



HAL
open science

Utilité de l'instrumentation in situ : recommandations et exemples d'application pour l'évaluation des effets de site dans un contexte de sismicité faible à modérée

Vincent Perron, Fabrice Hollender, Pierre-Yves Bard, Céline Gélis, Cédric Guyonnet-Benaize

► **To cite this version:**

Vincent Perron, Fabrice Hollender, Pierre-Yves Bard, Céline Gélis, Cédric Guyonnet-Benaize. Utilité de l'instrumentation in situ : recommandations et exemples d'application pour l'évaluation des effets de site dans un contexte de sismicité faible à modérée . 9ème Colloque National AFPS2015, AFPS / Marne-la-Vallée, Nov 2015, Marne-la-Vallée, France. <insu-01742616>

HAL Id: insu-01742616

<https://insu.hal.science/insu-01742616v1>

Submitted on 25 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.



HAL Authorization

Utilité de l'instrumentation in situ : recommandations et exemples d'application pour l'évaluation des effets de site dans un contexte de sismicité faible à modérée

Site instrumentation usefulness: implementation recommendations and application examples of empirical site effect estimation in low to moderate seismicity context

Vincent Perron* — Fabrice Hollender*,** — Pierre-Yves Bard** — Céline Gélis*** — Cédric Guyonnet-Benaize*

* CEA Cadarache, 13115 St Paul-lez-Durance, vincent.perron2@cea.fr

** Université de Grenoble, ISTERre, BP 53, 38041 Grenoble

*** Berssin, IRSN, BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex

RÉSUMÉ. La mise en place d'une instrumentation in situ permettant l'enregistrement d'événements sismiques est un complément essentiel aux approches d'évaluation des effets de site par simulation numérique. Une telle approche « empirique » permet, par exemple, l'emploi de la méthode site/référence (SSR) pour évaluer la fonction de transfert spécifique au site, ainsi que la mesure à haute fréquence du paramètre « kappa » (κ). Alors que ces approches semblent déjà utilisables dans les régions fortement sismiques (Japon, Grèce...), elles se heurtent souvent à un a priori défavorable pour les régions de sismicité faible à modérée (p. ex. la France métropolitaine) en raison du temps supposé qu'il faudrait pour obtenir un nombre suffisant d'enregistrements de qualité. Le premier objectif de cette étude est d'apporter quelques éléments permettant d'évaluer l'utilité de l'instrumentation des sites, en particulier pour ce qui concerne l'évaluation des effets de site. Un deuxième objectif est de fournir quelques recommandations pour leur mise en place. Cette étude présente les bases de données acquises sur une durée d'environ deux ans sur deux sites du Sud-Est de la France. Un nombre très important d'enregistrements sismiques a été acquis. Pour obtenir de tels résultats, nous recommandons l'emploi de vélocimètres enregistrant en continu. La méthode SSR se montre assez robuste même lorsque l'on sélectionne qu'un nombre limité d'événements. Il est également possible d'évaluer le paramètre κ_0 , alors même que la méthode classique nécessite un bon rapport signal sur bruit jusqu'à haute fréquence. La méthode en déplacement est très encourageante pour approcher la mesure de κ_0 dans les zones les moins sismiques.

ABSTRACT. Implementing an instrumentation that allows to record real seismic events is an essential complement to numerical simulation approaches of site effect assessment. Such "empirical" approaches allow for example to apply the Standard Spectral Ratio (SSR) and to evaluate the high frequencies parameter "kappa" (κ). While these approaches seem readily available in areas of high seismicity (Japan, Greece ...), they are more difficult to implement in areas of low seismicity, as in metropolitan France. The first objective of this study is to provide some elements to evaluate the usefulness of such site instrumentation, especially in the aim of site effect evaluation. A second objective is to give some recommendations for the implementation of instrumentation. This study presents the databases acquired over a period of about two years at two sites in South-Eastern France. A very large number of seismic recordings was acquired. To obtain such results, we recommend the use of velocimeters recording in continuous mode. SSR method is robust even when a limited number of events are available. It is also possible to assess the κ_0 parameter, even though the conventional method requires a good signal to noise ratio up to high frequencies. The displacement method is very encouraging to evaluate κ_0 in less seismic zones.

