



Génération d'accélérogrammes synthétiques large bande par méthode hybride : application au seisme de Niigata

Mickael Delatre* et Hideo Aochi*

* BRGM/Risques Naturels et Sécurité du Stockage de CO₂

3 avenue Claude Villemin

BP36009

45060 Orléans cedex

m.delatre@brgm.fr, h.aochi@brgm.fr

RÉSUMÉ. Hisada propose comme méthode hybride de superposer un résultat basse fréquence déterministe avec un résultat haute fréquence stochastique issu de la somme de plusieurs sources virtuelles à phase aléatoire affectés de coefficients de rayonnement (Onishi et al 2004). Nous montrons que l'hypothèse de phase aléatoire crée des accélérogrammes irréalistes puisque le déplacement haute fréquence est délocalisé en temps ; nous proposons donc de relocaliser les déplacements haute fréquence en appliquant une fonction poids exponentielle à la partie haute fréquence. Cette méthode est appliquée au seisme de Niigata Chuetsu Oki de 2007 : les spectres des accélérogrammes reproduisent les observations à haute fréquence, la partie basse fréquence est sous-estimée pour les composantes horizontales vraisemblablement à cause de la structure 3D du bassin.

ABSTRACT. Hisada proposes as an hybrid method to add low-frequency deterministic results with high-frequency stochastic results produced by the sum of virtual sources with random phase pondered by radiation coefficients (Onishi and al, 2004). We show that the random phase hypothesis leads to unrealistic accelerograms : high-frequency accelerations are not localised in time. We propose therefore to relocate in time high frequency accelerations by using an exponential weighting function over the high-frequency source function. This method is applied to the 2007 Niigata Chuetsu Oki earthquake : high-frequency parts of the spectra reproduce the observations,

MOTS-CLÉS : stochastique, hybride, relocalisation haute fréquence, Niigata

KEYWORDS : stochastic, hybrid, high frequency relocation, Niigata

1. Introduction

Pour reproduire par des simulations l'aspect aléatoire haute fréquence observé sur les enregistrements sismiques, plusieurs méthodes ont été proposées :

- Les méthodes k^2 , qui supposent que cet aspect aléatoire peut être reproduit par une description spatiale aléatoire à petite échelle de la source (Herrero et al 1994) ; ces méthodes requièrent cependant un grand nombre de fonctions de Green pour suivre la complexité de la source ;
- Les méthodes qui utilisent une description spatiale déterministe de la source décomposée en sous-sources et qui injectent l'aspect aléatoire dans la description temporelle de la fonction source

Afin de raffiner le deuxième type de méthode pour obtenir des formes d'onde basse fréquence similaires aux observations, Hisada propose de séparer la génération des accélérogrammes en deux parties : une partie basse fréquence entièrement déterministe, et une partie haute fréquence générée par les sources équivalentes P, Sv et Sh affectés des coefficients de radiation haute fréquence calculés par Onishi et al (2004) ; le spectre de la partie haute fréquence a une phase aléatoire, reproduisant ainsi l'aspect stochastique des observations. Les deux parties sont calculées en prenant une fonction-source en ω^2 modifiée par Boore (1983) et avec un facteur d'échelle défini par Ikiruka (1986) et Onishi et al (2004) pour passer d'une sous-source isolée à une sous-source impliquée dans une grande rupture ; la propagation des ondes est effectuée par la méthode des nombres d'onde discrets 1D (Bouchon 1981) qui nous permet de calculer des fonctions de Green sur une large bande de fréquence et qui est équivalente à la méthode de la matrice R/T développée par Hisada (2001).

Hisada dans son article de 2008 montre que la méthode produit des résultats efficaces pour les vitesses observées, mais indique qu'elle présente des problèmes pour les accélérations. En explorant la méthode proposée, nous avons découvert que le fait de rendre la phase du spectre haute fréquence totalement aléatoire délocalise en temps le signal temporel haute fréquence : nous obtenons donc un signal acausal sans lien avec le signal basse fréquence. Pour remédier à ce défaut, nous proposons donc de relocaliser le signal haute fréquence, en appliquant sur la fonction source haute fréquence une fonction-poids temporelle décroissante. Cette fonction retranscrit la rétrodiffusion des ondes établie par Aki et al (1975) pour la coda des petits séismes. Nous adoptons un modèle simplifié de fonction-poids avec une atténuation indépendante de la fréquence, afin de simplifier le calcul.

