la distribution d'énergie grâce à un métamatériau constitué du sol initial et d'une grille de cylindres verticaux vides, forés dans le sol initial.

**ABSTRACT:** This paper presents the seismic metamaterial concept and the device of a preliminary large-scale seismic test held on a soil metamaterial using vibrocompaction probes. The most simplistic way to interact with seismic wave is to modify the global properties of the medium, acting on the soil density and then on the wave velocity. The main concept is then to reduce the amplification of seismic waves at the free surface, called « site effects » in earthquake engineering. However, we develop here an another way to counteract the seismic signal by modifying the distribution of the seismic energy thanks to a "metamaterial" made of a grid of vertical, cylindrical and empty "inclusions" bored in the initial soil.

**MOT-CLÉS:** métamatériau, test sismique, effet de site, camouflage.

**KEYWORDS:** metamaterial, seismic test, site effect, cloaking.

## 1 INTRODUCTION

Des études sont réalisées depuis plus d'une dizaine d'années en optique sur les métamatériaux, c'est à dire un agencement ordonné dans l'espace de matériaux en motifs périodiques ou non avec des propriétés physiques contrastées. Les résultats de ces travaux sont notamment l'obtention d'un nouvel indice optique pour ces métamatériaux avec, pour conséquence un guidage différent et recherché de l'onde électromagnétique les traversant (Farhat et al. 2012).

Depuis 2006, des chercheurs tentent d'appliquer les mêmes concepts, par changement d'échelle, aux ondes mécaniques, telles les ondes sonores ou les ondes sismiques.

L'objet de cet article est d'examiner l'interaction envisageable sur la propagation d'un signal sismique dans des géomatériaux que sont les sols dans lesquels ont été incorporés un réseau d'éléments aux propriétés mécaniques différentes de celles du matériau d'origine. Il peut s'agir de colonnes en béton, en argile ou tout simplement de cylindres forés non remplis.

Le principe d'une expérimentation en vraie grandeur est décrite. Il s'agit d'une lentille sismique de dimension décimétrique dans un sol argileux dans lequel des colonnes non remplies ont été réalisées selon un réseau périodique.

## 2 LES MÉTAMATÉRIAUX

En physique des ondes électromagnétiques, les milieux à indice de réfraction négatif ont été théorisés par Victor Veselago (Veselago 1968). La réfraction négative a pour représentation physique le fait que la vitesse de phase de l'onde est opposée à la vitesse de groupe. Ces milieux nécessitent une perméabilité et une permittivité négatives simultanées. Cette double condition fut difficile à obtenir. En 2000, John Pendry propose un prototype avec des structures métalliques ou résonateurs, formés d'anneaux concentriques coupés et de fils métalliques continus parallèles. Il montre que le réseau périodique de résonateurs présentait une perméabilité négative autour d'une fréquence de résonance et que l'arrangement de fils métalliques pouvait aussi

présenter une permittivité négative en basse fréquence (Pendry, 2000). Allant plus loin, Pendry a évoqué la possibilité de réaliser des lentilles dont la résolution ne serait plus limitée par les lois classiques de l'optique. En 2006, Pendry et Leonhardt proposent, sur la base de technique d'optique transformationnelle, la réalisation d'une cape d'invisibilité utilisant des métamatériaux, à savoir un agencement ordonné de matériaux ordinaires, de taille très inférieure à celle de la longueur d'onde, créant une anisotropie artificielle guidant les ondes selon des trajectoires courbes, par exemple autour d'une zone à protéger.

Plusieurs équipes ont démontré depuis que ces prédictions théoriques étaient réalisables avec des prototypes de super-lentille et de cape d'invisibilité dans le domaine des micro-ondes, soit pour des longueurs d'onde de 0,5 à 300 mm. Des tentatives de réalisation de ces méta-matériaux dans le domaine infra-rouge et dans le domaine du visible ont été également proposées avec la rencontre du problème de la dimension des éléments constitutifs d'un tel matériau. Par exemple, pour une longueur d'onde dans le domaine visible, retenons 500 nm, la largeur des motifs métalliques est de l'ordre de la dizaine de nanomètres.

Dans l'attente d'avancées dans l'industrialisation de ces micro-éléments, les chercheurs de l'Institut Fresnel ont examiné avec succès en 2008 les capes d'invisibilité pour des longueurs d'onde plus importantes, d'ordre métrique, comme les vaguelettes produites dans une cuve à ondes. Une autre avancée de l'Institut Fresnel est la réalisation d'une cape d'invisibilité pour les vibrations dans une plaque en polymère perforée (Farhat et al. 2012). Citons également les études théoriques récentes sur l'invisibilité pour les modèles de type diffusion, tel que celui de la chaleur. Les applications potentielles résident dans une protection thermique des composants en micro-électronique par exemple.