MOTS-CLÉS : Instrumentation, sismicité faible à modérée, effets de site.

KEYWORDS : instrumentation, low to moderate seismicity, site effect

1. Introduction

Lorsque la configuration géologiques est défavorable (p. ex. remplissages sédimentaires, topographie), les effets de site peuvent amplifier significativement le mouvement du sol. Il est possible de quantifier ces effets de site par des simulations numériques en prenant en compte un scénario sismique donné (source, localisation, magnitude ...) et une description géologique, géophysique et géotechnique détaillée du site. Cependant, ces simulations ne permettent pas à elles seules d'évaluer complètement les effets de site. En effet, les structures géologiques ne peuvent pas être décrites avec la résolution suffisante pour caractériser le mouvement sismique jusqu'à haute fréquence. Il est donc essentiel de compléter les simulations par l'enregistrement de véritables séismes. Cette approche dite « empirique » permet :

- de fournir la fonction de transfert spécifique au site par l'utilisation de la méthode Standard Spectral Ratio (SSR) (Borcherdt, 1970 ; Chávez-García et al., 1990) ;
- d'accéder à un scénario de magnitude plus élevée avec l'emploi de la méthode des fonctions de Green empirique (Hartzell, 1978) ;
- d'évaluer l'atténuation haute fréquence du signal sismique au travers du paramètre « kappa » (Anderson and Hough, 1984 ; Ktenidou *et al.*, 2014) ;
- d'obtenir simultanément la composante de la source, du trajet et du site de chaque événement enregistré sur l'ensemble des stations à l'aide des inversions généralisées (Andrews, 1986 ; Drouet *et al.*, 2008, 2010).

Alors que ces approches semblent déjà utilisables dans les régions fortement sismiques (Japon, Grèce...), où de nombreux enregistrements de bonne qualité peuvent être réalisés dans une période de temps relativement courte, elles se heurtent souvent à un a priori défavorable pour les régions de sismicité faible à modérée, telle que la France métropolitaine, en raison du temps supposé qu'il faudrait pour obtenir un nombre suffisant d'enregistrements de qualité. Le premier objectif de cette étude est d'évaluer la quantité et la qualité des enregistrements qu'il est possible de réaliser sur un site industriel en France métropolitaine dans un intervalle de temps relativement court. Le deuxième objectif est de déterminer la quantité et la qualité de données nécessaires à une utilisation robuste des méthodes empiriques. Le dernier objectif est de fournir quelques recommandations sur le déploiement d'une instrumentation sismique en zone de sismicité faible à modéré. Pour ce faire, les enregistrements sismiques issus de deux sites, que nous nommerons « site A » et « site B », ont été exploités. Ce document ne cherche pas à faire l'inventaire des effets de site constatés sur les sites A et B, mais il fournit des éléments pour l'application de méthode empiriques standard d'évaluation de l'effet de site (SSR et kappa) lorsque le jeu de données à disposition est limité.

2. Site d'étude et bases de données associées

Les sites A et B se situent dans le Sud-Est de la France. Sur le site A, la principale base de données utilisée dans le présent article a été constituée entre février 2012 et juin 2014, avec l'enregistrement de près de 500 événements. Elle est constituée d'enregistrements issus de plusieurs vélocimètres Güralp CMG6-TD et de deux accéléromètres Güralp CMG-5TDE enregistrant en continu. Les événements sismiques ont été extraits des données en continue grâce aux informations tirées des catalogues du CSEM, du RéNaSS et de Géoazur. Pour les analyses du paramètre kappa, deux accéléromètres sur déclenchement ont permis de compléter la base de données de 2000 à 2011. Pour cette étude, nous nous concentrerons exclusivement sur 4 stations : A01, A02, A03 et A04. A01 et A02 sont situés sur un rocher « très dur » au sens des classes de site NEHRP ($V_{S30} = 1700\text{m/s}$) tandis que A03 et A04 se situe sur des sols « raides » ($V_{S30} = 700\text{m/s}$), sujets à des effets de site pour des fréquences dépassant 4 Hz.

