

Conception de dispositif de réduction des sollicitations sismique sur les bâtiments

R. AWADA¹, M. CHARIF¹, M.A. HAMADI¹, V. KALT², N. NOUAIME³, M. ZIGGAF⁴

¹LMPA - Université du Littoral Côte d'Opale

²LMRS - Université de Rouen Normandie

³CEA & LJLL - Sorbonne Université

⁴LAGA - Université Sorbonne Paris Nord

Semaine Maths-Entreprises 2022 - Institut Polytechnique de Paris. 14-18 février 2022



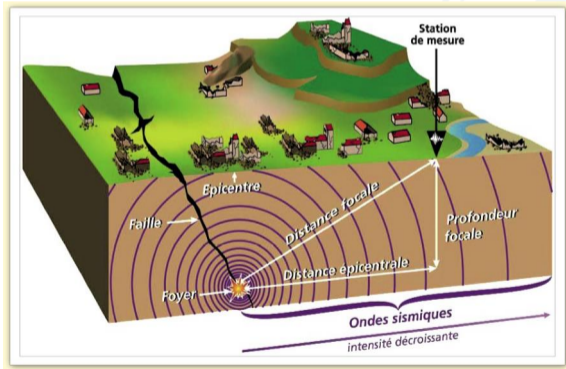
Contents

- 1 Motivations
- 2 Les techniques d'isolation sismique
- 3 Modèle mathématique
- 4 Resultats
- 5 Conclusion & perspectives
- 6 Bibliographie



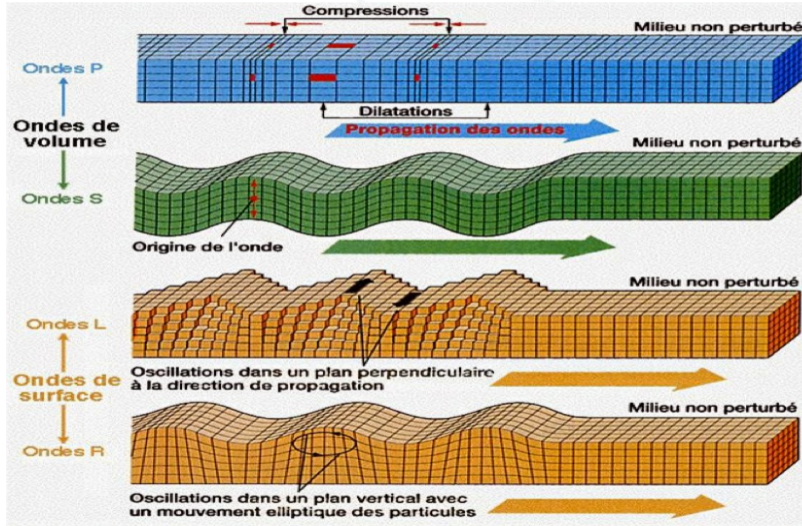
Contexte & motivations

Les séismes sont l'une des forces les plus destructrices de la Terre : les ondes sismiques qui traversent le sol peuvent détruire des bâtiments, faire des victimes et entraîner des coûts énormes. Notre but est de trouver des solutions pour protéger les bâtiments et surtout les centrales nucléaires contre les séismes.



- Présenter les différents types d'ondes sismiques.
- Citer les outils de protection contre les séismes.
- Modéliser mathématiquement et numériquement la propagation des ondes sismiques.

Contexte & motivations



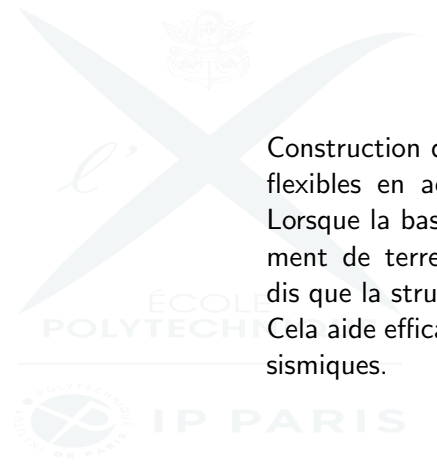
Primaires
(grondement)
 $v \approx 6 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$

Secondaires
(solides)
 $v \approx 4 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$

Love (1911)
(ébranlement)
 $v \approx 4 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$

Rayleigh (1885)
(vagues)

Fondations flexible



Construction de bâtiment sur des barrières flexibles en acier, caoutchouc ou plomb. Lorsque la base bouge pendant le tremblement de terre, les isolateurs vibrent tandis que la structure elle-même reste stable. Cela aide efficacement à absorber les ondes sismiques.