Les résultats encourageants obtenus sur des modèles numériques et des modèles physiques pour les ondes acoustiques avec des hypothèses d'élasticité parfaite, laisse envisager des applications dans le domaine des ondes sismiques

pour le génie parasismique. Ces ondes peuvent avoir une origine naturelle, générée par des tremblements de terre de toute magnitude ou bien une origine anthropique comme les activités humaines générant des vibrations en surface. Ainsi, il est possible d'imaginer des dispositifs comparables en géométrie à ceux décrits ci-dessus mais à une échelle hectométrique.

### 3 LES DISPOSITIFS ISOLANTS

Dans le domaine du bâtiment et du génie civil, les vibrations autres que celles occasionnées par un tremblement de terre, et contre lesquelles le constructeur cherche à se prémunir sont, par exemple : les vibrations liées aux charges ferroviaires et routières, les machines vibrantes sur dallage industriel, les techniques de battage (pieux, palplanches, etc.), les méthodes de compactage (rouleau vibrant, compactage dynamique, etc.), les tirs de mine, etc.

Ces vibrations peuvent avoir un effet sur la structure même de l'ouvrage ou sur les sols supports de fondation, par réarrangement granulaire des particules du sol suivi d'un tassement. Des ouvrages dans le sol sont décrits par Semblat et al. 2009 tels que des tranchées parallélépipédiques ou en forme de demi-cylindre ainsi que des barrières d'éléments verticaux disjoints dans une ou deux directions, cylindriques (pieux) ou de sections rectangulaires (barrettes) ont été étudiés par des approches numériques 2D ou 3D (méthode des éléments spectraux, éléments frontières) ou avec de rares mesures in situ (Woods 1968).

L'objectif de ces ouvrages n'est pas de s'opposer à des ondes de surface mais d'essayer d'en limiter l'amplitude en modifiant les propriétés du milieu de propagation. Plusieurs auteurs ont étudié les possibilités de réaliser des tranchées anti-vibratiles de quelques mètres de profondeur, vides si le terrain se tient ou remplies de matériaux comme l'argile. Citons par exemple les travaux expérimentaux de Woods en 1968, de Richart et al. en 1970.

Semblat et al. citent les études numériques 2D réalisées par Segol et al. (1978), les études 3D de Banerjee et al. (1988) avec la méthode aux éléments frontières. Citons également Komatitsch et al. (1999) avec la méthode aux éléments spectraux.

Pour les inclusions verticales dans le sol, Semblat et al. (2009) cite les travaux de Aviles et Sanchez-Sesma (1983), de Liao et Sangrey (1978). Semblat et Pecker (2009) ont examiné une barrière constituée d'une seule rangée de huit trous cylindriques avec la méthode numérique aux éléments frontières.

En raison de la géométrie de ces ouvrages (diamètre et espacement des trous) et des longueurs d'onde attendues des ondes de surface, une réduction d'amplitude est envisageable pour des fréquences de quelques dizaines de Hertz. Ces ouvrages sont conçus pour des vibrations d'origine anthropiques, identifiées et prévisibles car leur efficacité dépend de leur dimension (profondeur, longueur), de la géométrie du site (position de la source et du récepteur), de la fréquence de la source et de la constitution de l'écran lui-même. Correctement dimensionnés, ces ouvrages peuvent permettre d'appliquer un coefficient réducteur de l'ordre de 0.2 à 0.7 sur l'amplitude de la vibration, au droit de la zone à préserver.

L'objectif des travaux préliminaires présentés dans cet article s'inscrivent quant à eux dans un objectif de lentille répondant à de plus larges contenus fréquentiels et dans la mise en évidence de phénomènes décrits par l'optique, tels que la réflexion, l'endoscopie, la diffraction, etc.

### 4 LES SOURCES SISMIQUES

Nous distinguons les signaux sismiques d'origine anthropiques comme ceux générés lors des travaux d'amélioration de sol par compactage dynamique ou vibrocompactage (figures 1a et 1b) et les signaux d'origine tellurique du type séisme par jeu de

faille. Le compactage dynamique consiste à faire chuter en surface une masse de 10 à 35 t depuis une hauteur de 10 à 30 m tandis que le vibrocompactage repose sur la vibration d'une sonde dans le sol jusqu'à la profondeur souhaitée, celle-ci pouvant atteindre 50 à 70 m (Brûlé et al. 2012a).