Avec cette relocalisation, nous montrons que nous pouvons obtenir des accélérogrammes réalistes avec un coût de calcul raisonnable. Nous appliquons la méthode de Hisada améliorée au séisme de Niigata Chuetsu-Okien 2007 de magnitude 6.8 qui a endommagé la centrale de Kashiwasaki-Kariwa. Ce séisme a été étudié par Aoi et al (2008) ainsi que par Cirella et al (2008) et Hikima et al (2008), qui ont produit une description cinématique du processus de rupture. Nous avons utilisé la description cinématique obtenu par Aoi et al (2008) pour générer des accélérogrammes sur les stations du réseau K-Net autour de Niigata : nous avons mesuré l'impact de la phase aléatoire haute fréquence sur la mesure de l'accélération maximale et le spectre.

2. Génération des accélérogrammes large bande

2.1 Génération des accélérogrammes synthétiques par la méthode de Hisada

La rupture principale est modélisée par une grille de sous-ruptures, dont la taille est définie par le paramètre d'échelle N (longueur de la rupture sur longueur de la sous-rupture).

La première étape du processus est de calculer la fonction-source associée à chaque sous-rupture. Un modèle ω^2 modifié (Boore 1983) est utilisé, avec un facteur d'échelle pour passer de la sous-rupture seule à la sous-rupture dans le processus complet de rupture ; le module du spectre de source prend la forme suivante :

$$|\dot{M}^s(f)| = \frac{M_0^s}{1+(f/f_c)^2} \frac{1}{\sqrt{1+(f/f_{max})^{2n}}} \left[1 + (N-1) \frac{1}{1-2i\pi f \tau_L/\alpha} \right] \quad [1]$$

f_c est défini par la formule de Brune (1970). f_{max} et n sont des paramètres empiriques définis régionalement. Le terme entre crochets nous permet de passer d'une sous-rupture isolée à une sous-rupture intégrée dans une rupture N fois plus grande (Ikiruka 1986, Onishi et al 2004). Enfin, pour la fonction haute fréquence, nous rendons la phase du spectre aléatoire, avec une densité de probabilité uniforme sur l'intervalle $[-\pi, \pi]$.

Ensuite, pour chaque couple sous-rupture/récepteur, quatre directions de glissement sont modélisées : la direction de glissement du modèle cinématique de rupture pour les basses fréquences, et trois directions virtuelles de glissement générant chacune pour le récepteur seulement des ondes P, Sv et Sh pour les hautes fréquences. Les signaux des sources haute fréquence sont pondérés par les coefficients de radiation calculés par Onishi et al (2004) qui réintroduisent la géométrie initiale de la rupture considérée.

A partir de ces quatre sources et de leurs fonctions spectrales associées, nous calculons les accélérogrammes correspondants, et nous sommes les contributions haute fréquence ; les composantes horizontales pour les hautes fréquences sont homogénéisées pour reproduire la non-directivité de ces composantes. Les composantes haute fréquence reçoivent enfin une phase aléatoire pour chaque fréquence échantillonnée, avec une densité de probabilité uniforme sur l'intervalle $[-\pi, \pi]$, puis sont superposées aux résultats basse fréquence à l'aide d'un filtre trapézoïdal entre 0,5 et 2 Hz.

2.2 Impact de la phase aléatoire sur la distribution temporelle des hautes fréquences

Ajouter un déphasage au spectre d'une fonction pour obtenir un décalage temporel est une propriété bien connue de la transformation de Fourier. Ajouter une phase aléatoire pour chaque fréquence échantillonnée pour le signal haute fréquence revient donc à distribuer aléatoirement ce signal sur toute la durée du signal calculé et le rendre acausal. La Figure 2 montre que les fonctions source générées pour les accélérogrammes renforcent le poids des hautes fréquences et présentent donc un bruit constant inexploitable pour les études de risque sismique

Afin de produire des accélérogrammes plus réalistes, il faut donc relocaliser le signal haute fréquence. Nous proposons pour ce faire l'algorithme suivant :

- Nous repassons la fonction-source dans le domaine temporel

- Nous multiplions la fonction-source temporelle par une exponentielle décroissante avec un temps caractéristique t_0
- Nous passons la fonction-source modifiée dans le domaine spectral, pour effectuer la convolution avec la fonction de Green.

