

Inversion généralisée de données accélérométriques KIK-net, comparaison à d'autres approches d'évaluation de l'effet de site et implications sur la détermination de Ko

Laetitia Foundotos, Aurore Laurendeau, Stéphane Drouet, Fabrice Hollender,
Pierre-Yves Bard, Vincent Perron, Jean Letort

► To cite this version:

Laetitia Foundotos, Aurore Laurendeau, Stéphane Drouet, Fabrice Hollender, Pierre-Yves Bard, et al.. Inversion généralisée de données accélérométriques KIK-net, comparaison à d'autres approches d'évaluation de l'effet de site et implications sur la détermination de Ko. 9ème Colloque National AFPS2015 , AFPS / IFSTTAR, Nov 2015, Marne-la-Vallée, France. insu-01742663

HAL Id: insu-01742663

<https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-01742663>

Submitted on 27 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Inversion généralisée de données accélérométriques KiK-net, comparaison à d'autres approches d'évaluation de l'effet de site et implications sur la détermination de κ_0

Generalized inversion of KiK-net accelerometric data, comparison to other site effect evaluation approaches and implication on κ_0 determination

Laëtitia Foundotos*— Aurore Laurendeau** —Stéphane Drouet*** — Pierre-Yves Bard**** —Fabrice Hollender*,**** —Vincent Perron* —Jean Letort****

* CEA Cadarache, 13108 St Paul-lez-Durance, France, laetitia.foundotos@cea.fr

** CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon, France

*** Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Brasil

**** Univ. Grenoble, ISTERre, 38041 Grenoble, France

RÉSUMÉ. Nous avons appliqué la méthode d'inversion généralisée développée par Drouet et al. (2008, 2010) à des enregistrements du réseau japonais KiK-net afin 1/ de déterminer simultanément les propriétés de source, de propagation et de site ; 2/ de comparer les réponses de site obtenues à d'autres approches d'évaluation de l'amplification locale ; et 3/ d'estimer les propriétés d'atténuation hautes fréquences des sites (κ_{0_TF}). 1950 accélérogrammes de séismes crustaux correspondant à des événements de magnitude 3.5 à 6.9 enregistrés à 162 paires de stations (surface/profondeur) ont été utilisés. Le processus d'inversion a produit les coefficients d'atténuation régionale (Q_0 , α et γ), les paramètres de source (M_w et f_c) et les paramètres de site sous forme de fonctions d'amplification à différentes fréquences par rapport à un site de référence correspondant à $v_{S30} = 950$ m/s. Une attention particulière a été portée à ces réponses de site où nous avons observé des amplifications atteignant des valeurs supérieures à 10 entre 5 et 10 Hz. Des rapports spectraux entre réponses de site en surface et en fond de puits ont également été calculés et comparés à des rapports spectraux obtenus de manière empirique et par simulation numérique linéaire SH-1D. L'accord entre ces différentes approches est très bon. En surface, nous avons trouvé un faible niveau de corrélation entre κ_{0_TF} et les valeurs de v_{S30} . En fond de puits en revanche, nous avons observé une décroissance des valeurs de κ_{0_TF} pour des valeurs croissantes de v_S .

ABSTRACT. We applied the generalized inversion methodology developed by Drouet et al. (2008, 2010) to Japanese KiK-net recordings in order to 1/ determine simultaneously source, path and site properties; 2/ compare obtained site responses with other approaches for evaluation of local amplification; and 3/ estimate high frequencies attenuation properties of sites (κ_{0_TF}). 1950 accelerograms of crustal earthquakes corresponding to events with magnitude between 3.5 and 6.9 recorded at 162 pairs of stations (surface/downhole) were used. The inversion procedure produced regional attenuation coefficients (Q_0 , α and γ), source parameters (M_w and f_c) and site parameters in the form of amplification functions at different frequencies with respect to a reference site corresponding to $v_{S30} = 950$ m/s. A particular attention was paid to site responses. We observed amplifications reaching values larger than 10 between 5 and 10 Hz. Spectral ratios between surface and downhole site responses were also computed and compared with spectral ratios obtained with empirical and numerical approaches. The agreement between the different approaches is very good. At surface, we found a low level of correlation between κ_{0_TF} and v_{S30} values. At downhole, we observed a decrease of κ_{0_TF} values for increasing v_S values.

MOTS-CLES: Inversion généralisée, KiK-net, effets de site, κ_{0_TF} .

KEYWORDS: Generalized inversion, KiK-net, site effects, κ_{0_TF} .

1. Introduction

Une des plus grandes problématiques dans les études d'aléa sismique est la prédiction des mouvements du sol attendus pour un futur séisme. Pour cela, il est nécessaire de pouvoir caractériser à la fois les propriétés de source et les amplifications de site dans une large bande de fréquences. Une méthode utilisée pour simultanément déterminer les termes de source, de propagation et de site à partir d'une grande base de données d'enregistrements de mouvements du sol est la technique d'inversion généralisée. Dans cette étude, nous appliquons la méthodologie d'inversion spectrale paramétrique développée par Drouet *et al.* (2008, 2010) à une base de données d'accélérogrammes enregistrés par le réseau japonais KiK-net.