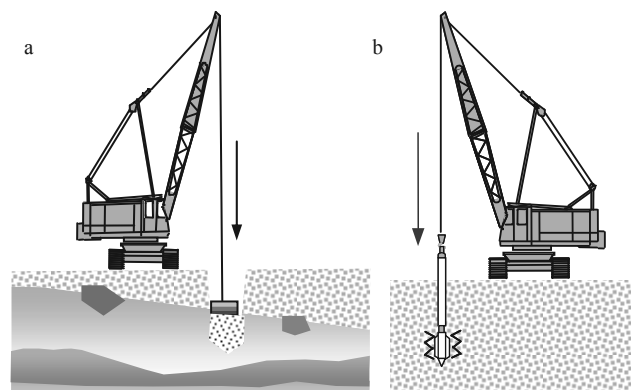


Figure 1. Principe du compactage dynamique (a) et du vibrocompactage (b).

Les caractéristiques de ces sources sont rappelées dans le tableau 1. Le signal sismique d'origine tellurique présente des caractéristiques très variables en amplitude, en contenu fréquentiel ainsi qu'en durée. Avec les accéléromètres installés à la surface du sol terrestre, la durée des signaux est de quelques secondes à quelques minutes, les fréquences sont comprises entre quelques hertz à dizaine de hertz et les accélérations représentent, sur la surface libre terrestre, quelques dixièmes de g jusqu'à 1 à 2 g (voir tableau 1).

Tableau 1. Caractéristiques des signaux sismiques (Semblat et al, 2009 ; Brûlé et al, 2012b).

		Séisme	Sources anthropiques	
			Compactage dynamique	Vibrocompactage
Caractéristiques du signal				
Fréquence	Hz	0.1 à 50	Quelques Hertz	20 à 60
Accélération	m.s <sup>-2</sup>	0.1 à 20		
Vitesses particulaires	mm.s <sup>-1</sup>		Quelques dizaines de mm.s <sup>-1</sup>	Quelques dizaines de mm.s <sup>-1</sup>
Longueur d'onde	m	Quelques dizaines à centaines de mètres	Quelques mètres à dizaines de mètres	Quelques mètres à dizaines de mètres

### 5 DOMAINE DE VALIDITÉ

Dans le domaine du génie parasismique, les périodes significatives s'étendent de 0.02 à 10 s, soit des fréquences comprises entre 0.1 et 50 Hz (Betbeder-Matibier 2003). Les longueurs d'onde correspondantes sont de quelques centaines de mètre dans la terre profonde avec des vitesses de propagations de quelques milliers de mètres par seconde. En revanche, dans les sols superficiels d'épaisseur comprise entre quelques dizaines et quelques centaines de mètres, les vitesses des ondes de cisaillement sont inférieures à 800 m.s<sup>-1</sup>, ce qui peut correspondre à des longueurs d'ondes de quelques dizaines de mètres pour les sols les plus faibles. Pour ces longueurs d'onde, des phénomènes de résonance avec un bâtiment sont possibles.

Les dispositifs à base de métamatériaux de sols peuvent prétendre interagir avec des ondes à composantes horizontales de type ondes de cisaillement et ondes de surface comme les

ondes de Rayleigh se propageant dans la gamme de vitesse allant jusqu'à quelques centaines de mètres par seconde.

## 6 LES SOLS

A la différence des études réalisées jusque là sur les métamatériaux aux propriétés physiques et mécaniques connues, les sols répondent imparfaitement aux propriétés élastiques. En plus de ce comportement viscoélastique, les sols offrent une très grande variabilité en volume. Les tests en vraie grandeur ont d'abord été privilégiés pour apprécier des paramètres tels que la vitesse des ondes de surface dans les tranches les plus superficielles du sol ainsi que l'amortissement en vue de modélisations numériques. Au droit de l'expérimentation, la valeur de résistance de pointe  $q_c$  au pénétromètre statique ne dépasse pas 2 MPa sur plus de 20 m de profondeur.

## 7 PRINCIPE DE L'EXPERIMENTATION

La zone test a été identifiée en région grenobloise pour l'homogénéité des sols argileux de couverture et pour la profondeur du substratum sismique dont le toit est localisé au delà de 200 m de profondeur. Le dispositif envisagé (figure 2) consiste en un maillage régulier de trois lignes de forages de 320 mm de diamètre, non remplis, de 5 m de profondeur. L'entraxe des colonnes est de 1.73 m. La fréquence de la source est de 50 Hz avec 14 mm de déplacement latéral dans le plan (x,y). Les capteurs utilisés sont des vélocimètres trois composantes (z, y, z) avec une fréquence d'échantillonnage de 1 kHz. En raison de la forte atténuation attendue, la source est située à 1.5 m de la grille en distance horizontale avec des mesures effectuées à 1 et 2 m de profondeur. Les vitesses des ondes des ondes de surface sont de l'ordre de 78 m/s. La longueur d'onde du signal à la source est de 1.56 m.