La Figure 1 montre l'impact de cette modification sur les fonctions-source complètes. En temps, nous relocalisons comme prévu l'énergie haute fréquence ; en fréquence, nous convoluons par la transformée d'une exponentielle, et nous lissions donc le spectre de la fonction-source, ce qui a pour effet d'atténuer la stochasticité du signal à haute fréquence.

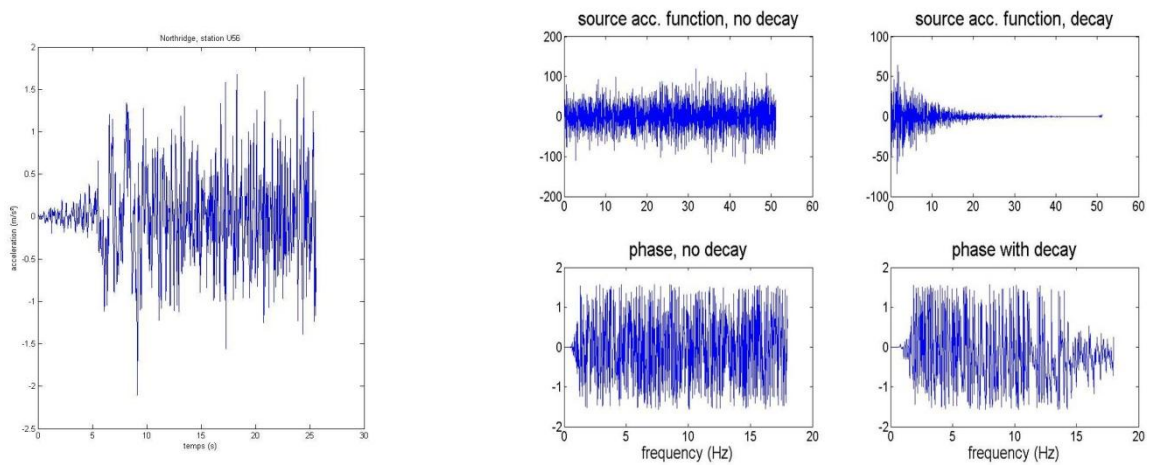


Figure 2. *essai d'accélérogramme synthétique du seisme de Northridge, station U56. S'il est possible de reconnaître le début des formes d'onde basse fréquence, la fin du signal est noyée dans le bruit haute fréquence.*

Figure 1. *Comparaison de la fonction-source sans (à gauche) et avec (à droite) relocalisation par fonction exponentielle, dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel pour la phase.*

Cette fonction temporelle représente l'atténuation des ondes rétrodiffusées de la coda (Aki et al 1975). Nous approximations l'atténuation par un modèle à Q constant, qui ne retranscrit qu'incorrectement le comportement fréquentiel de l'atténuation dans ces bandes de fréquence ; cependant, cette simplification nous permet de traiter le signal en une fois au lieu de le découper en bandes de fréquence.

3. Application : le seisme de Niigata Chuetsu-Oki (2007)

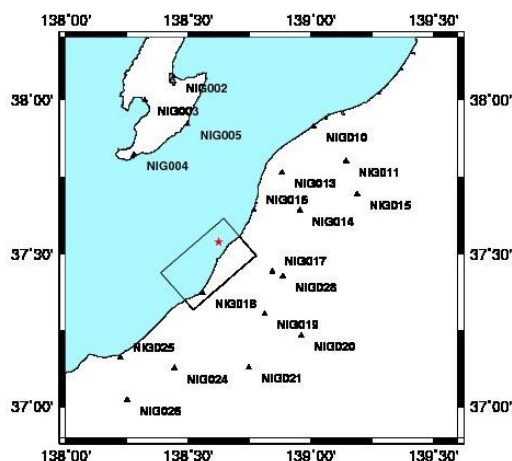


Figure 3. Région de Niigata, avec les coordonnées des stations F-Net utilisées dans cet article. La zone de rupture modélisée est représentée, l'étoile rouge indiquant l'épicentre du point de rupture initial selon Aoi et Sekiguchi (2008).