Concernant le site B, un seul réseau constitué de plusieurs vélocimètres Güralp CMG6-TD a permis l'enregistrement d'environ 80 événements entre mai 2013 et mai 2015. Pour ce site, nous utiliserons uniquement les enregistrements issus de la station B01, située au rocher.

Afin d'évaluer la qualité des bases de données ainsi obtenues, il est nécessaire d'analyser en détail le rapport signal sur bruit (SNR) à toutes les fréquences. Les Figures 1 et 2 représentent en échelle de couleur le rapport SNR correspondant à chaque événement enregistré aux stations vélocimétriques A02 et B01 respectivement. Les résultats sont représentés en fonction de la distance épacentrale et de la magnitude pour six fréquences distinctes (0,5, 1, 2, 4, 8 et 16 Hz). On remarque tout d'abord que de nombreux séismes qui ont pu être enregistrés sur le site A (et dans une moindre mesure sur le site B) est élevé, et ce malgré une activité industrielle importante qui génère un bruit anthropique. Quelques télé-séismes ont été enregistrés bien que la grande majorité des événements qui constituent la base de données ont des distances épacentrales inférieures à 500 km. Les résultats indiquent que, pour le site A, les événements ayant un bon SNR se concentrent dans la bande de fréquence intermédiaire entre 2 et 8 Hz. A basse fréquence, seuls les séismes de forte magnitude, généralement lointains, parviennent à apporter suffisamment d'énergie. A contrario, seuls les séismes les plus proches autorisent l'obtention d'enregistrements de bonne qualité jusqu'à haute fréquence. Pour ces événements, généralement de faible magnitude, les fréquences coins sont élevées et l'atténuation liée au trajet source-station est limitée. Nous verrons par la suite que le manque de signaux disponibles à basse et haute fréquence a des conséquences pour l'application des méthodes empiriques et principalement pour l'estimation du paramètre κ . On distingue que moins d'événement ont pu être enregistré sur le site B que sur le site A du fait de la position géographique du site B en zone plus faiblement sismique que celui du site A. Cependant, nous le verrons par la suite, les séismes compris entre 100 et 1000 km apportent suffisamment d'énergie pour que cette base de données soit exploitable pour l'application de la méthode SSR.

La Figure 3 apporte des éléments de comparaison entre un vélocimètre et un accéléromètre. Pour ce faire, le nombre de séismes enregistrés par chacun des instruments sur la même période de temps alors qu'ils étaient co-localisés, est comparé pour 4 gammes de SNR ($SNR < 3$, $3 \leq SNR < 10$, $10 \leq SNR < 50$ et $50 \leq SNR$). Les résultats montrent des différences majeures puisque l'utilisation d'un vélocimètre permet l'enregistrement d'un beaucoup plus grand nombre d'événements (parfois jusqu'à 50 fois plus pour l'intervalle de critère SNR compris entre 10 et 50) et ceux principalement dans la bande de fréquence allant de 0 à 17 Hz. Au-delà de 15 Hz les écarts entre les deux types d'instruments s'amenuisent jusqu'à ce qu'il n'y ai plus aucune différence à hautes fréquences.