Dans une première étape, nous sélectionnons un ensemble de données composé de 1950 enregistrements de 255 séismes crustaux enregistrés à 162 paires de stations surface/profondeur. Tous les enregistrements sont ensuite traités pour calculer les spectres de Fourier en ondes S qui sont utilisés en entrée de l'inversion généralisée. La procédure d'inversion utilisée dans cette étude permet de caractériser les trois coefficients d'atténuation Q_0 , α et γ . Les paramètres de source tels que les magnitudes de moment M_w et les fréquences coin f_c sont analysés.

Une attention particulière est donnée aux propriétés de site inversées. Pour chaque station, les fonctions de transfert de site sont calculées, donnant le niveau d'amplification à différentes fréquences par rapport à la réponse d'un site au rocher de référence commun. Les rapports entre les fonctions de transfert de surface et de profondeur sont analysés et comparés à ceux obtenus à partir de d'autres approches (empirique et numérique). Nous estimons également les valeurs du paramètre de site κ_0 par la régression de la partie hautes fréquences des fonctions de transfert de site. Ces valeurs sont comparées avec les valeurs de v_{S30} déterminées à partir des profils de vitesse disponibles pour chaque site. Nous cherchons à étudier une relation potentielle entre les paramètres de site κ_0 et v_{S30} .

2. Méthode : la technique d'inversion généralisée

Une des méthodes utilisées pour déterminer simultanément les termes de source, de propagation et de site à partir d'une grande base de données de multiples séismes enregistrés à de multiples stations est la technique d'inversion généralisée introduite par Andrews (1986). Dans cette étude, nous appliquons la méthodologie d'inversion spectrale paramétrique développée par Drouet *et al.* (2008, 2010).

Le spectre de Fourier en accélération des ondes S en champ lointain $A_{ijk}(r_{ij}, f_k)$ peut être écrit comme le produit des termes de source, de propagation et site :

$$A_{ijk}(r_{ij}, f_k) = \Omega_i(f_k) \times D_{ij}(r_{ij}, f_k) \times S_j(f_k) [1]$$

où r_{ij} est la distance hypocentrale du séisme i à la station j et f_k la fréquence.

Le terme de source est décrit en utilisant le modèle de Brune (1970) :

$$\Omega_i(f_k) \sim \frac{(2\pi f_k)^2 M_{0i}}{1 + \left(\frac{f_k}{f_{ci}}\right)^2} [2]$$

où M_{0i} est le moment sismique et f_{ci} est la fréquence coin du séisme i .

Le terme de propagation implique la décroissance anélastique et l'atténuation géométrique :

$$D_{ij}(r_{ij}, f_k) = \exp\left(-\frac{\pi r_{ij} f_k}{Q(f_k) v_S}\right) \times \frac{1}{r_{ij}^\gamma} [3]$$

où v_S est la vitesse moyenne des ondes S le long du chemin de propagation, $Q(f_k) = Q_0 \times f_k^\alpha$ est le facteur de qualité et γ est le coefficient d'atténuation géométrique.

Le terme de réponse de site $S_j(f_k)$ correspond à l'effet de site à la station j . Ce terme est égal à 1 pour toutes les fréquences en l'absence d'effet de site (*i.e.* condition de site au rocher).

L'équation [1] peut être linéarisée en prenant le logarithme de base 10 du spectre de Fourier :

$$y_{ijk} = m_{0i} - \log_{10} \left(\frac{(2\pi f_k)^2}{1 + \left(\frac{f_k}{f_{ci}}\right)^2} \right) - \gamma \log_{10}(r_{ij}) - \frac{\pi r_{ij} f_k^{1-\alpha}}{\log_e(10) Q_0 v_S} + S_{jk} \quad [4]$$

où :

$$y_{ijk} = \log_{10} \left(A_{ijk}(r_{ij}, f_k) \right) \quad [5]$$

$$m_{0i} = \log_{10} \left(M_{0i} \times \frac{2R_{\theta\phi}}{4\pi\rho\beta^3} \right) \quad [6]$$

$$s_{jk} = \log_{10} \left(S_j(f_k) \right) \quad [7]$$

avec $R_{\theta\phi}$ le terme de rayonnement de la source, supposé constant ($R_{\theta\phi} = 0.55$ pour les ondes S, Boore & Boatwright, 1984), ρ la densité et β la vitesse des ondes S à la source (nous supposons $\beta = v_S = 3.5 \text{ km/set}$, $\rho = 2800 \text{ kg/m}^3$, comme dans Oth *et al.* (2010) pour les séismes crustaux japonais).

L'équation [4] décrit un système linéaire classique de la forme $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ avec \mathbf{b} le vecteur de données contenant le logarithme des amplitudes spectrales, \mathbf{x} est le vecteur contenant les paramètres du modèle et \mathbf{A} est la matrice du système qui les relie. Ce système est résolu ici en utilisant un schéma d'inversion itératif de Gauss-Newton.