Le seisme de Niigata Chuetsu-Oki, de magnitude 6,6, a eu lieu le 16 juillet 2007 dans la préfecture de Niigata parallèlement au trait de côte. Le tenseur global de moment calculé indique qu'il s'agit d'une faille inverse avec un pendage nord-ouest ou sud-est, mais la distribution ultérieure des répliques n'a pas permis de discriminer entre les deux plans nodaux (Hikima et al 2008). Pour cette raison, Aoi et al (2008) ont proposé un modèle pour chaque plan nodal, tandis que Hikima et al (2008) ont utilisé la relocalisation des points initiaux de rupture des aspérités, des observations des répliques par des sismomètres sous-marins et des données de sismique réflexion pour appuyer l'hypothèse d'un pendage sud-est.

Pour cette étude, nous avons exploité les données disponibles du réseau K-Net de la région ; nous avons opté pour le modèle de Aoi et al (2008) avec pendage sud-est. La carte de la région, où sont représentées les stations et le modèle utilisé est disponible ci-dessous.

Nous appliquons la méthode proposée en partie 2 pour modéliser le seisme, avec les paramètres suivants :

- Les paramètres de Boore sont $n=1,55$ et $f_{max} = 6$ Hz, comme proposés par Tsuruki et al (2006) dans leur étude sur le seisme de Hyogo-ken Nambu de 1995
- La chute de contrainte est calculée en utilisant un modèle de crack circulaire (Escheby 1957) ; la surface totale de la rupture modélisée est de 24×30 km et un moment de $1,62 \cdot 10^{19}$ Nm, nous obtenons une chute de contrainte de 2,048 MPa
- Nous adoptons $t_0 = 8$ s, correspondant à l'atténuation mesurée dans la région dans la bande 1-2 Hz par Jin et al (2005) et à la durée caractéristique de la fonction d'autocorrélation du bruit calculée à la station F-Net KZK par Wegler et al (2007). Cette valeur ajuste correctement les durées des coda pour la station Nig004
- Le modèle de Aoi décompose la rupture en 15×12 sous-ruptures, nous utilisons donc pour le paramètre d'échelle moyenné $N=13$.

- Les fonctions de Green sont calculées par la méthode des nombres d'onde discrètes implémentée par Bouchon (1981)
- Les nombres aléatoires sont obtenues avec le générateur pseudo-aléatoire de GNU Fortran, la graine du générateur pour chaque accélérogramme est fournie par la somme des heures, minutes et secondes issues de l'horloge de l'ordinateur.

3.3 Influence de la phase aléatoire sur les caractéristiques temporelles et spectrales des accélérogrammes

Puisque nous introduisons un élément aléatoire dans la simulation, il est important de quantifier la répétabilité des résultats obtenus. Nous avons donc fait 10 simulations avec une graine différente, puis nous avons regardé les différentes caractéristiques du signal : accélération maximale, durée d'Arias, amplitude spectrale et série temporelle.

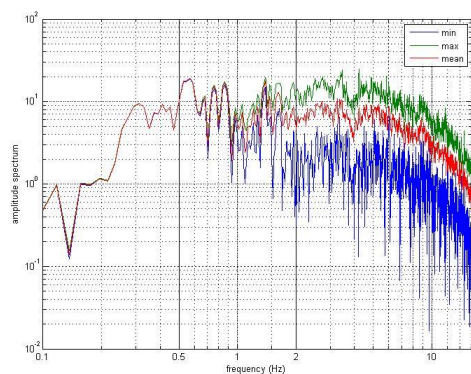


Figure 4. minimum, maximum et moyenne des amplitudes des spectres d'accélérogrammes obtenus à la station Nig004

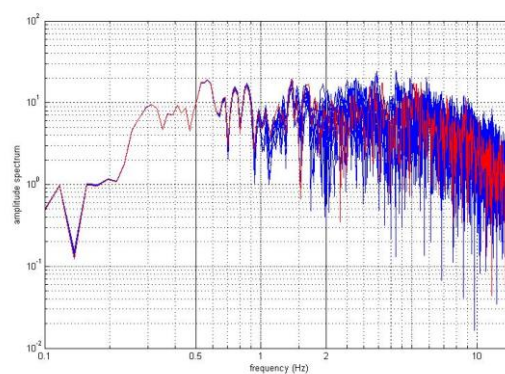


Figure 5. amplitude des spectres des accélérogrammes obtenus pour la station Nig004 (composante verticale), avec un accélérogramme mis en évidence en rouge pour montrer le comportement fréquentiel d'un accélérogramme.