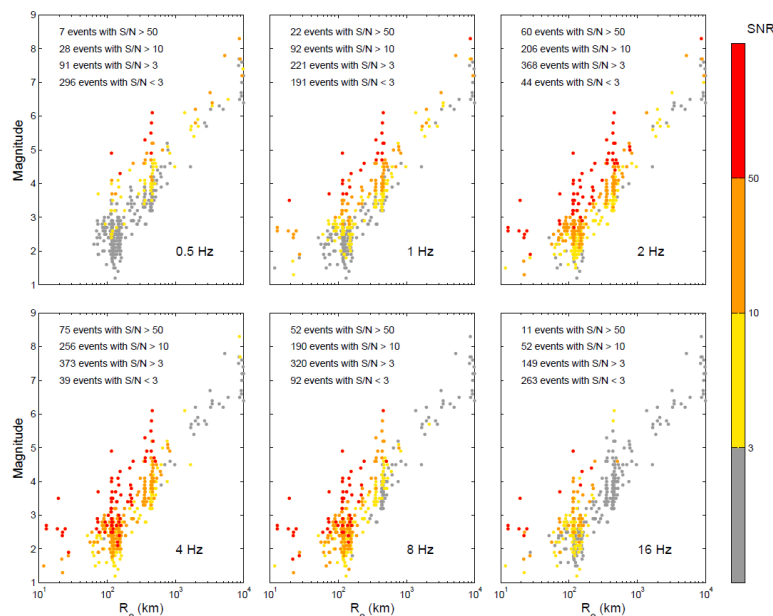


Figure 1. Rapport signal sur bruit (échelle de couleur) donné en fonction de la magnitude et de la distance épacentrale à 6 fréquences (0,5, 1, 2, 4, 8 et 16 Hz) pour la station vélocimétrique A02.

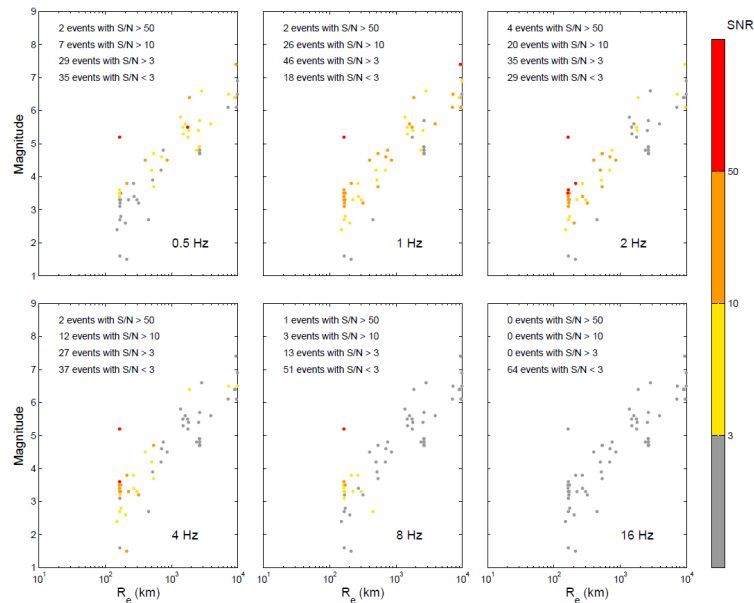


Figure 2. Rapport signal sur bruit (échelle de couleur) donné en fonction de la magnitude et de la distance épacentrale à 6 fréquences (0,5, 1, 2, 4, 8 et 16 Hz) pour la station vélocimétrique B01.

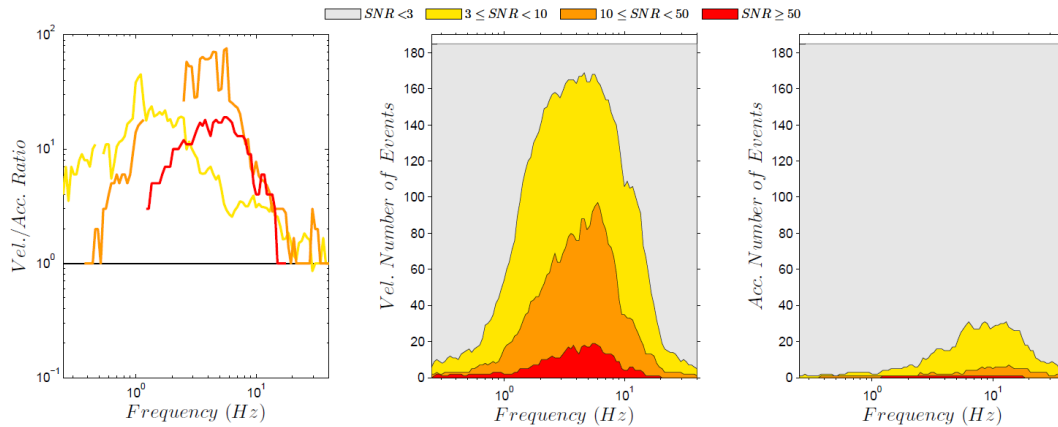


Figure 3. Comparaison entre un accéléromètre (figure de droite) et un vélocimètre (figure au centre) en termes de nombre d'événements enregistrés en fonction de la fréquence et pour 4 gammes de rapport signal-sur-bruit ($SNR < 3$, $3 \leq SNR < 10$, $10 \leq SNR < 50$ et $50 \leq SNR$). Les deux instruments ont enregistré pendant la même période en co-localisation sur le site rocher A02. La figure de gauche montre le rapport du nombre d'événement enregistré par le vélocimètre sur celui obtenu par l'accéléromètre.