3. Données

3.1. La base de données japonaise KiK-net

Le Japon est caractérisé par une forte activité sismique. Après le séisme destructeur de Kobe en 1995, de grands réseaux sismiques ont été déployés à travers le Japon (K-NET, KiK-net, Hi-net et F-net ; Okada *et al.* 2004). Le réseau KiK-net (KibanKyoshin network), qui opère depuis juin 1997, est actuellement constitué de 689 stations couvrant aussi uniformément que possible l'ensemble du territoire japonais. Chaque site KiK-net a l'avantage d'être composé d'une paire d'accéléromètres (trois composantes) : un en surface et l'autre installé en fond de puit.

3.2. Sélection et traitement des données

Dans cette étude, nous utilisons une partie de la base de données accélérométrique KiK-net construite par Laurendeau *et al.* (2013). Nous sélectionnons tous les séismes avec des $M_w \geq 3.5$ enregistrés entre Avril 1999 et Décembre 2009. Nous considérons les séismes crustaux (profondeurs $\leq 25 \text{ km}$) et nous gardons seulement les séismes enregistrés par au moins trois stations et les stations qui ont enregistré au moins trois séismes. Pour satisfaire l'approximation en champs lointain, nous imposons une distance minimum à la rupture de 15 km.

Afin de préparer les données pour l'inversion, tous les enregistrements de la base de données sont traités pour calculer les spectres de Fourier en accélération des ondes S. Les temps d'arrivée des ondes P et S sont pointés et

les fenêtres d'ondes S directes sont extraites, débutant au temps d'arrivée de l'onde S et finissant à un temps estimé, basé sur une durée calculée en fonction de la distance et de la magnitude. Nous imposons une durée minimum de fenêtre en ondes S égale à 10 secondes. Les fenêtres de bruit d'une longueur égale à celle des fenêtres des ondes S sont aussi extraites. Pour les fenêtres sélectionnées, les spectres de Fourier en accélération sont calculés et lissés en utilisant la fonction de Konno&Ohmachi (1998) avec un paramètre $b = 30$. Les composantes N-S et E-W sont combinées pour obtenir une seule composante horizontale.

Cependant, les stations KiK-net sont caractérisées par une réponse en fréquence des instruments correspondant approximativement à un filtre Butterworth avec une fréquence de coupure égale à 30 Hz. Dans cette étude, afin de considérer les fréquences au-delà de 30 Hz, une correction complète des signaux par déconvolution de cette réponse instrumentale a été nécessaire.

De plus, l'analyse simultanée de petits et de grands séismes impose l'utilisation d'une gamme de fréquence commune avec un bon rapport signal sur bruit. A cause de cette contrainte, nous gardons seulement les données avec un rapport signal sur bruit supérieur à trois et la fréquence minimale est fixée à 0.3 Hz. Donc, pour l'inversion généralisée les amplitudes spectrales seront analysées en 40 points en fréquence entre 0.3 et 30 Hz.

Après l'application de ces critères de sélection, la base de données finale est composée de 1950 enregistrements (6 composantes) à partir de 255 séismes enregistrés à 162 sites (Figure 1.a). La Figure 1.b montre la distribution de la magnitude en fonction de la distance des données. Les séismes couvrent une gamme de magnitude M_w entre 3.5 et 6.9 et sont enregistrés à des distances entre 15 et 250 km.

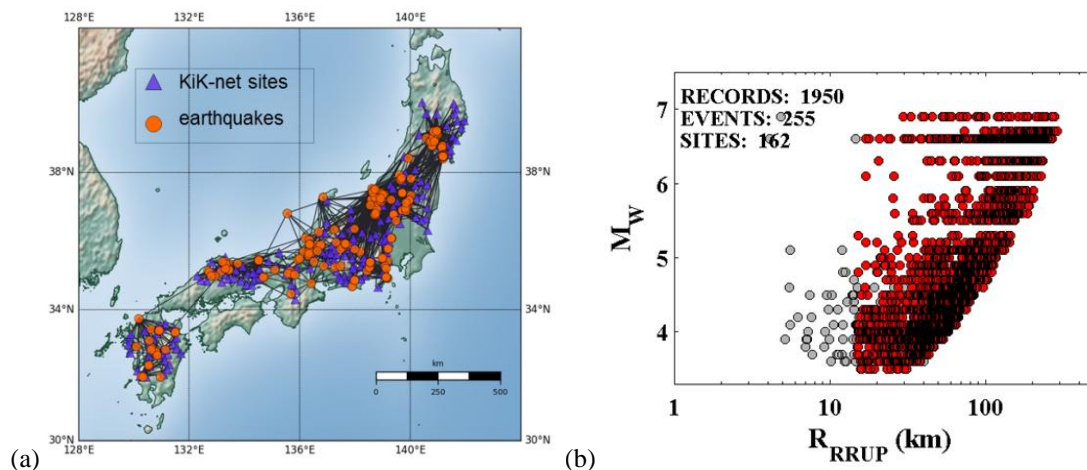


Figure 1.(a) Séismes et stations utilisés dans cette étude ; (b) Distribution des magnitudes de moment M_w et des distances à la rupture R_{RRUP} des enregistrements KiK-net sélectionnés dans cette étude.