L'amortissement

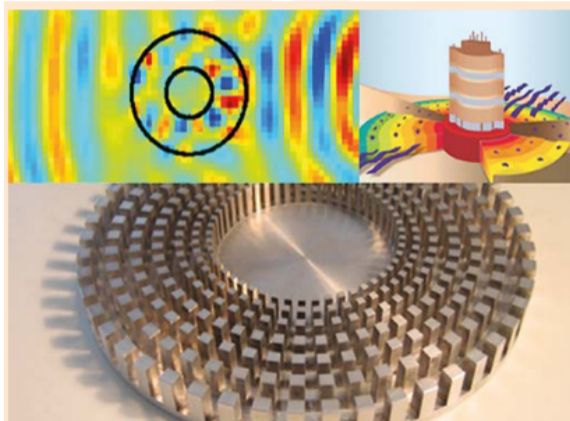
Placer des amortisseurs à chaque niveau d'un bâtiment. Chaque amortisseur est constitué de têtes de piston à l'intérieur d'un cylindre rempli d'huile de silicone. Lorsqu'un tremblement de terre se produit, le bâtiment transfère l'énergie des vibrations dans les pistons.

Déviation de l'énergie sismique

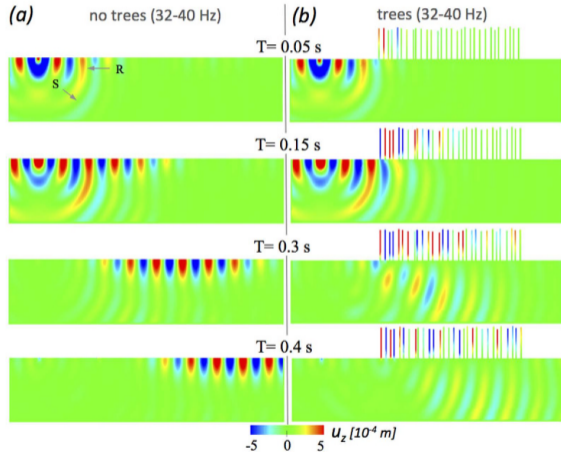
Créer une cape composée d'anneaux concentriques en plastique et en béton. Lorsque les ondes sismiques pénètrent dans les anneaux, elles sont forcées de se déplacer vers les anneaux extérieurs. En conséquence, elles sont canalisées loin du bâtiment et dissipées dans les plaques du sol.

Métamatériaux

Ce sont des matériaux artificiels qui peuvent courber et dévier les ondes (lumineuses ou acoustiques). Ces matériaux comportent des éléments de petite taille répétés et séparés par une distance périodique souvent inférieure à la longueur d'onde formant un réseau.



Métamatériaux



Les arbres dans une forêt forment un métamatériau résonant permettant d'atténuer les ondes de Rayleigh.

[2] Colombi, A., Roux, P., Guenneau, S., Gueguen, P., & Craster, R. V. (2016). Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances. *Scientific reports*, 6(1), 1-7.

Modèle Mathématique

La propagation des ondes de volume S (cisaillement) est modélisée par l'équation d'Helmholtz acoustique:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{u} = S, \\ \text{Conditions aux limites PML.} \end{array} \right. \quad (1)$$

Avec :

- u : champ de déplacement,
- c : vitesse du son dans le milieu,
- ω : pulsation.

• S : terme source

On a $c = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$ avec:

- ρ : densité du milieu,
- B : module d'élasticité isostatique,

[3] Migeot, J.-L. and Coyette, J.-P. & Lielens, G. (2016). Acoustics: essential concepts, theory and models of linear acoustics for engineers.

[4] Michler, C., Demkowicz, L., Kurtz, J., & Pardo, D. (2007). Improving the performance of perfectly matched layers by means of hp-adaptivity. Numerical