Bien que l'emploi d'accéléromètres se justifie parfaitement pour l'enregistrement des mouvements forts, ce résultat est très démonstratif de l'intérêt d'utiliser des vélocimètres dans le contexte de zone à sismicité faible à modérée afin de pouvoir caractériser les effets de site (linéaires) de façon empirique avec suffisamment d'événements de bonne qualité et dans un intervalle de temps suffisamment court.

3. Evaluations empiriques des effets de site : exemples d'applications et dépendance des méthodes

3.1. SSR

La Figure 3 est un premier exemple d'utilisation de ces données empiriques pour la caractérisation des effets de site par la méthode « site sur référence » (SSR). Cette méthode consiste à effectuer le rapport des spectres évalués depuis le signal sismique complet entre une station située sur le site que l'on cherche à étudier et une seconde station qui sert de référence et pour laquelle on fait l'hypothèse qu'elle n'est pas sujette aux effets de sites. Les fonctions de transfert des sites A02, A03 et A04 ont ainsi pu être établis pour la moyenne quadratique des composantes horizontales et pour la composante verticale de façon relative à la station A01 qui sert de référence. Il est intéressant de noter la grande quantité de données utilisables par cette méthode ainsi que la faible dispersion des résultats autour de la médiane. Un effet de site est visible à hautes fréquences sur la station A02, pourtant située sur un rocher dur proche de celui présent à la station A01. Cela illustre la difficulté inhérente au choix des stations de référence (la station A02 présente une couche superficielle plus altérée que la station A01). On notera également une plus grande dispersion des résultats au niveau du pic d'amplification aux alentours de 3 - 20 Hz pour les sites sédimentaires A03 et A04. Cette dispersion se caractérise essentiellement par des valeurs supérieures à la valeur médiane lors de certains événements. Pour simplifier la lecture des résultats, dans la suite de ce travail nous ne nous intéresserons plus qu'à la moyenne quadratique des composantes horizontales.

