

Association régie par la loi



Métamatériaux sismiques ou l'invisibilité réinventée: Perspectives de barrières anti-vibratiles innovantes

Sébastien Guenneau¹, Stefan Enoch¹ et Stéphane Brûlé²

¹Institut Fresnel, CNRS, Centrale Marseille, Aix-Marseille Université, Marseille.

²Dynamic Soil Laboratory, Ménard, Nozay.











Une brève histoire de la physique transformationnelle

L'invisibilité pour les vagues

Métamatériaux platoniques

Métamatériaux sismiques

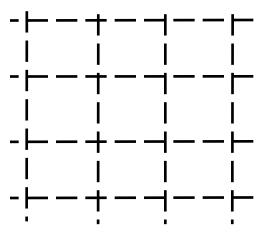
Une brève histoire de la physique transformationnelle



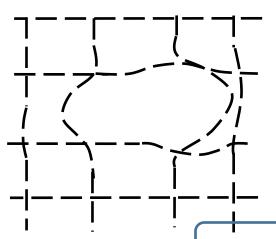
Le principe de la physique transformationnelle

Un simple changement de variables...

Espace de départ:



Espace transformé:



On considère une équation avec un coefficient scalaire m (milieu homogène isotrope)

$$L[m(x, y, z, t); u] = S(x, y, z, t)$$
 (1)

On effectue un changement
$$y' = q(x,y,z,t)$$
 $z' = r(x,y,z,t)$
 $z' = r(x,y,z,t)$

On obtient une équation dite transformée (Nicolet et al., 1994; Ward & Pendry, 1996) avec un coefficient matriciel M (milieu hétérogène anisotrope)

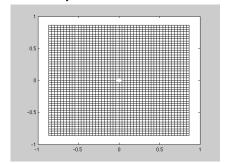
$$L[M(x', y', z', t); u] = S(x', y', z', t)$$
 (2)

... peut avoir des conséquences majeures!

L'invisibilité: un paradigme de la physique transformationnelle (Pendry, Schurig and Smith, Science 2006)

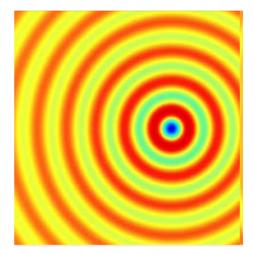
Considérons la transformation de coordonnées cylindriques qui applique un disque $r < R_2$ sur une couronne $R_1 < r' < R_2$:

$$r' = \frac{R_2 - R_1}{R_2}r + R_1, \vartheta' = \vartheta, z' = z$$

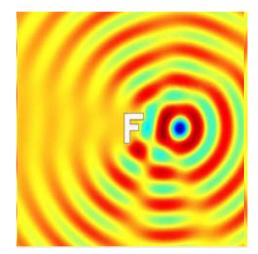


Le coefficient matriciel de l'équation (2) caractérise le milieu hétérogène anisotrope

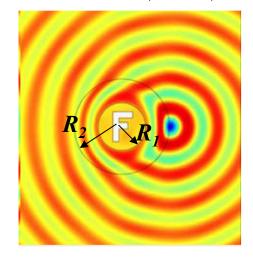
dans la couronne (appelée cape d'invisibilité): $M_{r'r'} = \frac{r'-R_1}{r'}, M_{\theta'\theta'} = \frac{r'}{r'-R_1}, M_{zz} = \left(\frac{R_2}{R_2-R_1}\right)^2 \frac{r'-R_1}{r'}$



Point source dans l'espace libre



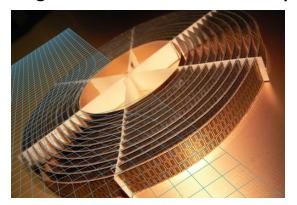
Point source placé proche d'un objet



Point source placé proche d'un objet 'capé'

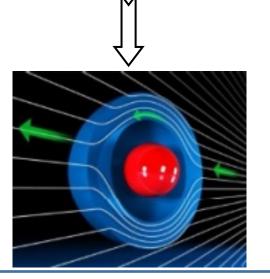
En pratique le milieu transformé est un métamatériau!