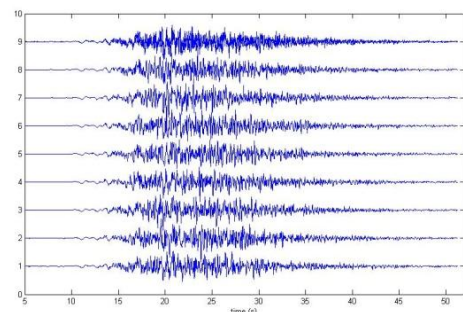


Figure 6. Accélérogrammes des 10 simulations effectuées à la station Nig004

Les Figure 4 et Figure 5 montrent les résultats obtenus pour les spectres de ces dix accélérogrammes. La variabilité à partir de 2Hz atteint une décade, mais le spectre mis en avant dans la Figure 5 montre que cette variabilité est marquée dès le premier accélérogramme, l'amplitude se modifiant de presque une décade dans un intervalle de fréquence très court ; nous avons donc une modélisation qualitativement proche des observations faites. Dans le domaine temporel, la Figure 7 montre que cette variabilité à haute fréquence ne masque pas les formes d'ondes basse fréquence.

En introduisant une phase aléatoire haute fréquence avec une relocalisation de l'énergie, nous pouvons donc à la fois respecter les formes d'onde basse fréquence et la variabilité haute fréquence, si la source et les fonctions de Green sont modélisés correctement.

3.4 Comparaison avec les observations du seisme de Niigata

L'ensemble des 10 modélisations sur l'ensemble des stations indiquées Figure 3 est comparé aux enregistrements du seisme de Niigata. Sont comparés le PGA et les spectres d'accélération, sur une bande de fréquence entre 0.1 et 15 Hz. L'ensemble des résultats est résumé dans les Figure 8,9 et 10.

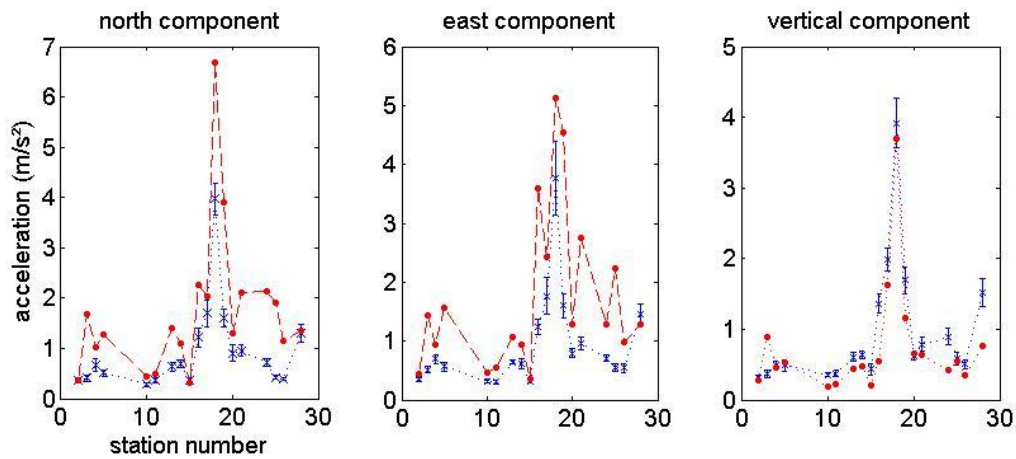


Figure 8. Comparaison observation/modèles pour le PGA. Pour chaque station, la moyenne et l'écart-type des solutions sont calculés (en bleu) ; en rouge, l'accélération observée. L'abscisse représente le numéro de la station considérée.