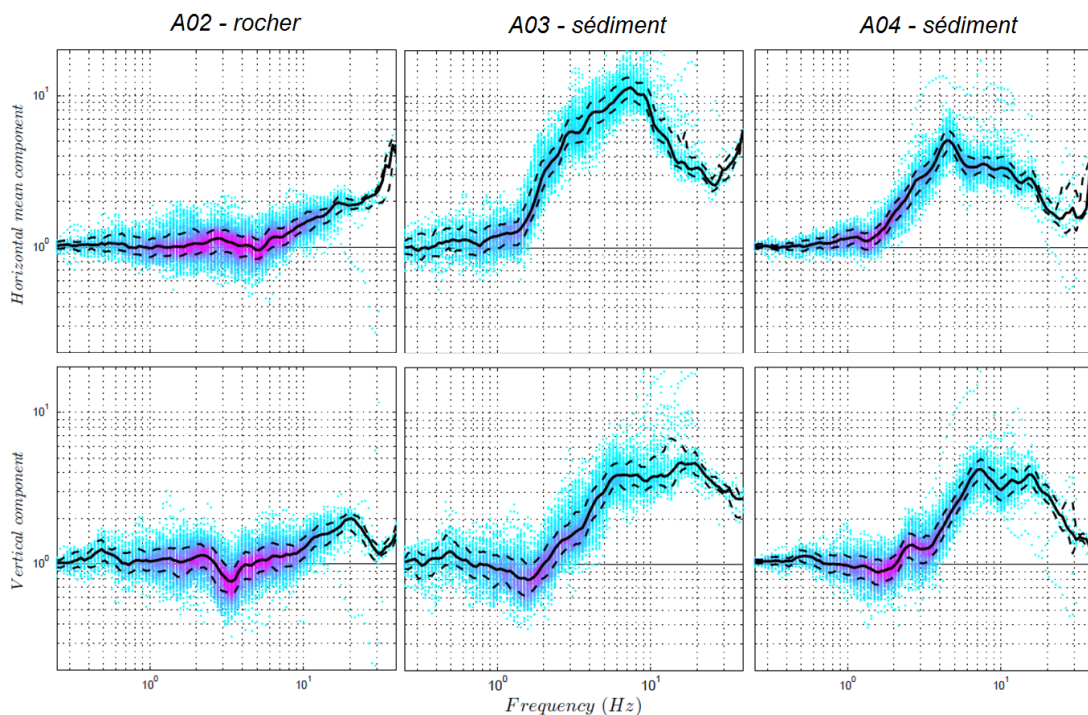


Figure 4. Exemple d'estimation de SSR sur la station au rocher A02 (à gauche) et sur les stations sédimentaires A03 (au centre) et A04 (à droite) avec comme référence la station au rocher A01. L'échelle de couleur du bleu au rose est proportionnelle à la densité de point. La ligne noire représente la médiane et les deux lignes pointillées marquent les percentiles 16 et 84%. Les figures du haut représentent les moyennes quadratiques des composantes horizontales tandis que celles du bas montrent les composantes verticales pour chacun des sites.

Si un grand nombre de séismes a pu être utilisé pour réaliser l'analyse SSR présentée Figure 4, une question opérationnelle se pose quant au nombre minimum de séismes nécessaires pour obtenir une évaluation fiable de l'amplification empirique déterminée par méthode SSR. En première analyse, la Figure 4 semble montrer que les valeurs de SSR sont distribuées selon une loi log-normale. Ceci a des implications fortes puisque si la loi de distribution est connue, alors le comportement de la moyenne peut être anticipé à l'aide de l'intervalle de confiance I_c . Pour un intervalle de confiance de 95 %, celui-ci est défini comme l'intervalle dans lequel la moyenne, si elle est estimée depuis un nombre infini d'échantillon, a 95 % de chance d'être contenue à l'intérieur de celui-ci. Ce paramètre se formule comme suit :

$$I_c = \left(\bar{x} - t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}} ; \bar{x} + t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad [5]$$

avec \bar{x} l'espérance, s l'écart-type et n la taille de l'échantillon. t_α correspond au coefficient de confiance qui vaut 1.96 pour un intervalle de confiance de 95 %.

L'influence de la fréquence et du nombre d'événements utilisés sur le calcul des SSR moyen est traitée dans la suite de ce travail et est comparée avec les résultats prédits par l'intervalle de confiance. Seuls les résultats tirés des calculs de SSR entre la station A03 et A01 seront présentés ici pour plus de commodité et parce que ce couple de stations est celui qui dispose de la plus grande période d'enregistrement commune. Cependant, les résultats issus des autres stations présentent des comportements identiques. Pour chaque fréquence, seuls les événements pour lesquels le critère $SNR > 3$ est respecté ont été utilisés dans le calcul de la moyenne. Cela implique que le nombre total d'événements disponibles varie avec la fréquence. Chaque fréquence possède donc sa propre statistique que l'on peut décrire à l'aide du nombre total d'événements disponibles, du coefficient de variation (écart type relatif) et de la valeur du SSR individuel présentant l'écart relatif maximum.

La Figure 5 (a) montre un exemple de distribution des résultats SSR à 2 Hz. On confirme ici le bon accord de la loi log-normale avec les données. L'intervalle de confiance très resserré autour de la moyenne indique également que la moyenne est très bien contrainte lorsqu'on utilise l'ensemble des 311 événements disponibles à cette fréquence.