- >En électromagnétisme, la cape d'invisibilité requiert un indice de réfraction qui est une matrice produit de la permittivité ε et de la perméabilité μ
 >En hydrodynamique, l'invisibilité requiert une matrice de viscosité effective
- Cape micro-ondes@ 8.5 GHz (magnétisme artificiel avec μ)

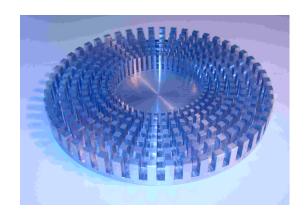


Duke University, Imperial College 2006

Anisotropie artificielle pour quider les ondes



Cape à vagues (5-15Hz) (fluide effectif anisotrope)



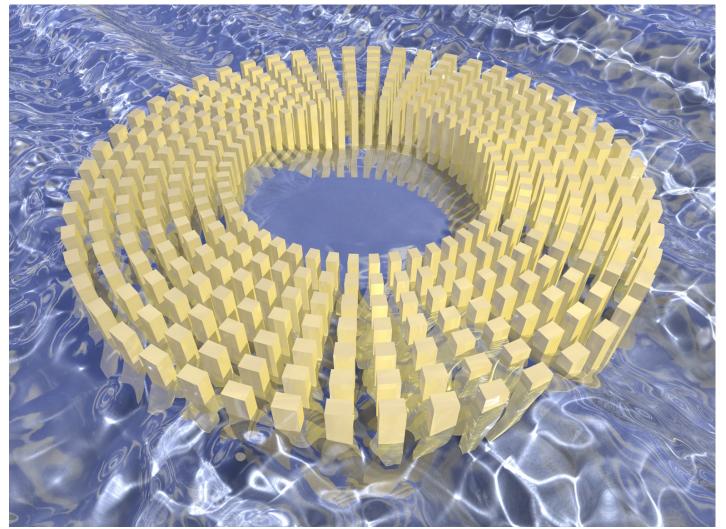
Institut Fresnel (IF), Liverpool University 2008

Mais l'invisibilité n'est pas qu'un jeu d'ondes et de lumière, derrière cet effet mirage il y a des enjeux de société...

L'invisibilité pour les vagues



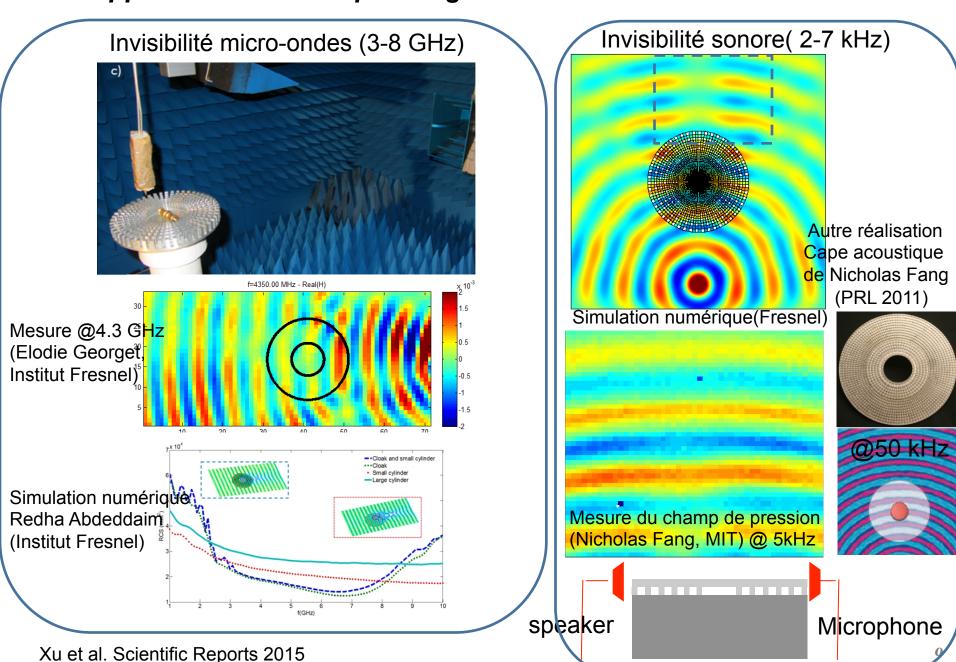
L'invisibilité appliquée à la protection contre les vagues