4. Paramètres d'entrée et conditions de référence

Dans le processus d'inversion, un système d'équations doit être résolu où les inconnues sont le moment sismique m_{0i} et la fréquence coin f_{ci} de chaque séisme i , le terme de site s_{jk} pour chaque station j et chaque fréquence k et les paramètres d'atténuation Q_0 , α et γ .

Dans le but de construire le modèle de départ, nous donnons en entrée les trois paramètres d'atténuation. Nous fixons $\gamma = 1$ et les deux autres paramètres sont pris dans la littérature : $Q_0 = 81$ et $\alpha = 0.71$ (moyenne des

modèles d'atténuation des quatre polygones correspondant aux séismes crustaux japonais à partir de l'article de Othet *et al.* (2011).

De plus, il est nécessaire d'appliquer une condition de référence, soit sur les moments sismiques ou sur les effets de site, qui sont les deux paramètres constants qui contrôlent l'amplitude du spectre (Andrews, 1986 ; Field & Jacob, 1995). Comme dans Othet *et al.* (2010) et Drouet *et al.* (2011), nous choisissons d'imposer les magnitudes de moment des plus grands séismes ($M_w \geq 5.5$ à partir du catalogue F-Net).

Comme dans Drouet *et al.* (2008, 2010), nous imposons également que la moyenne des logarithmes des effets de site à chaque fréquence k sur la liste de j stations de référence soit nulle :

$$\sum_{j \text{ in list of reference stations}} \log_{10}(S_{jk}) = 0 \quad [8]$$

Pour définir la liste des stations de référence, nous utilisons dans une première étape de l'inversion toutes les stations de surface dans la liste des stations de référence. A partir des résultats obtenus, les stations présentant les amplitudes les plus faibles et les plus plates sont identifiées comme des sites au rocher et gardées dans la liste finales des stations de référence. Dans notre étude, les stations que nous avons gardées sont MYZH09 et NGNH22, qui ont respectivement des valeurs de v_{S30} égales à 973 m/s et 939 m/s. L'inversion finale est ensuite réalisée pour les stations de surface et de profondeur en utilisant ces deux stations de surface comme référence. De plus, dans le but de calculer des effets de site « normalisés », nous normalisons tous les spectres en entrée de l'inversion par un spectre d'amplification générique commun, calculé à partir d'un profil de vitesse avec la profondeur d'un rocher générique (Boore & Joyner, 1997 ; Cotton *et al.*, 2006) avec une v_{S30} de 950 m/s comme rocher de référence dans notre cas.

5. Résultats

5.1. Coefficients d'atténuation et paramètres de source inversés

Les paramètres d'atténuation inversés sont : $Q_0 = 346$, $\alpha = 0.31$ et $\gamma = 1.1$. Ces paramètres peuvent être comparés avec les valeurs de Q_0 et α de Othet *et al.* (2011). Sur la Figure 2, les différents modèles d'atténuation sont représentés en fonction de la distance pour quatre différentes fréquences : 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz et 30 Hz. Nous pouvons voir que pour des distances inférieures à 80 km les amplitudes correspondant au modèle d'atténuation inversé sous-estiment les modèles de Othet *et al.* (2011), tandis qu'à plus grandes distances le modèle inversé surestime les autres, excepté pour $f = 30$ Hz pour laquelle tous les modèles sont presque les mêmes.

Les paramètres de source inversés tels que les magnitudes de moment et les fréquences coin peuvent également être analysés. Pour chaque séisme de la base de données, les magnitudes de moment inversées sont comparées aux magnitudes de moment données par le catalogue F-Net (Figure 3.a). Nous rappelons que nous avons imposé les magnitudes des séismes avec $M_w \geq 5.5$. Les M_w inversées montrent un bon accord avec les M_w F-Net sur toute la gamme de magnitude, proche de la relation 1:1. Sur la Figure 3.b les fréquences coin f_c inversées sont représentées en fonction des magnitudes de moment, avec les relations théoriques pour trois différentes valeurs de chute de contrainte constante : 0.1, 1 et 10 MPa. Nous pouvons observer que ces valeurs sont principalement contenues entre 1 et 10 MPa et les fréquences coin des séismes les plus forts sont assez bien estimées même pour les fréquences en-dessous de la limite inférieure en fréquence (0.3 Hz) de l'inversion.