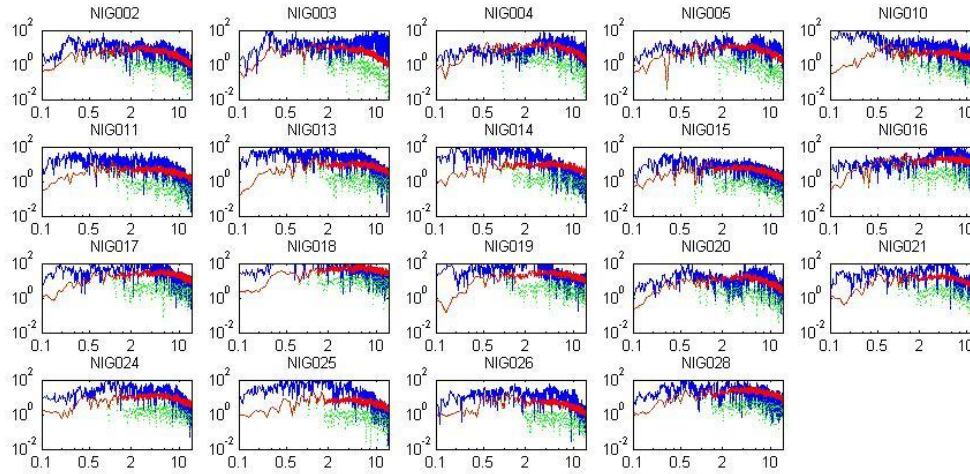


Figure 9. Comparaison des spectres d'amplitude entre observation et modélisations, composante E. En bleu, les observations, en rouge et vert les maxima et minima des modélisations

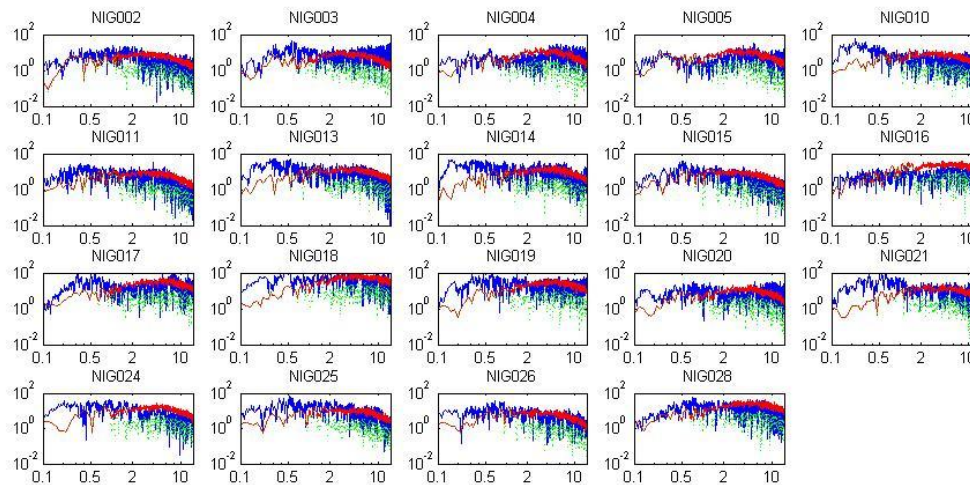


Figure 10. Comparaison des spectres d'amplitude entre observation et modélisations, composante verticale. En bleu, les observations, en rouge et vert les maxima et minima des modélisations. L'abscisse représente les fréquences entre 0.1 et 15 Hz

Les modélisations respectent le PGA sur la composante verticale, mais sous-estiment les composantes horizontales. D'après la Figure, cette différence se manifeste essentiellement dans la partie basse fréquence (jusqu'à 2Hz) pour toutes les stations ; de même, cette sous-estimation apparaît pour les basses fréquence de la composante verticale de plusieurs stations. A l'inverse, les modélisations ajustent bien les observations à haute

fréquence ; notre description déterministe basse fréquence est donc responsable. Aucun effet clair de directivité n'apparaissant, nous supposons donc que ces écarts proviennent du modèle de propagation choisi, qui ne retranscrit que très mal la géométrie du bassin de Niigata. Cependant, pour plusieurs stations (Nig004, Nig016, Nig020, Nig028), l'ajustement des spectres est très bon, et le modèle haute fréquence reproduit correctement les observations sur la station Nig018 qui a pourtant subi des non-linéarités (tout comme les stations de la centrale de Kashiwasaki-Kariwa).

4. Conclusion

Puisque la méthode de Hisada entraîne des oscillations haute fréquence non localisées en temps, nous avons proposé de relocaliser en temps le signal haute fréquence en appliquant sur la fonction source haute fréquence une fonction-poids exponentielle avec un paramètre t_Q : ce paramètre reproduit au niveau de la source le phénomène de scattering et d'atténuation de la coda qui n'est pas modélisé dans les méthodes de propagation par nombre d'onde discret proposés par exemple par Bouchon (1981). Nous avons appliqué cette méthode au seisme de Niigata Chuetsu-Oki de 2007.

