

# Influence sur les ondes sismiques des hétérogénéités en champ proche de la source et sur le chemin de propagation

M. Colvez<sup>1</sup>, R. Cottureau<sup>2</sup>, F. Lopez-Caballero<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MSSMat, Centralesupelec, CNRS, Université Paris-Saclay, France

<sup>2</sup> CNRS, Aix Marseille Univ., Centrale Marseille, LMA, Marseille, France

**Résumé** — La croûte terrestre est un milieu de propagation hétérogène : faiblement dans son ensemble et plus fortement dans les zones de faille. Les ondes sismiques enregistrées en surface sont fortement impactées par ces deux types d'hétérogénéités. Cet article présente la nature de cette influence. Les hétérogénéités faibles sur le trajet de propagation induisent un amortissement apparent des ondes cohérentes, principalement dans la partie haute-fréquence du signal. Les hétérogénéités en champ proche ont un effet de guide d'onde et de localisation d'une partie du contenu fréquentiel de l'onde.

**Mots clés** — propagation d'onde, milieu aléatoire, Eléments spectraux.

## 1 Introduction

L'activité sismique de la Terre induit une fracturation importante du sol dans le voisinage direct du plan de faille. De récentes investigations géologiques ont mis en lumière la fracturation importante de la roche dans les quelques centaines de mètres autour du coeur de la faille [1, 2, 3]. Cette structure particulière a une influence directe sur la propagation de l'onde sismique.

En plus de cet effet local, les hétérogénéités de la croûte ont un impact sur la partie haute fréquence de l'onde se propageant jusqu'à la surface libre de la Terre. Cet effet peut être considéré comme un amortissement apparent de l'onde [4].

Cette étude présente les effets des propriétés statistiques à l'échelle régionale sur la propagation d'onde. Les hétérogénéités naturelles de la croûte ainsi que les hétérogénéités dues à la multitude de fractures au voisinage de la faille sont prises en compte dans cette étude. L'objectif de cette étude est de déterminer, à l'aide de simulation numériques 3-D, l'effet de la présence de ces milieux hétérogènes sur une bande de fréquence de 0 à 25Hz du contenu fréquentiel de l'onde sismique obtenues à la surface libre de la Terre. Deux niveaux d'hétérogénéités sont considérés : (1) l'un représentant la faible fluctuation des propriétés mécaniques de la croûte et (2) l'autre représentant la fine couche de quelques centaines de mètres, autour de la faille très hétérogène. Ces deux niveaux sont représentés par des milieux aléatoires avec des longueurs de corrélations et des fluctuations réalistes.

L'étude numérique est faite à l'aide d'un solveur utilisant la méthode des éléments spectraux, couplé à un générateur de champs aléatoire tridimensionnel [5]. Dans cette étude numérique, le champ d'onde à la surface libre est enregistrée par un réseau dense de capteurs pour comprendre l'atténuation haute fréquence du signal ainsi que la possible localisation des ondes autour de la source.

## 2 Modèle Numérique

### 2.1 Outil numérique

Les cas d'étude présentés ci-dessous sont réalisés à l'aide du code SEM3D<sup>1</sup>, code numérique basé sur la méthode des éléments spectraux, développé conjointement par le CEA, l'IPGP et CentraleSupélec

1. SEM3D Ver 2017.04. Registered at French Agency for Protection of Programs (Dépôt APP) under IDDN.FR.001.400009.000.S.P.2018.000.31235 (Inter Deposit Digital Number) by owners : CEA - Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives; IPGP - Institut de Physique du Globe de Paris; Centrale- Supélec; CNRS - Centre National de la Recherche Scientifique.

dans le contexte du projet SINAPS©<sup>2</sup>

La méthode des éléments spectraux correspond à une méthode éléments finis avec des polynômes de haut degré couplé à une propriété de convergence spectrale obtenue par l'emploi de polynômes de Lagrange et d'une grille de points de Gauss-Lobatto-Legendre [6]. Cette méthode a une grande performance numérique, la dispersion numérique est plus faible comparée aux méthodes traditionnelles de résolution numérique (FEM & FDM) pour un nombre de points d'intégration égal par longueur d'onde. Elle est de plus bien adaptée au calcul parallèle [7]. Les simulations numériques illustrées dans la suite ont été effectuées sur le supercalculateur Fusion hébergé par le Mésocentre Moulon<sup>3</sup>. Les ressources numériques utilisées sont résumées dans le Tableau 1.