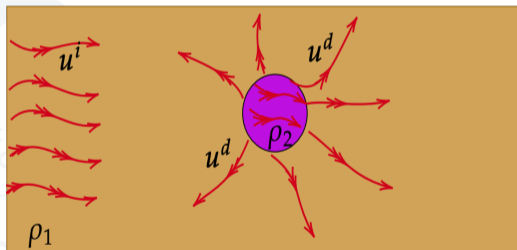
Modèle Mathématique

La centrale nucléaire est représentée en variant la vitesse du son \mathbf{c} : elle vaut $c_0 = c_{sol}$ dans le milieu ambiant et $c_1 = c_{beton}$ dans le bâtiment. On sépare le champ total u en champ incident u^i et champ diffracté u^d qui obéissent aux équations suivantes:

$$\begin{cases} \mathbf{u} = \mathbf{u}^d + \mathbf{u}^i, \\ \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{\omega^2}{\mathbf{c}^2} \mathbf{u} = 0, \\ \nabla^2 \mathbf{u}^i + \frac{\omega^2}{c_0^2} \mathbf{u}^i = 0. \end{cases} \quad (2)$$

L'équation pour le champ diffracté est:

$$\nabla^2 \mathbf{u}^d + \frac{\omega^2}{\mathbf{c}^2} \mathbf{u}^d = \left(\frac{1}{c_0^2} - \frac{1}{\mathbf{c}^2} \right) \omega^2 \mathbf{u}^i \quad (3)$$

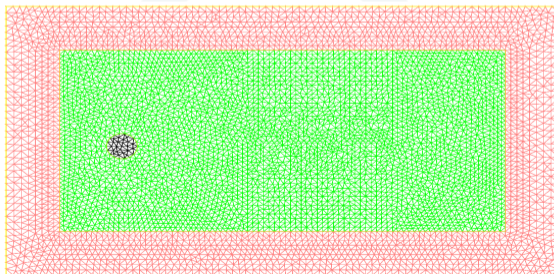


Formulation éléments finis

L'équation (4) est résolue numériquement par la méthode des éléments finis. La formulation variationnelle associée est:

$$-\int_{\Omega} \nabla \mathbf{u}^d \nabla \mathbf{v} \, d\mu(x) + \int_{\Omega} \frac{\omega^2}{\mathbf{c}^2} \mathbf{u}^d \mathbf{v} \, d\mu(x) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mathbf{c}_0^2} - \frac{1}{\mathbf{c}^2} \right) \omega^2 \mathbf{u}^i \mathbf{v} \, d\mu(x), \quad (4)$$

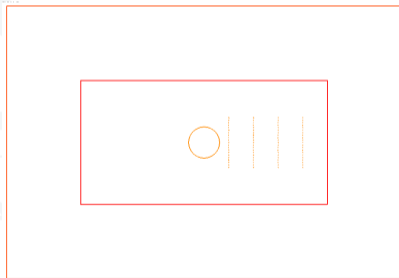
$$\forall \mathbf{v} \in \mathbf{U}_h := \{v \in H^1(\Omega) \mid v|_{K_i} \circ F_i \in P_r\}.$$



Types de structure

Nous avons effectués différentes simulations. Reproduire la forêt présentée dans la littérature n'a pas été possible en raison d'un manque de temps: les différences d'échelles entre le bâtiment (50m de diamètre) et les arbres (1m de diamètre) imposent un maillage très fin et des temps de calcul importants. Les structures étudiées étaient donc constituées de zones en béton plus grandes agencées :

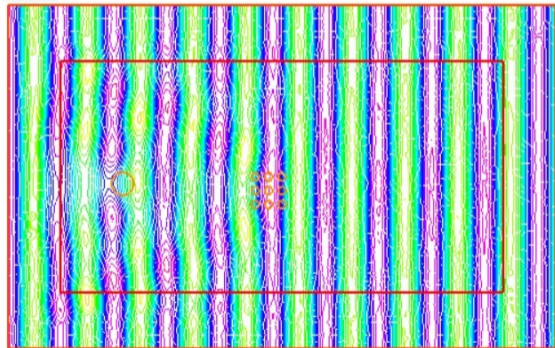
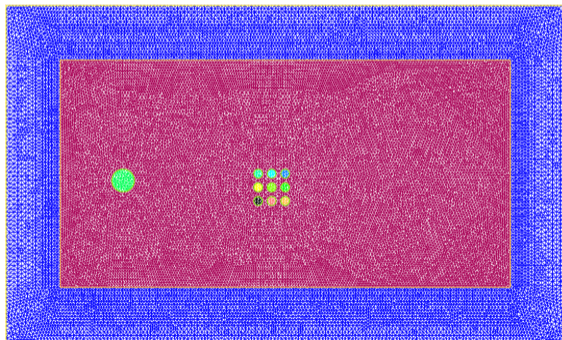
- en lignes et colonnes,
- en couronnes concentriques autour du bâtiment,
- en ligne de biais ou en demi-couronne du côté d'incidence de l'onde.