La modélisation reproduit correctement pour la plupart des stations les PGA et spectres observés sur la composante verticale. Cependant les composantes horizontales sont sous-estimées par la modélisation ; de plus, la partie basse fréquence du signal est sous-estimée pour plusieurs stations. Il apparaît qu'il ne s'agit pas d'un effet de directivité de la source, nous supposons donc que ce problème est lié à la complexité du bassin de Niigata que nous ne pouvons pas reproduire par un modèle 1D. Les parties haute fréquence sont beaucoup plus satisfaisantes, et ce avec un nombre limité de modélisations pour obtenir une bonne variabilité ; elles peuvent donc être facilement utilisées pour des études de risque sismique.

Afin de remédier aux écarts à basse fréquence, il est envisageable de combiner des modélisations basse fréquence produits par un modèle 3D par éléments finis (Ducellier et Aochi, 2010) et des modélisations haute fréquence avec un modèle 1D pour obtenir des fonctions de Green large bande. Cette approche demande des calculs plus intensifs, mais devrait donner des spectres mieux ajustés à basse fréquence.

t_Q joue un rôle très important dans la méthode proposée ; il convient donc d'améliorer le modèle simple de coda utilisé. Pour ce faire, nous pouvons calculer l'atténuation de la fonction source dans plusieurs bandes de fréquence, afin d'exploiter plus complètement les mesures de Jin et al (2005).

Nous tenons à remercier tous les participants au projet ANR DEBATE pour leurs retours et leurs suggestions sur la modélisation.

5. Bibliographie

Aki K., Chouet B., « Origin of coda waves : Source, attenuation and scattering effects », *Journal of Geophysical Research*, vol. 80, 1975, p.3322-3342

Aoi S., Sekiguchi H., Morikawa N., Kunugi T., « Source process of the 2007 Niigata_ken Chuetsu-oki earthquake derived from near-fault strong motion data », *Earth Planet Space*, vol. 60, 2008, p. 1131-1135

- Boore DM., « Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological model of the radiated spectra », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 73, 1983, p. 1865-1894
- Bouchon M., « A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 71, n°4, 1981, p. 959-971
- Brune JN., « Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake », *Journal of Geophysical Research*, vol. 75, 1970, p. 4997-5009
- Cirella A., Piatanesi A., Tinti E., Cocco M., « Rupture process of the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki earthquake by non-linear joint inversion of strong motion and GPS data », *Geophysical Research Letters*, vol. 35, L 16306, doi:10.1029/2008GL034756, 2008
- Ducellier A., Aochi H., « Numerical simulation of the Mw 6.6 Niigata, Japan, earthquake : Reliable input ground motion for engineering purpose », *Proceedings of the 14th European conference on Earthquake engineering*, Ohrid : Macedoine, 2010
- Herrero A., Bernard P., « A kinematic self-similar rupture process for earthquake », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 84, 1994, p. 1216-1228
- Hikima K, Koketsu K., «Joint inversion of the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki earthquake from geodetic, farfield and nearfield data», *Japan Geoscience Union Meeting*, Japan, mai 2008
- Hisada Y., «An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths (Part 2)», *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 85, 1995, p. 1080-1093
- Hisada Y., «Broadband strong motion in layered half-space using stochastic Green's function technique», *Journal of Seismology*, vol.12., 2008, p. 265-279
- Ikiruka K., «Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes», *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*, vol. 33, 1986, p. 151-156
- Jin A., Aki K., «High-resolution maps of Coda Q in Japan and their interpretation by the brittle-ductile interaction hypothesis », *Earth Planet Space*, vol. 57, 2005, p. 403-409
- Onishi Y., Horike M., «The extended stochastic simulation method for close-fault earthquake motion prediction and comments for its application to the hybrid method », *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 586, 2004, p. 37-44
- Tsuruki M., Kagawa T., «Study on a high-cut filter for strong ground motion prediction – based on the observed records during the 1995 Hyogo-ken Nambu earthquake », *Journal of the Japanese Association for Earthquake Engineering*, vol 6., 2006, p. 94-112
- Wegler U., Sens-Schönfelder C., «Fault zone monitoring with passive image interferometry», *Geophysical Journal International*, vol. 168, 2007, p. 1029-1033