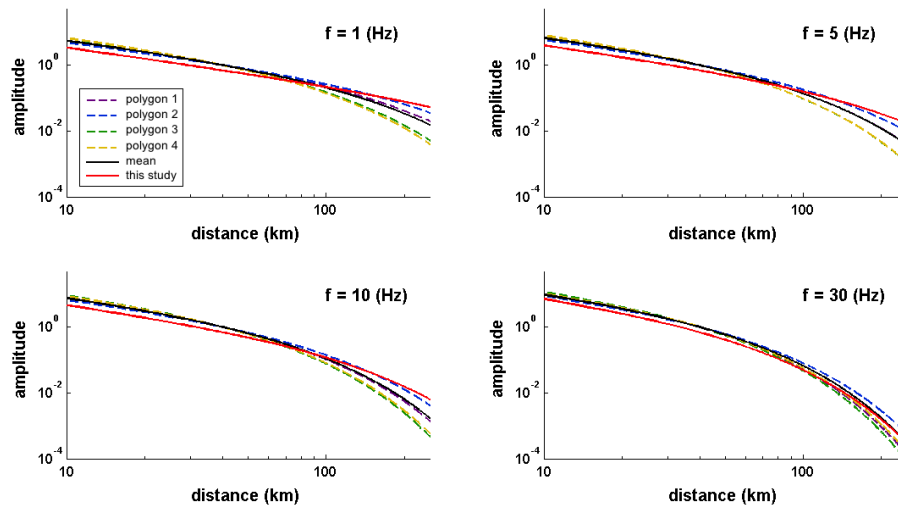


Figure 2. Modèles d'atténuation à partir des valeurs de Q_0 et α de Oth et al. (2011) et des paramètres d'atténuation inversés, pour quatre fréquences différentes (1, 5, 10 et 30 Hz) en fonction de la distance.

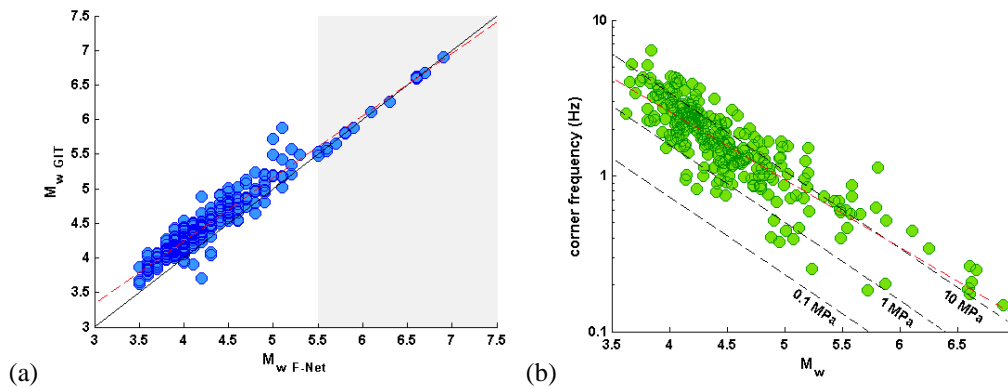


Figure 3. Paramètres de source inversés. (a) Magnitudes de moment en fonction des magnitudes de moment données par le catalogue F-Net. La régression des données est représentée par la ligne rouge discontinuée et la ligne noire correspond à la relation 1 :1. La zone grise montre la limite des magnitudes imposées ($M_w \geq 5.5$) comme condition de référence ; (b) Fréquences coin en fonction des magnitudes de moment.

5.2. Fonctions de transfert de site inversées

Nous déterminons les fonctions de transfert de site pour toutes les stations de surface et de profondeur. Ces fonctions de transfert donnent le niveau d'amplification à différentes fréquences par rapport à la réponse d'un rocher générique commun avec $v_{530} = 950 \text{ m/s}$ comme référence. Nous calculons aussi pour chaque site les rapports entre les fonctions de transfert en surface et en profondeur. La Figure 4. montre un exemple de résultat obtenu pour la station OKYH02 ($v_{530} = 1050 \text{ m/s}$) qui présente une fonction de transfert relativement plate avec de faibles amplitudes et qui peut être considérée comme une station de référence au rocher. Au contraire, la Figure 4.b présente un exemple de site (AICH19, $v_{530} = 587 \text{ m/s}$) caractérisé par un effet de site avec des amplifications plus grandes que 10 dans une large bande de fréquences autour de 10 Hz.