Infographie de la cape à vagues de IF par le groupe de Wegener (KIT)

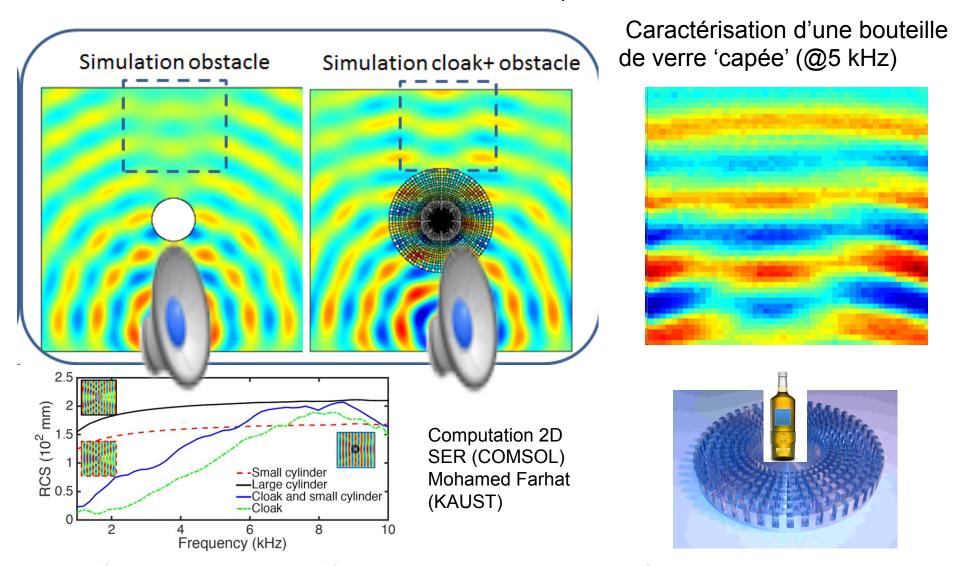
Un brevet a été déposé en 2015 pour la protection contre les vagues océaniques avec une cape d'invisibilité et une maturation de la SATTSE est en cours avec l'Institut Fresnel et l'Institut de Recherche des Phénomènes Hors Equilibre IRPHE (avec un chercheur CDD: Guillaume Dupont).

Autres applications de la cape à vagues: invisibilité micro-ondes et sonore



Vous allez voir ce que vous allez entendre... The sound of silence @5kHz (mesures expérimentales du MIT)

Xu et al. Scientific Reports 2015



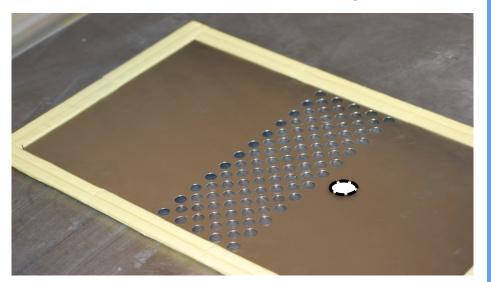
Conclusion: La même cape fonctionne pour les micro-ondes (3-8 GHz), les ondes sonores (2-7KHz) et les vagues (5-15 Hz).