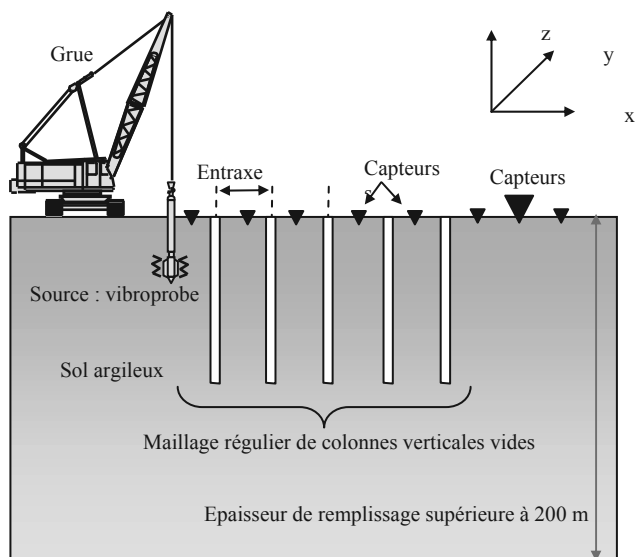


Figure 2. Principe de la lentille sismique et du dispositif d'acquisition du signal (Brûlé et al. 2012c, Brûlé et al. 2012d).

## 8 RESULTATS ET PERSPECTIVES

Pour les sols en place, l'atténuation est importante. A dix mètres de la source, nous avons vérifié que la rapport signal sur bruit demeurerait supérieur à deux pour tous les capteurs concernés. Les résultats obtenus montrent, entre la deuxième et la troisième rangée de forages, un très fort abattement d'énergie (Brûlé et al, 2012d). Les résultats sont présentés sous forme de rapport (terrain avec forages / terrain sans forages) en énergie obtenue à partir de l'enregistrement des vitesses particulières.

L'apport de cette expérimentation est de mettre en avant la possibilité de réaliser des « barrières » anti-vibratiles pour les travaux du génie civil générant des signaux autour de 50 Hz, avec un métamatériau de sol. Les perspectives sont notamment les réalisations de dispositifs pour des gammes de fréquence plus basses, inférieures à 50 Hz, se rapprochant ainsi des gammes de fréquence des ondes sismiques de surface générées dans les remplissages sédimentaires lors de l'occurrence d'effets de site.

## 9 REFERENCES

- Betbeder-Matibet J. 2003. Génie Parasismique. Phénomènes sismiques. Vol 1 de 3. Hermes – Lavoisier. 318 p.
- Brûlé S., Javelaud E. 2012a. Soil dynamic response after ground improvement by heavy dynamic compaction or vibrocompaction, *ISSMGE – TC211. International Symposium on Ground Improvement IS-GI*, 30 march – 2 june 2012, Brussels, Belgium. Vol.II, 3-9.
- Brûlé S., Javelaud E., Marchand M. 2012b. Auscultation d'une cheminée de grande hauteur située à proximité d'un chantier de compactage dynamique haute énergie, *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2012*, 4-6 juillet 2012, Bordeaux, France, Tome II, 919-926.
- Brûlé S., Javelaud E., Guenneau S., Enoch S., Komatitsch D. 2012c. Seismic metamaterials, *9th International Conference of the Association for Electrical, Transport and Optical Properties of Inhomogeneous Media ETOPIM*, 2012, Marseille, France.
- Brûlé S., Javelaud E., Guenneau S., Enoch S. Seismic metamaterial: how to shake friends and influence waves ? 2012d. Soumis en janvier 2012.
- Farhat M., Guenneau S., Enoch S. 2012. Broadband cloaking of bending waves via homogenization of multiply perforated radially symmetric and isotropic thin elastic plates, *Phys. Rev. B* 85, 020301(R).
- Komatitsch D., Vilotte J.P., Vai R., Castillo-Covarrubias J.M., Sanchez-Sesma F.J. 1999. The spectral element method for elastic wave equation – Application to 2-D and 3-D seismic problem. *Int. J. Numer. Meth. Engng.* 45, 1139-1164.
- Pendry J.B. 2000. Negative refraction makes a lens, *Phys. Rev.* 85, 3966-3969.
- Stenger N., Wilhelm M., Wegener M. 2012. Experiments on elastic cloaking in thin plates, *Phys. Rev. Lett.* 108, 014301.
- Semblat J.F. and Pecker A. 2009. *Waves and vibrations in soils : earthquakes, traffic, shocks, construction works*, 499 p.
- Veselago V.G. 1968. The electromagnetics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $m$ . *Soviet Physics Uspekhi*, 10 (4), 509-514.
- Woods R.D. 1968. Screening of surface waves in soils. The University of Michigan Industry Program of the College of Engineering. IP-804.