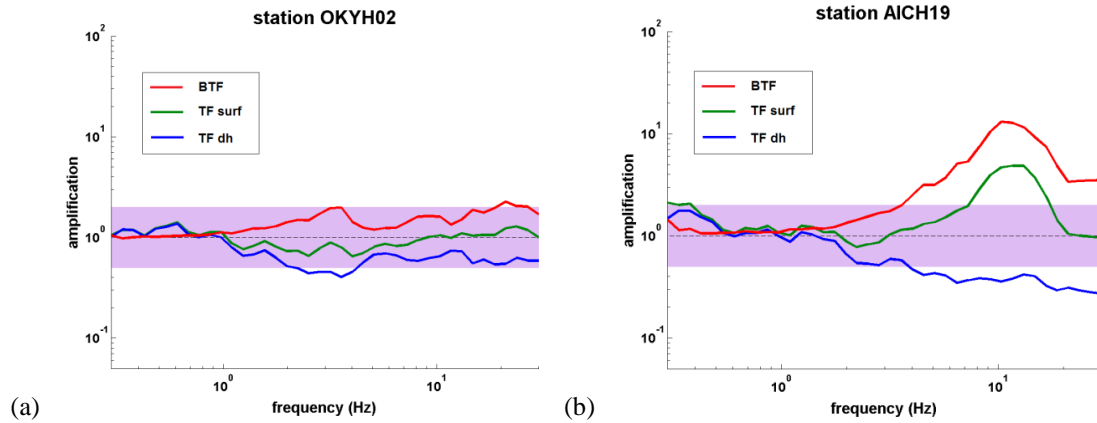


Figure 4. Exemples de fonctions de transfert de site obtenues à partir de l'inversion généralisée en surface (lignes vertes) et en profondeur (lignes bleues) pour (a) OKYH02 et (b) AICH19. Les rapports entre les fonctions de transfert de surface et de profondeur sont représentés avec les lignes rouges. La zone violette correspond aux niveaux d'amplification entre 0.5 et 2 et permet de mettre en valeur l'amplification de site.

La Figure 5.a présente les rapports spectraux moyens obtenus à partir des fonctions de transfert de tous les sites. Nous pouvons observer une large amplification autour de 10 Hz. Cette amplification est aussi observée sur les fonctions de transfert moyennes en surface (Figure 5.b). Pour les fonctions de transfert moyennes en profondeur, nous obtenons des amplitudes beaucoup plus faibles. (Figure 5.c)

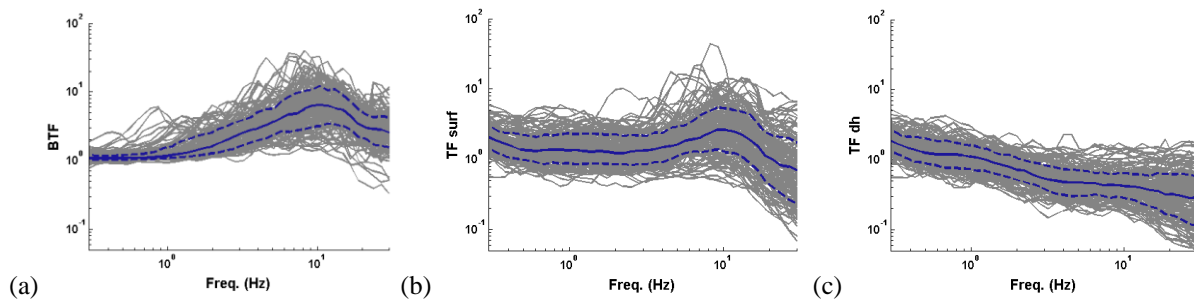


Figure 5. (a) Rapports spectraux moyens obtenus sur tous les sites entre fonctions de transfert en surface (b) et en profondeur (c).

6. Comparaison entre les fonctions de transfert de site obtenues à partir de différentes méthodes

Dans l'étude de Laurendeau *et al.* (2015), à partir de la même base de données initiale, les fonctions de transfert des stations KiK-net ont été estimées à partir de différentes approches : une approche empirique et une approche numérique. Pour cette dernière approche il s'agit de simulations linéaires en ondes SH planes avec un modèle de réflectivité 1D, réalisées à partir des informations géotechniques disponibles (profils de vitesse) et d'hypothèses standards sur l'amortissement. Plusieurs valeurs ont été testées de $Q_S = v_S/10$ à $Q_S = v_S/50$.

Nous pouvons comparer les résultats obtenus à partir des différentes approches en termes de rapports spectraux moyens entre les fonctions de transfert en surface et en profondeur. Les résultats sont présentés sur la Figure 6 avec leurs écarts-types associés. Nous pouvons observer que les moyennes globales des rapports spectraux empiriques et inversés sont en très bon accord sur toute la gamme de fréquences. Les rapports spectraux moyens théoriques sont en bon accord avec les autres méthodes pour les fréquences inférieures à 6 Hz. Dans la gamme de fréquence 6-15 Hz, les simulations sous-estiment les amplifications obtenues à partir des deux autres méthodes, le meilleur accord est obtenu pour $Q_S = v_S/10$ pour lequel la sous-estimation reste modérée. Au-dessus de 15 Hz, la situation est différente. Seule la simulation $Q_S = v_S/50$ semble acceptable en moyenne, tandis que les autres surestiment significativement les autres approches. Cependant, la simulation $Q_S = v_S/50$ est aussi celle qui produit le plus grand écart-type dans cette gamme de fréquences.