Métamatériaux platoniques

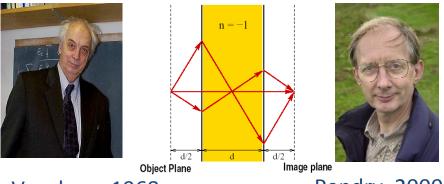


Contrôle des ondes de plaques: lentille plate et cape

mage d'une source acoustique par un réseau de trous dans une plaque (Langevin, Paris)

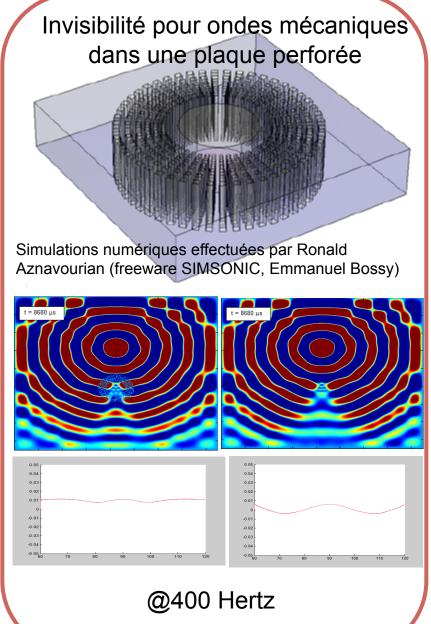


lentille plate convergente haute résolution

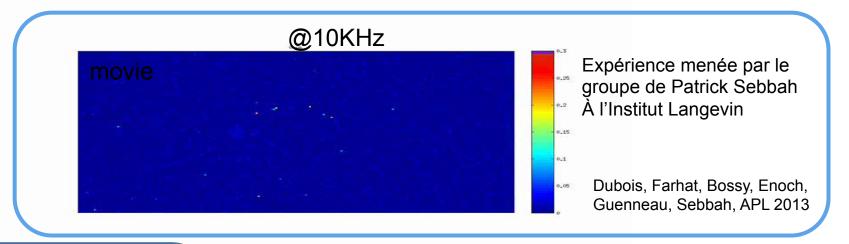


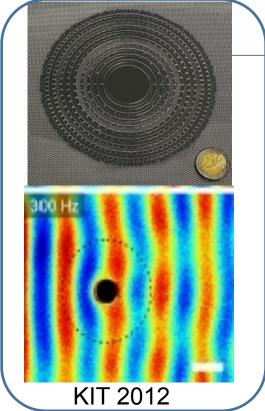
Veselago, 1968

Pendry, 2000

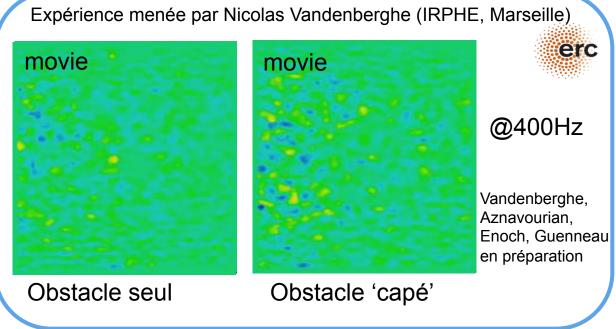


Résultats expérimentaux pour lentille et cape platoniques



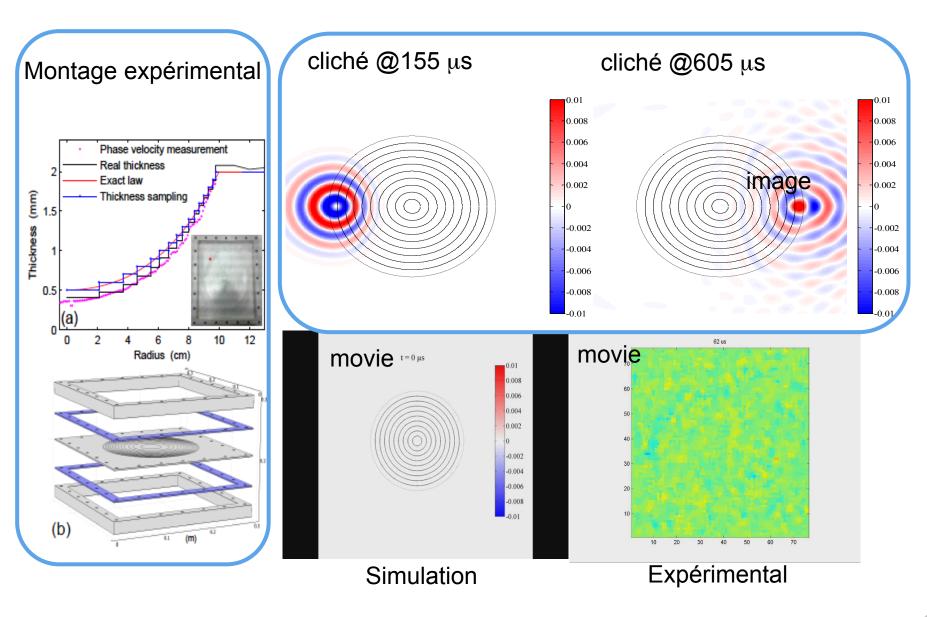