La Figure 5 (b) teste l'influence, à la fréquence 2 Hz, du nombre de séismes utilisés sur la robustesse des rapports SSR calculés. Pour chaque valeur du nombre d'événements allant de 2 à 100, 500 tirages aléatoires ont été réalisés (approche « bootstrap ») donnant accès, à chaque fois, à 500 évaluations de la moyenne (on parlera ici de « moyennes ré-échantillonnées »). L'écart relatif entre ces moyennes ré-échantillonnées et la moyenne calculée avec l'ensemble des événements (on parlera de « moyenne totale ») est représenté par les courbes grisées. Un premier résultat attendu est que les écarts relatifs sur le calcul de la moyenne augmentent lorsque le nombre d'événement utilisé diminue. On observe également un fort amortissement de cette décroissance, ce qui montre qu'au-delà de 50 événements, le gain apporté dans l'estimation de la moyenne par chaque événement supplémentaire devient minime. De plus, le percentile 95 % (courbe bleue marine) obtenu depuis les 500 SSR « ré-échantillonnés » montre un très bon accord avec la valeur prédite par l'intervalle de confiance de 95 % (courbe verte).

La Figure 5 (c) fournit l'évolution, cette fois en fonction de la fréquence, de la robustesse du calcul de la moyenne ré-échantillonnée à partir de 15 événements tirés aléatoirement 500 fois. Ces valeurs moyennes ré-échantillonnées ont ensuite été divisées par la moyenne totale. L'écart à la valeur unité du rapport ainsi obtenu caractérise la variabilité du SSR moyen en fonction de la fréquence. La courbe grisée extérieure indique les variations du coefficient de variation, estimé depuis l'ensemble des données à chacune des fréquences. On peut déjà remarquer trois pics, le premier aux alentours de 2 Hz, le second entre 10 et 20 Hz et le dernier proche de 25 Hz. Ces pics sont liés aux valeurs de SSR hautes qui s'écartent de la tendance générale et qui ont déjà été observées sur la Figure 4. Comme le prédit l'intervalle de confiance, on constate une très bonne correspondance entre la forme du coefficient de variation et l'amplitude de la dispersion des moyennes ré-échantillonnées. On

observe également un bon accord entre les percentiles 5 % et 95 % et les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance.

La Figure 5 (d) présente, toujours à partir de 500 tirages aléatoires de 15 événements, la variabilité de l'intervalle de confiance 95 % ré-échantillonné. Celui-ci est estimé à partir des valeurs d'écart-type obtenues à chaque tirage et pour un nombre d'échantillon n fixé à 15. On constate que la moyenne suit bien le tracé de l'intervalle de confiance estimé depuis l'ensemble des événements et que le percentile 95 % reste bien inférieur à la valeur unité. Cela signifie que dans 95 % des cas on a bien l'assurance que le SSR moyen « exact » est compris dans l'intervalle de confiance 95 % calculé localement à partir d'un ensemble de 15 événements seulement.

En conclusion, le bon accord des résultats avec l'intervalle de confiance valide l'hypothèse d'une loi log-normale de distribution des résultats SSR. Quel que soit la station du site A étudié, le calcul de la moyenne à partir de 30 événements permet l'estimation du SSR avec, en moyenne, moins de 5 % d'écart relatif et dans 95 % des cas moins de 10 % d'écart relatif avec le SSR moyen obtenu depuis l'ensemble des événements. Ce nombre de 30 événements permet également à la moyenne de converger de façon optimale puisqu'il correspond au début de la phase asymptotique. 15 événements représentent la valeur limite inférieure en-dessous de laquelle le critère de l'intervalle de confiance ne fonctionne plus systématiquement. Dès 15 événements à disposition on peut avoir une idée précise de l'intervalle dans lequel le SSR moyen qu'on obtiendrait avec une infinité d'échantillon a une probabilité p de se trouver.