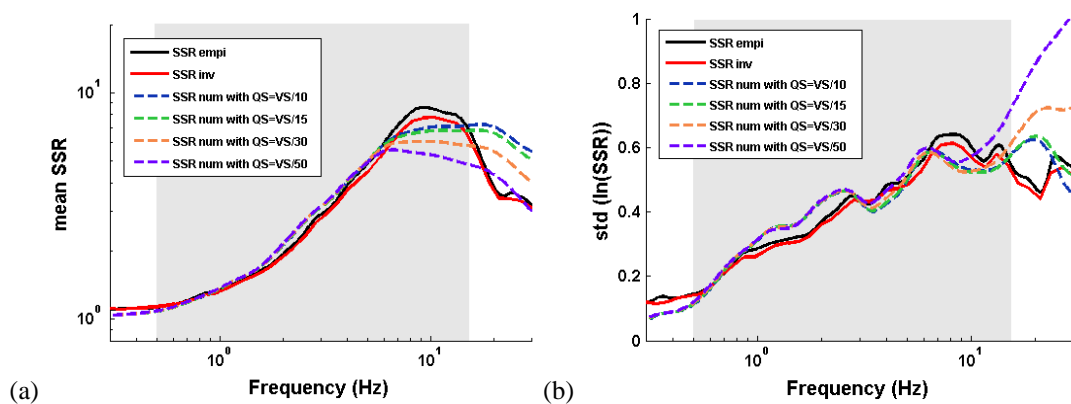


Figure 6.(a) Comparaison des moyennes globales des rapports spectraux et (b) les écarts-types associés obtenus à partir de l'approche empirique (en noir), de l'inversion généralisée (en rouge) et des simulations numériques (lignes discontinues).

7. Discussion à propos de κ_0

A partir des fonctions de transfert de site issues de l'inversion généralisée, nous estimons les valeurs du paramètre de site κ_0 (noté $\kappa_{0,TF}$ selon la nomenclature de Ktenidou *et al.*, 2014). Nous calculons les valeurs de $\kappa_{0,TF}$ par la régression de la partie hautes fréquences des fonctions de transfert ($f \geq 10$ Hz) en échelle lin-log. De la même manière que Anderson & Hough (1984), nous modélisons l'atténuation hautes fréquences par $\exp(-\pi\kappa f)$, cependant dans notre cas, les valeurs de κ sont indépendantes de la distance car la procédure d'inversion prend déjà cela en compte. Les valeurs de $\kappa_{0,TF}$ sont calculées pour toutes les stations de surface et de profondeur. Nous obtenons des valeurs moyennes égales à 0.018 (s) en surface et 0.011 (s) en profondeur, avec des écarts-types associés relativement forts (0.011 s et 0.007 s respectivement).

Dans le but d'étudier une relation potentielle entre les paramètres de site κ_0 et v_S , nous représentons les valeurs de κ_0 obtenues aux stations en surface en fonction de v_{S30} et les valeurs de κ_0 des stations en profondeur en fonction des valeurs de v_S en fond de puits (Figure 7). La régression linéaire des valeurs de κ_0 en surface en fonction de v_{S30} ne montre aucune corrélation, tandis qu'en profondeur nous pouvons observer une décroissance des valeurs de κ_0 avec l'accroissement de v_S en fond de puits.

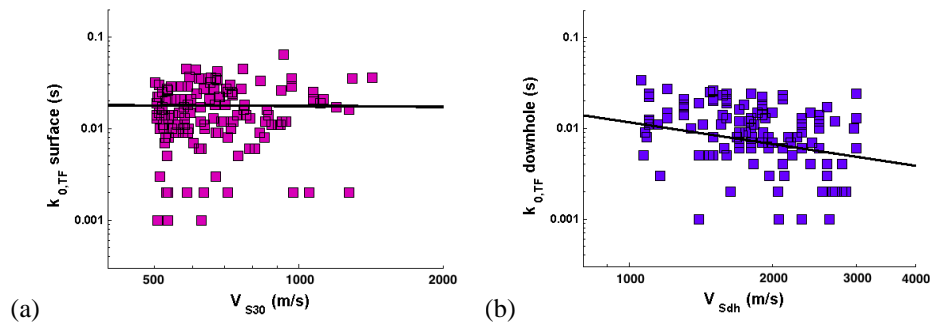


Figure 7. (a) Valeurs de κ_0 en surface en fonction des valeurs de v_{S30} ; (b) Valeurs de κ_0 en profondeur en fonction des valeurs de v_S en fond de puits. Les lignes noires montrent la régression linéaire des données.

8. Conclusion

Dans cette étude, nous avons appliqué la méthodologie d'inversion spectrale paramétrique développée par Drouet et al. (2008, 2010) à une base de données d'accélérographes du réseau japonais KiK-net. Les spectres de Fourier en ondes S de tous les enregistrements ont été inversés simultanément pour séparer les termes de source, de propagation et de site. Pour le processus d'inversion, deux conditions de référence ont été appliquées. Nous avons choisi d'imposer les magnitudes de moment des plus forts séismes ($M_w \geq 5.5$), permettant une estimation robuste des fréquences coin de ces séismes, qui sont probablement plus petites que la limite inférieure en fréquence imposée pour l'inversion (0.3 Hz). Nous avons également imposé une condition de référence sur les termes de site en utilisant comme référence deux stations au rocher (MYZH09 et NGNH22).