La première cape platonique a été fabriquée et testée par le groupe de Martin Wegener à Karslruhe (PRL 2012) d'après le design de Farhat et al.(PRL 2009).

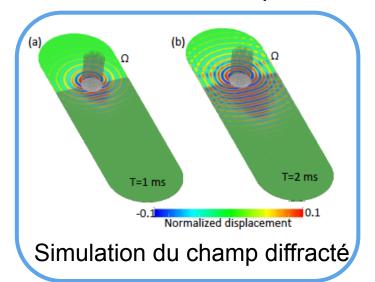


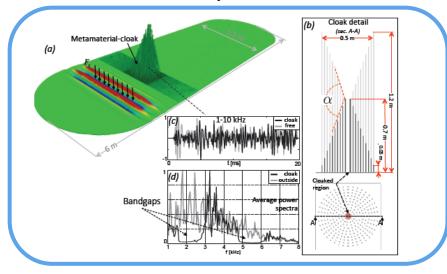
Lentille de Maxwell pour les ondes de plaque

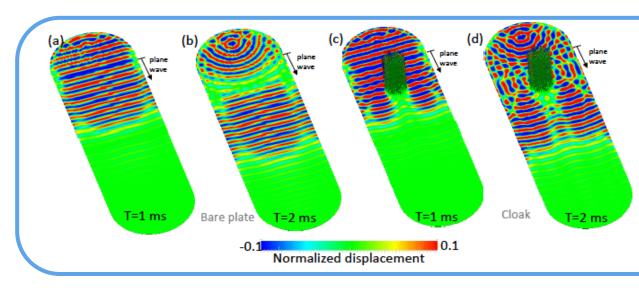
(Lefebvre, Dubois, beauvais, Achaoui et al. APL 2015)



Cape d'invisibilité platonique avec une forêt de tiges (Colombi, Roux et al. JASA 2015)





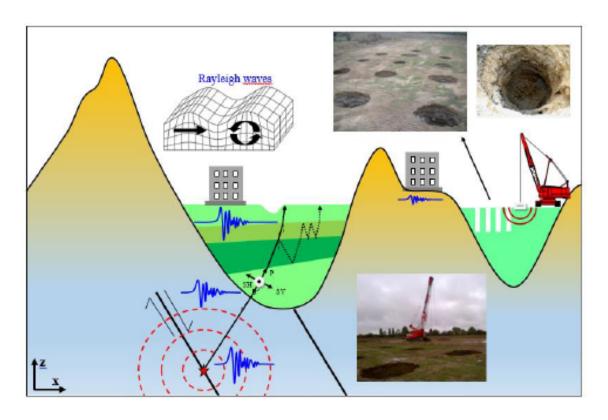


Simulations pour le champ total à différents pas de temps: noter la reconstruction du front d'onde derrière la cape à T=2ms.