TABLE 1 – Paramètres numériques

Nb. CPU	Nb. Noeuds	Nb. Elements	Fréquences
216	$\sim 12.10^6$	$\sim 200.10^3$	[0 – 25] Hz

## 2.2 Modèle 3-D

Le problème modélisé correspond à la propagation d'onde dans un demi-espace stratifié illustré Figure 1. Celui-ci est constitué d'un domaine global de taille :  $L_x = L_y = 3000$  m,  $L_z = 6000$  m et d'une zone de faille de taille :  $l_x = l_z = 1000$  m,  $l_y = 400$  m. Le maillage mis en place permet d'avoir une bonne propagation d'onde jusqu'à une fréquence maximum de  $f_{max}=25$  Hz. La source est modélisée par un double couple, qui correspond à une bonne approximation d'un moment sismique. Le modèle de moment utilisé est basé sur le modèle spectral de Brune [8].

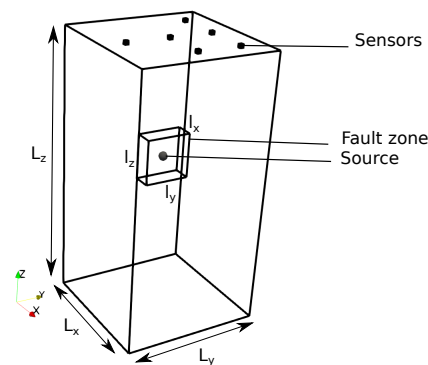


FIGURE 1 – Géométrie du modèle numérique

Pour reproduire les conditions de radiations aux troncatures du domaine numérique, des éléments absorbants sont utilisés [9]. Des capteurs ont été placés à la surface libre du modèle.

## 2.3 Modélisation des hétérogénéités

Les propriétés mécaniques du milieu homogène représentatif du sous-sol géologique sont listées Tableau 2 où  $V_p, V_s$  et  $\rho$  correspondent respectivement à la vitesse des ondes P, la vitesse des ondes S et la masse volumique du milieu.

Les hétérogénéités de la croûte sont modélisées par l'ajout de fluctuations aléatoires autour des valeurs moyennes du sous-sol géologique. La stratégie consiste ici à générer un champ aléatoire indépendant suivant une loi log-normale pour la vitesse des ondes S. Deux types de fluctuations sont utilisés :

2. Séisme et Installations Nucléaires, Améliorer et Pérenniser la Sûreté  
 3. <http://mesocentre.centralesupelec.fr/>

TABLE 2 – Propriétés mécaniques du milieu homogène

$V_p$	$V_s$	$\rho$
$5400\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$3000\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$2700\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

(1) des hétérogénéités fortes correspondant aux hétérogénéités au sein de la zone de faille, (2) des hétérogénéités faibles correspondant aux fluctuations de la croûte englobant la zone de faille. Les deux modèles aléatoires ont une fonction de corrélation de Von Karman. Cette description prend en compte les composantes de petites longueurs d’ondes et la description fractale utilisée pour modéliser les structures géologiques. L’exposant de Hurst, noté  $H$  contrôle la décroissance de cette distribution [10]. Les différents types de fluctuations utilisées sont représentées Figure 2 et leurs propriétés sont listées Tableau 3.