Domaine avec 4 rangées d'arbres et $\simeq 2 \text{ M}$ éléments

Effet des obstacles sur le champ

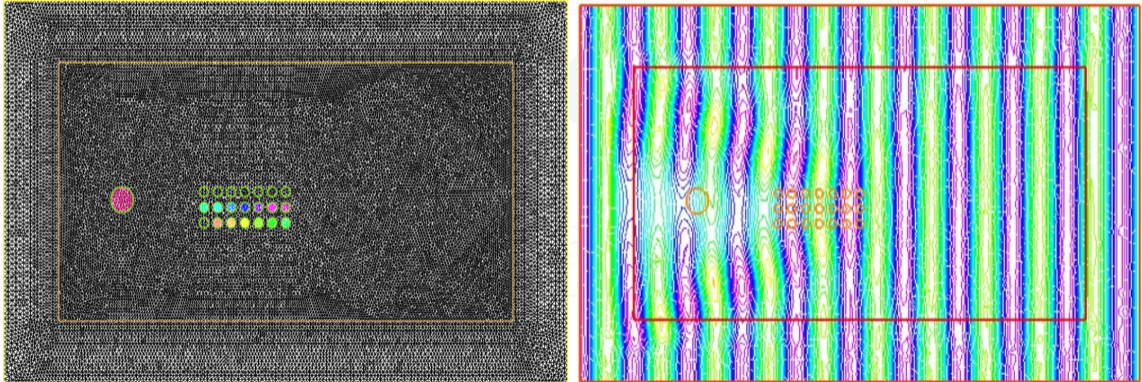
- Cercle à gauche représente le bâtiment, rayon $R = 25\text{m}$.
- Les petits cercles sont les obstacles, rayon $r = 10\text{m}$.
- $u_{\max} = 1.09$ (sans obstacles, $u_{\max} = 1.17$).



Maillage du domaine de calcul (droite) et le champ total (gauche) en présence des obstacles.

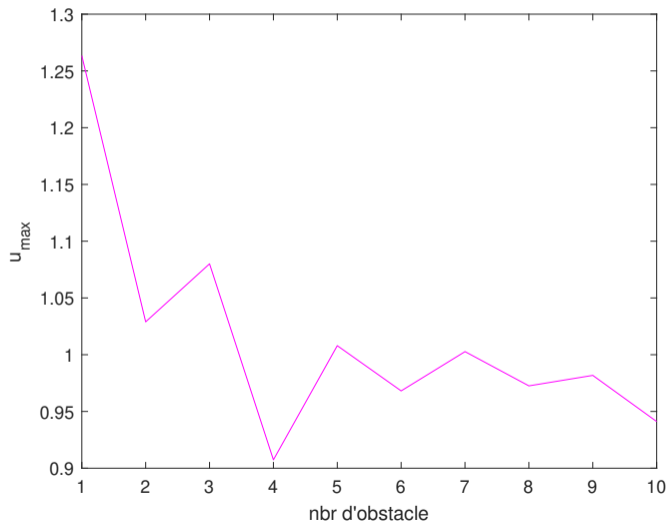
Effet des obstacles sur le champ

- $u_{max} = 0.95$



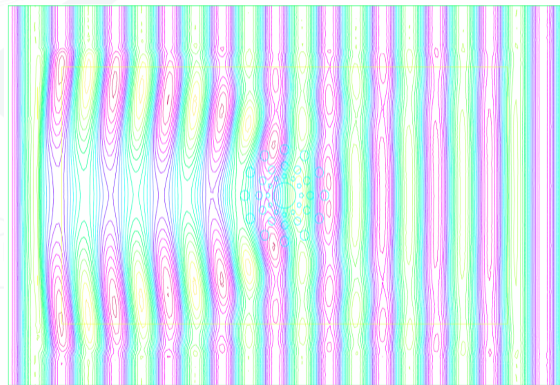
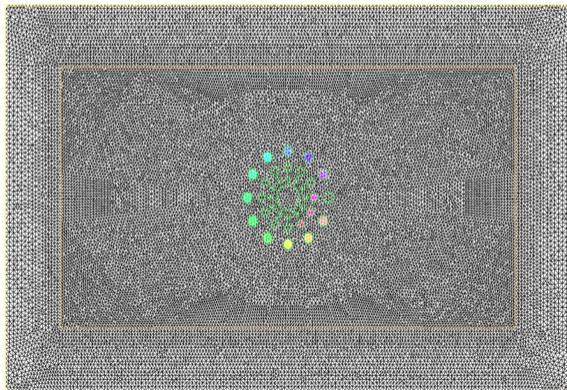
Maillage du domaine de calcul (droite) et le champ total (gauche) en présence de plusieurs obstacles.