Métamatériaux sismiques



Pertinence des métamatériaux sismiques pour les effets de site en bassin sédimentaire



Infographie de Stéphane Brûlé (laboratoire de dynamique des sols, entreprise Ménard)

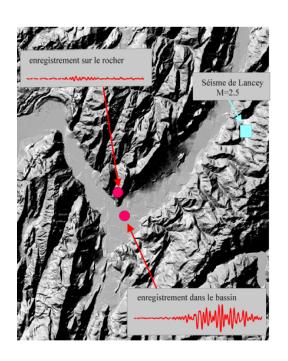


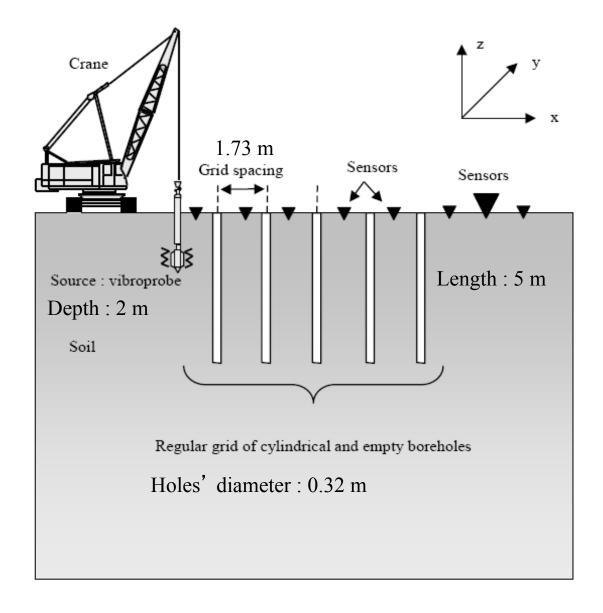




1^{er} test de métamatériau sismique (Ménard, Grenoble, août 2012)















Photographies du terrain d'expérimentation grenoblois













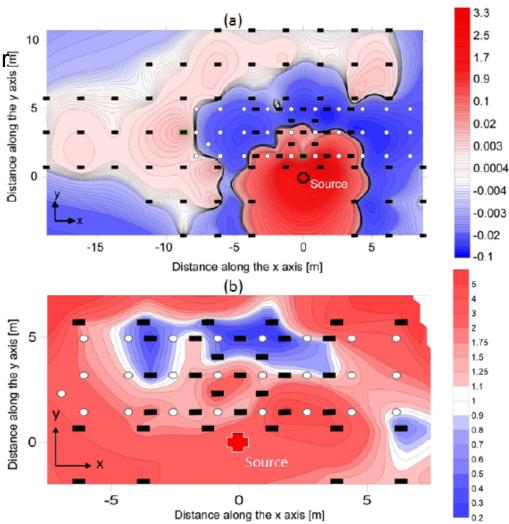


Cartes de champ d'énergie (équipe de Stéphane Brûlé, Ménard) pour un écran sismique

Carte d'NRJ (J2-J1) obtenue à partire du champ de vitesses où J2 est la distribution d'NRJ en présence de trous et J1 celle sans les trous.

Carte d'NRJ (J2/J1) où J2 est la distribution d'NRJ en présence de trous et J1 celle sans les trous.

0.2<J₂/J₁<1 dans les régions en bleu c'est à dire qu'il y a jusqu'à 5 fois moins d'NRJ