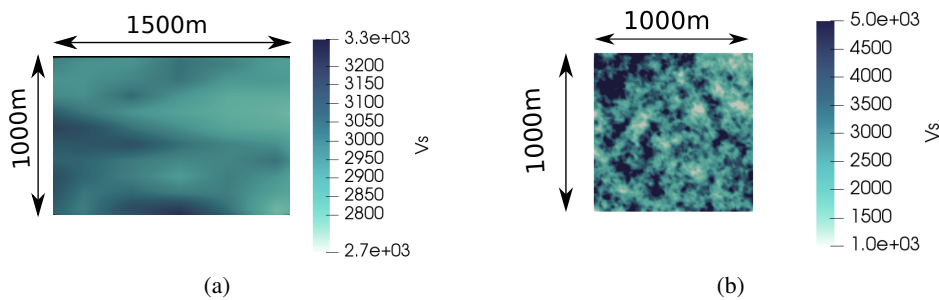


FIGURE 2 – Représentation du champ aléatoire : (a) Hétérogénéités de la croûte (b) Hétérogénéités de la zone de faille

TABLE 3 – Propriétés des champs aléatoires

	Exposant de Hurst	longueur de corrélation	Variance
Hétérogénéités de la croûte	$H = 0.3$	$\ell_x = \ell_y = 1500\text{ m}$ $\ell_z = 500\text{ m}$	$\sigma = 0.05$
Hétérogénéités de la zone de faille	$H = 0.3$	$\ell_x = \ell_y = \ell_z = 50\text{ m}$	$\sigma = 0.3$

### 3 Impact de la présence des hétérogénéités sur le contenu haute fréquence

#### 3.1 Comparaison des modèles

Dans le but de comparer l’effet des hétérogénéités à différents niveaux, 3 modèles numériques ont été mis en place en utilisant le même maillage pour chaque cas. (Voir Figure 3).

#### 3.2 Analyse spectrale

La présence des hétérogénéités a un effet diffractant sur la propagation de l’onde sismique. Cet effet diffractant est visualisé sur la partie du signal où l’amplitude du mouvement est significativement plus faible que la phase forte du signal (Figure 4). Pour comprendre l’effet possible des hétérogénéités les résultats sont présentés par les différences obtenues entre chaque modèle au niveau des capteurs placés à la surface libre du modèle.

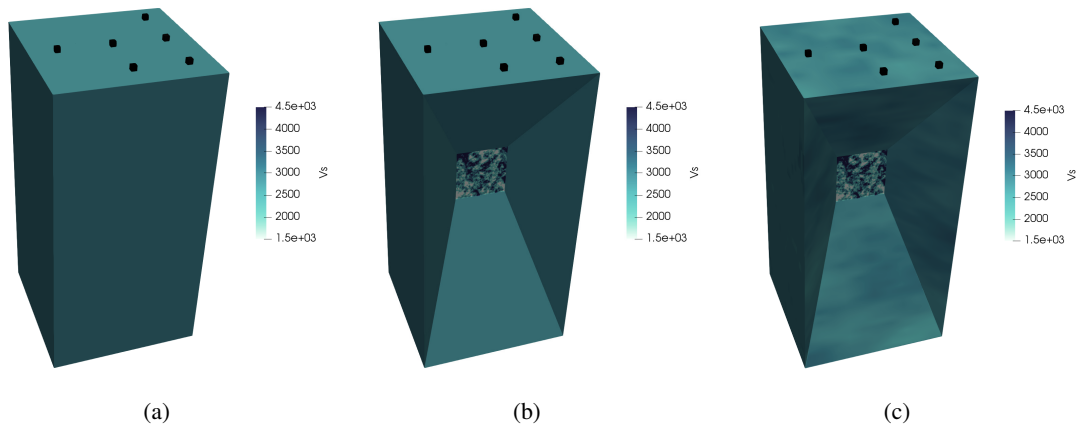


FIGURE 3 – (a) Modèle homogène (b) Modèle hétérogène de la zone de faille enveloppé dans un modèle homogène de croûte (c) Modèle hétérogène de la zone de faille et de la croûte