Effet des obstacles sur le champ



Couronnes

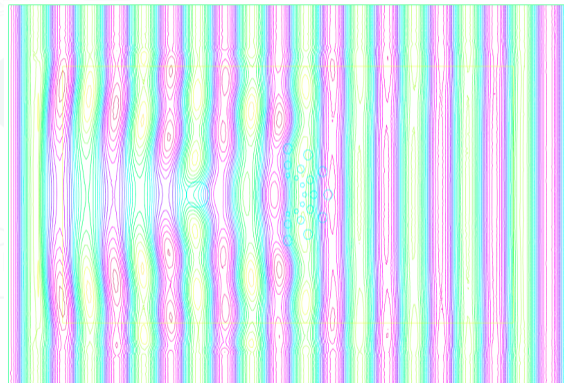
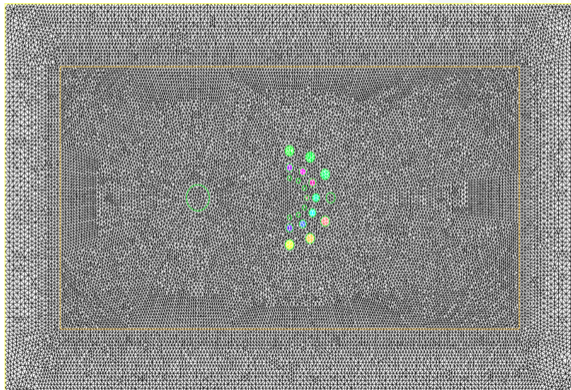
- $u_{\max} = 1.1$
- Ne devrait pas dépendre de la direction d'incidence du séisme



Maillage du domaine de calcul (droite) et le champ total (gauche) en présence d'un couronne.

Demi-couronnes

- $u_{\max} = 0.72$



Maillage du domaine de calcul (droite) et le champ total (gauche) en présence des Demi-couronnes.

Perspectives

- Le code permet de simuler les ondes S.
- Modifier le domaine et les conditions limites permettrait de s'intéresser aux ondes de surfaces.
- Les différentes structures étudiées permettent quelques observations :
 - Il semble important d'avoir un espace entre le bâtiment et la structure.
 - L'effet dépend fortement des dimensions de la structure.
- Le faible contraste entre les matériaux ne permet pas de modifier l'onde incidente de manière importante.

Perspectives

- Principes de la construction parasismique.
- Identification des failles tectoniques actives susceptibles de causer des séismes.
- Il faudrait simuler numériquement les métamatériaux proposés dans la littérature.
- Un soucis important est la quantité de béton nécessaire pour la construction de la structure.
- L'optimisation de la taille et de la position des éléments reste à faire.
- Placer les éléments en utilisant la diffraction de Bragg ?

Bibliographie

- [1] Colombi, A., Colquitt, D., Roux, P., Guenneau, S., & Craster, R. V. (2016). A seismic metamaterial: The resonant metawedge. *Scientific reports*, 6(1), 1-6.
- [2] Colombi, A., Roux, P., Guenneau, S., Gueguen, P., & Craster, R. V. (2016). Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances. *Scientific reports*, 6(1), 1-7.
- [3] Migeot, J.-L. and Coyette, J.-P. & Liens, G. (2016). *Acoustics: essential concepts, theory and models of linear acoustics for engineers*.
- [4] Michler, C., Demkowicz, L., Kurtz, J., & Pardo, D. (2007). Improving the performance of perfectly matched layers by means of hp-adaptivity. *Numerical Methods for Partial Differential Equations: An International Journal*, 23(4), 832-858..
- [5] <https://metaforet.osug.fr/>.
- [6] <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/physique-metamateriaux-forets-lutter-seismes-20042/>
- [7] <https://members.femto-st.fr/vincent-laude/freefem-scripts-numerical-simulation-phononic-crystals>.
- [8] Chaumont Frelet, T. (2015). *Approximation par éléments finis de problèmes d'Helmholtz pour la propagation d'ondes sismiques (Doctoral dissertation, Rouen, INSA)*.

Merci pour votre attention