Rectangles noirs: vélocimètres

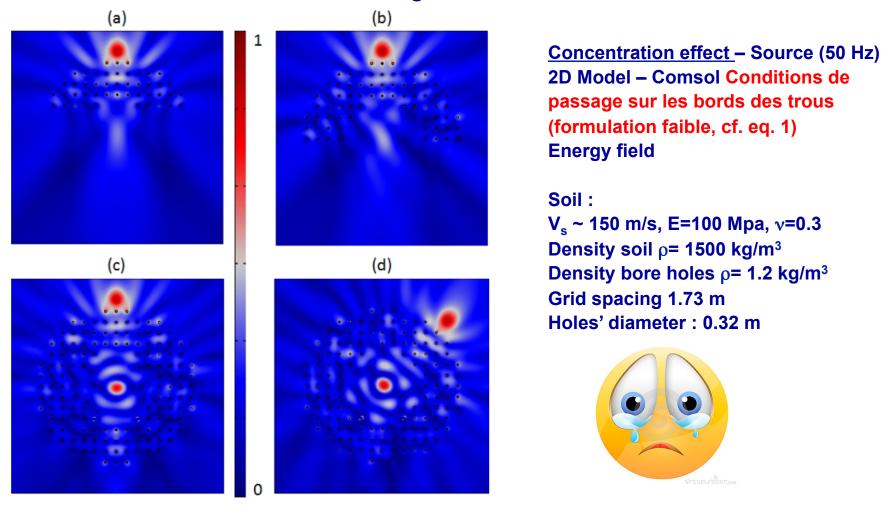
Disques blancs: trous







Simulations numériques pour une cape sismique: l'écran sismique conformé sur une couronne agit comme un concentrateur!



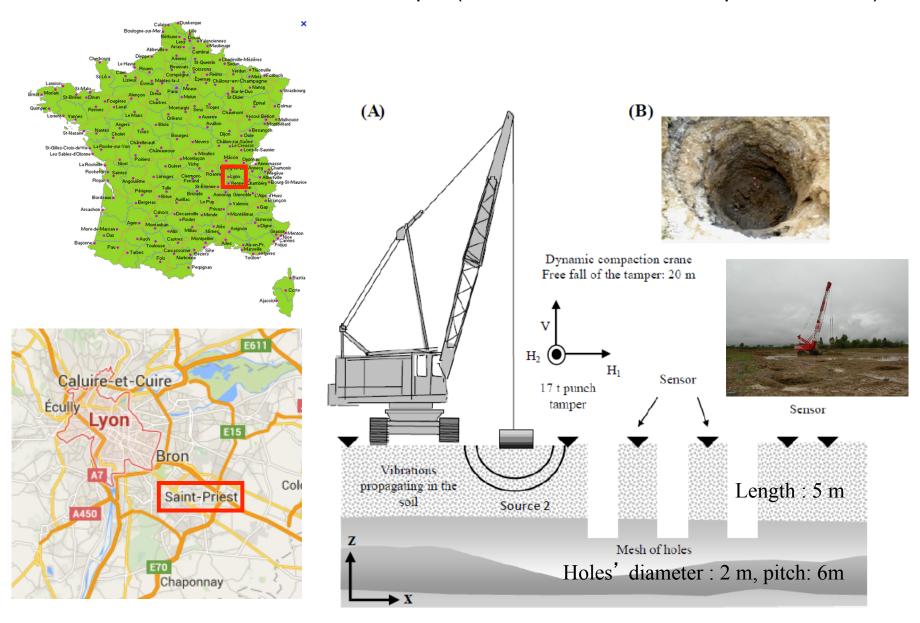
→ Much ado about nothing (Beaucoup de bruit pour rien)!







2ème test de métamatériau sismique (Ménard, Saint-Priest, Septembre 2012)