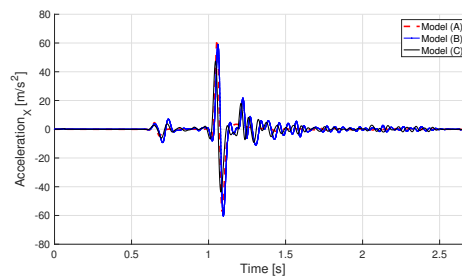


FIGURE 4 – Variation de la Coda du signal sismique à la surface libre

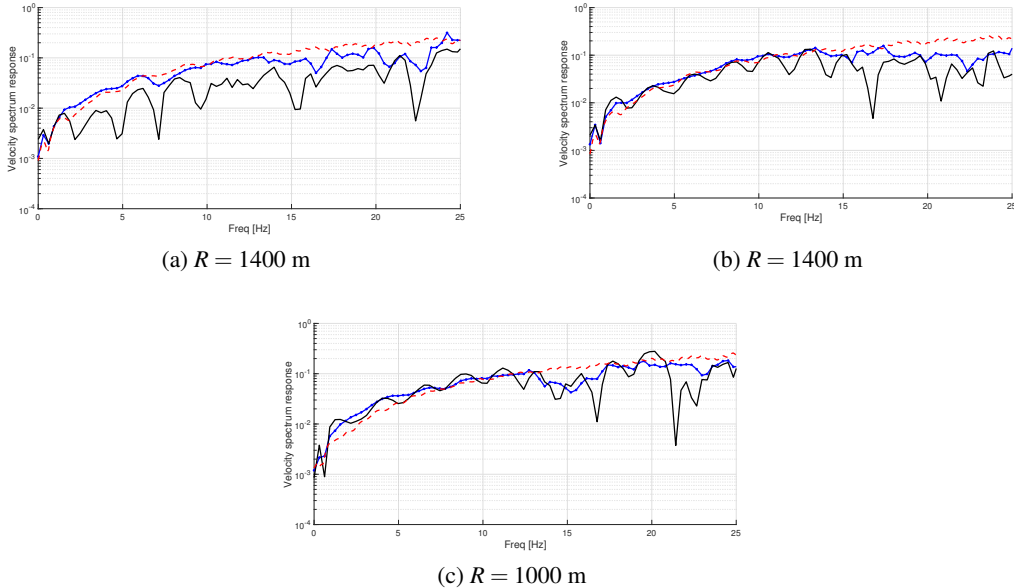


FIGURE 5 – Transformée de Fourier de la réponse en vitesse pour différents capteurs à des distances épicentrales différentes (notées  $R$ ). Le modèle (A) est représenté par les pointillés rouge, le modèle (B) est représenté par la ligne continue bleue et le modèle (C) par la ligne continue noire

Pour la bande de fréquence comprise entre 15 et 25Hz, une partie du signal est atténuée par la présence des hétérogénéités. De plus, pour deux capteurs différents à une égale distance de la source (Figure 5a et Figure 5b), la réponse fréquentielle est différente. La zone hétérogène a un effet directionnel sur la propagation de l'onde, tel qu'un effet de guide d'ondes. De plus, chaque régime d'hétérogénéités (hétérogénéité faible - hétérogénéité forte) aura un impact différent sur le contenu fréquentiel de l'onde.

En comparant les résultats pour les 2 modèles contenant un milieu aléatoire (modèle B et modèle C), les hétérogénéités faibles autour de la zone (modèle C) augmente l'atténuation du contenu haute fréquence (Figure 5a). Même si la tendance des différentes courbes est similaire, la fluctuation est plus importante dans le cas où les hétérogénéités de la croûte sont incluses. Lorsque la zone de faille hétérogène est incluse, certaines fluctuations peuvent correspondre à une résonance de la zone faible ([11] and [12]).