Une attention particulière a été portée aux propriétés de site inversées. Nous avons déterminé les fonctions de transfert de site de toutes les stations en surface et en profondeur, donnant le niveau d'amplification à différentes fréquences par rapport à la réponse d'un site en rocher de référence avec $v_{S30} = 950 \text{ m/s}$. Comme montré dans des études précédentes, les amplifications de site est le paramètre le plus stable sortant d'une telle inversion, car elles sont moins sensibles au « trade-off » entre les paramètres (Field & Jacob, 1995 ; Drouet et al. 2008). Nous avons également calculé les rapports spectraux entre les fonctions de transfert en surface et en profondeur. Ces résultats ont été comparés avec les rapports spectraux obtenus aux mêmes sites KiK-net à partir de deux autres approches (empirique et numérique). L'approche empirique et l'inversion généralisée ont produit des résultats très similaires. L'approche numérique, basée sur des simulations linéaires SH-1D, a également produit des résultats similaires aux autres méthodes en-dessous de 6 Hz. Entre 6 et 15 Hz, elle a par contre fournie en moyenne une légère sous-estimation de l'effet de site tandis qu'au-delà de 15 Hz, elle peut fortement surestimer l'amplification. Ces écarts sont probablement dus à une mauvaise paramétrisation de l'atténuation à haute fréquence.

Enfin, nous avons estimé les valeurs du paramètre de site κ_0 par la régression de la partie hautes fréquences des fonctions de transferts de site en surface et en profondeur. Ces valeurs ont été comparées avec les valeurs de v_{S30} et v_S en fond de puits déterminées à partir des mesures géophysiques pour chaque station dans le but d'étudier une relation potentielle entre ces paramètres de site. Nous n'avons trouvé aucune corrélation entre les valeurs de κ_0 en surface et v_{S30} , tandis que nous avons observé une légère décroissance des valeurs de κ_0 en profondeur en fonction de l'accroissement de v_S en fond de puits. Cela peut indiquer que le paramètre de site κ_0 résulte non seulement de la contribution de couches superficielles mais également de structures plus profondes.

9. Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre des programmes de recherche CASHIMA (financé par le CEA, l'ILL et ITER Organisation) et SIGMA (financé par EdF, le CEA, Aréva et Enel).

10. Bibliographie

- Anderson J., Hough S., « A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies », *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 74, 1984, p.1969-1993.
- Andrews D.J., « Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size », in *Earthquake Source Mechanics*, pp.259-267, eds. Das S., Boatwright J., Scholz C.H., *American Geophysical Monograph*, vol. 37, 1986.
- Boore D., Boatwright J., « Average body-wave radiation coefficients », *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 74, 1984, p. 1615-1621.
- Boore D., Joyner W., « Site amplification for generic rock sites », *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 87, 1997, p. 327-341.
- Brune J.N., « Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes », *J. Geophys. Res.*, vol. 75, 1970, p. 4997-5009.
- Cotton F., Scherbaum F., Bommer J., Bungum H., « Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: application to central Europe and rock sites », *J. Seismol.*, vol. 10, 2006, p. 137-156.
- Drouet S., Chevrot S., Cotton F., Souriau A., « Simultaneous inversion of source spectra, attenuation parameters and site responses : application to the data of the french accelerometric network », *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 98, 2008.
- Drouet S., Cotton F., Guéguen P., « vs30, k, regional attenuation and m_w from accelerograms : application to magnitude 3-5 French earthquakes », *Geophys. J. Int.*, vol. 182, 2010, p. 880-898.
- Field E.H., Jacob K.H., « A comparison and test of various site-response estimation techniques, including that are not reference-site dependent », *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 85, 1995, p. 1127-1143.
- Konno K., Ohmachi T. « Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor », *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 88, 1998, p. 228-241.
- Ktenidou O-J., Cotton F., Abrahamson N.A., Anderson J.G., « Taxonomy of k : a review of definitions and estimation approaches targeted to applications », *Seismol. Res. Lett.*, vol. 85, 2014, p. 135-146.
- Laurendeau A., Définitions des mouvements sismiques au rocher, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2013.
- Laurendeau A., Foundotos L., Hollender F., Bard P-Y., Correction of surface records of their site effect before developing GMPE : an alternative approach to get reference incident ground motion (application to KiK-net data), Rapport comité scientifique SIGMA, 2015.
- Okada Y., Kasahara K., Hori S., Obara K., Sekiguchi S., Fujiwara H., Yamamoto A., « Recent progress of seismic observation networks in Japan - Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net », *Earth Planets Space*, vol. 56, 2004.
- Oth A., Bindi D., Parolai S., Di Giacomo D., « Earthquake scaling characteristics and the scale-(in)dependence of seismic energy-to-moment ratio: insights from KiK-net data in Japan », *Geophys. Res. Lett.*, vol. 37, 2010, L19304.
- Oth A., Bindi D., Parolai S., Di Giacomo D., « Spectral analysis of K-NET and KiK-net data in Japan: Part II: on attenuation characteristics, source spectra and site response of borehole and surface stations », *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 101, 2011, p. 667-687.