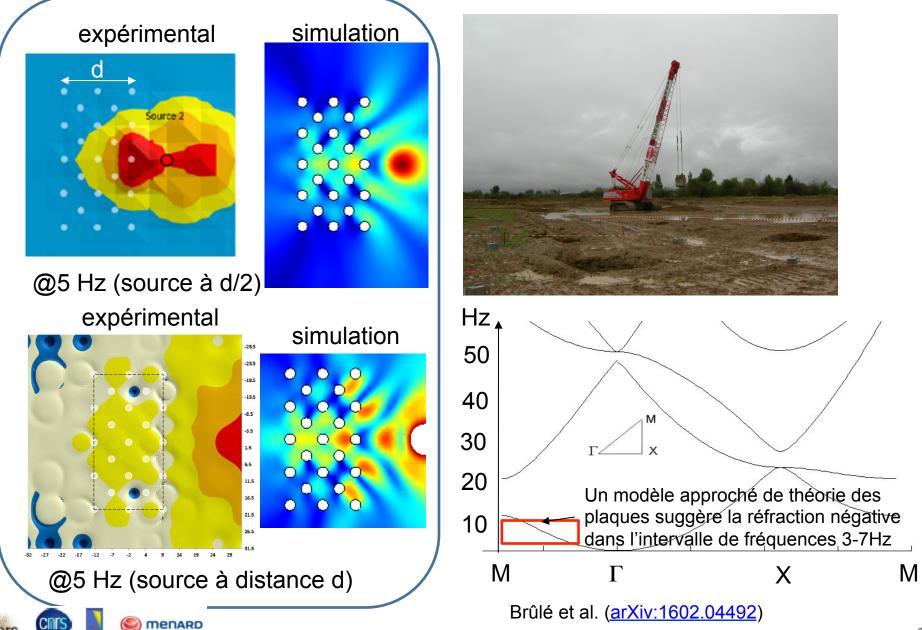








La lentille plate sismique (Saint Priest, September 2012)



23

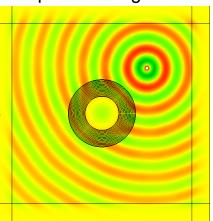
Quel futur pour les métamatériaux sismiques (1)?

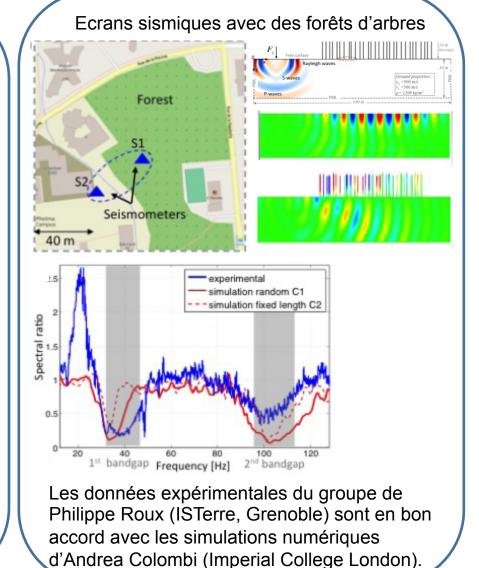
Chapes sismiques avec des colonnes de béton



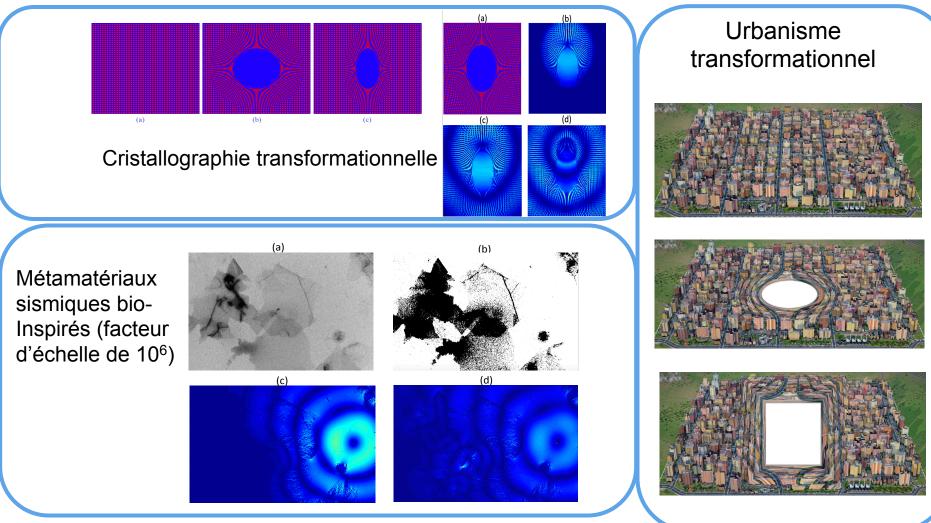
Travail de recherche en cours avec l'équipe de Stéphane Brûlé de l'entreprise Ménard, le groupe de Philippe Roux à ISTerre (Grenoble) et le groupe de Richard Craster à Imperial College London.

Objectif:
Chape sismique:
~100m de diamètre
pour l'intervalle:
1-15 Hz





Quel futur pour les métamatériaux sismiques (2)?



Aznavourian, Puvirajesinghe, Brûlé, Enoch et Guenneau, J. Phys. Cond. Matter (soumis)