Pour déterminer de manière quantitative l'impact du modèle de croûte hétérogène, il est désormais nécessaire d'augmenter l'échelle du modèle numérique pour relier l'effet des faibles hétérogénéités au paramètre  $\kappa$  correspondant à l'atténuation de la partie haute fréquence décrite par Anderson [4] dépendant du chemin parcouru par l'onde sismique.

## 4 Conclusion

Dans cette étude, l'approche numérique a permis d'analyser l'effet de la présence des différents types d'hétérogénéités sur la propagation des ondes sismiques en prenant en compte ces hétérogénéités sous forme de milieu aléatoire.

Un point important est que la présence de ces milieux aléatoire ont un effet important sur la propagation des ondes. Chaque variation locale des propriétés mécaniques a un effet diffractant sur la propagation. Il est notamment possible que les modes de résonance de la zone de faille influence le contenu de l'onde capté à la surface.

De futurs travaux permettront de déterminer si ces hétérogénéités peuvent être vues comme un amortissement apparent de l'onde dépendant de la fréquence ou si une partie de l'énergie libérée lors d'un événement sismique peut rester localiser au sein de la zone très fracturée autour du coeur de la faille sismique.

## Remerciement

Ces travaux ont bénéficiés des moyens de calcul du Mésocentre de CentraleSupélec et de l'École Normale Supérieure Paris-Saclay (<http://mesocentre.centralesupelec.fr/>).

## Références

- [1] TM Mitchell, Y Ben-Zion, and T Shimamoto. Pulverized fault rocks and damage asymmetry along the arima-takatsuki tectonic line, japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 308(3-4) :284–297, 2011.
- [2] TM Mitchell and DR Faulkner. The nature and origin of off-fault damage surrounding strike-slip fault zones with a wide range of displacements : A field study from the atacama fault system, northern chile. *Journal of Structural Geology*, 31(8) :802–816, 2009.
- [3] Yehuda Ben-Zion and Charles G Sammis. Characterization of fault zones. *Pure and Applied Geophysics*, 160(3-4) :677–715, 2003.
- [4] John G. Anderson and Susan E. Hough. A model for the shape of the fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(5) :1969–1993, 1984.
- [5] L. de Carvalho Paludo, V. Bouvier, and R. Cottreau. Scalable parallel scheme for sampling of gaussian random fields over very large domains. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 117(8) :845–859, 2019.
- [6] D. Komatitsch, J. P. Vilotte, R. Vai, J. M. Castillo-Covarrubias, and F. J. Sánchez-Sesma. The Spectral Element method for elastic wave equations : Application to 2D and 3D seismic problems. *SEG Expanded Abstracts 17*, 45 :1139–1164, 1999.
- [7] Dominik Göddeke, Dimitri Komatitsch, and Matthias Möller. *Finite and Spectral Element Methods on Unstructured Grids for Flow and Wave Propagation Methods*, chapter 9, pages 183–206. Springer, 2014.
- [8] James N. Brune. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 75(26) :4997–5009, 1970.
- [9] G. Festa and J.-P. Vilotte. The Newmark scheme as velocity-stress time-staggering : an efficient PML implementation for spectral element simulations of elastodynamics. *Geophysical Journal International*, 161(3) :789–812, June 2005.

- [10] W. Imperatori and P. M. Mai. Broad-band near-field ground motion simulations in 3-dimensional scattering media. *Geophysical Journal International*, 192(2) :725, 2013.
- [11] Yihe Huang, Jean-Paul Ampuero, and Don V Helmberger. Earthquake ruptures modulated by waves in damaged fault zones. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 119(4) :3133–3154, 2014.
- [12] Michael A Lewis and Yehuda Ben-Zion. Diversity of fault zone damage and trapping structures in the park-field section of the san andreas fault from comprehensive analysis of near fault seismograms. *Geophysical Journal International*, 183(3) :1579–1595, 2010.