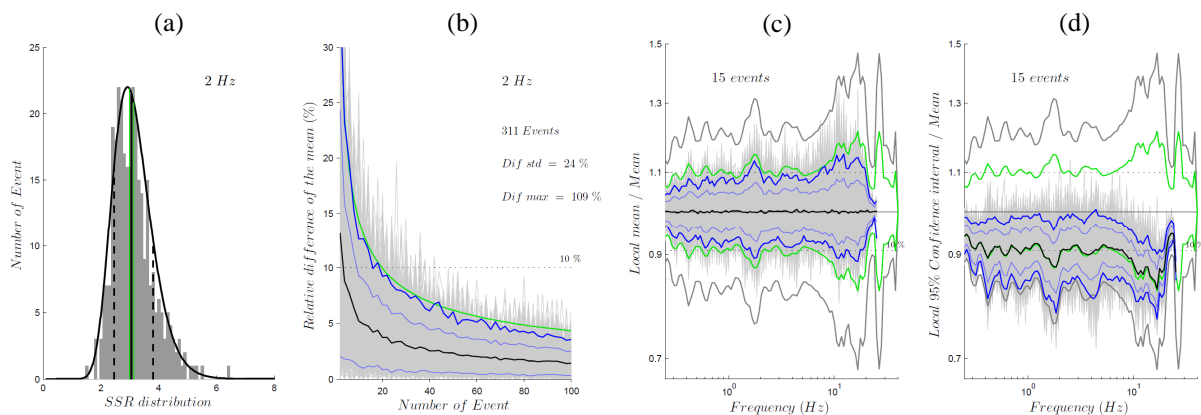


Figure 5. Influence du nombre d'événements disponibles sur la robustesse de l'évaluation du SSR moyen entre les sites A03 et A01. **a.** Distribution des valeurs des SSR individuels à 2 Hz, ainsi que la fonction de distribution log-normale correspondante. La courbe pleine et les courbes pointillées représentent respectivement la moyenne et l'écart type alors que les deux lignes vertes fournissent pour la moyenne l'intervalle de confiance log-normal de 95 %. **b.** Différence relative entre 500 tirages aléatoires de moyennes ré-échantillonnées calculées depuis un nombre d'enregistrement allant de 2 à 100 et la moyenne totale déterminée depuis l'ensemble des 311 événements (à 2 Hz). **c.** Rapport entre 500 tirages de moyennes ré-échantillonnées avec 15 événements et la moyenne totale pour l'ensemble des fréquences. La courbe grisée extérieure représente le coefficient de variation calculé pour l'ensemble des données. **d.** Résultats relatifs de 500 tirages aléatoires de la borne inférieure de l'intervalle de confiance ré-échantillonné estimé avec 15 événements. Sur les figures (b), (c) et (d), les courbes noires, bleues claires et bleues marines représentent respectivement la moyenne, l'écart-type et le percentile 95 % issus des valeurs obtenues après 500 tirages aléatoires tandis que la courbe verte représente l'intervalle de confiance 95 % estimé depuis l'écart-type déterminé sur l'ensemble des données disponibles.

3.2 Kappa

Outre les estimations d'effet de site par les méthodes de rapports spectraux, le paramètre κ_0 est un paramètre important car il décrit le contenu haute fréquence du mouvement sismique. Ce paramètre fut introduit initialement par Anderson and Hough (1984). Aujourd'hui, il est utilisé pour les ajustements host-to-target (Campbell, 2003, 2004 ; Delavaud *et al.*, 2012), ou bien même directement dans la forme fonctionnelle des GMPEs (Anderson *et al.*, 1996 ; Laurendeau *et al.*, 2013) et dans de nombreuses autres applications en lien avec l'aléa sismique.

Ce paramètre, quand il est mesuré par la méthode classique en accélération d'Anderson and Hough (1984), nécessite beaucoup d'enregistrements de bonne qualité et de magnitude suffisante (typiquement $M > 3$). Effectuer une mesure de ce paramètre dans un contexte de sismicité faible à modérée représente donc un défi. Une autre méthode proposée par Biasi and Smith (2001) permet de mesurer $\kappa_{0,DS}$ sur le spectre en déplacement à plus basse fréquence à partir de séismes locaux, cette fois-ci de petite magnitude (typiquement $M < 2$). La raison de ces limitations dans l'intervalle de magnitude utilisable par chacune des méthodes se trouve dans la fréquence coin. La mesure de $\kappa_{r,AS}$ s'effectue au-delà de la fréquence coin tandis que celle de $\kappa_{r,DS}$ s'effectue en deçà. Dans le premier cas, cela permet de se placer au niveau du plateau du spectre en accélération de la source et dans le deuxième cas, dans celui en déplacement de sorte que l'influence de la source soit considérée négligeable.

La Figure 6 présente un exemple de mesure individuel de $\kappa_{r,DS}$ et de $\kappa_{r,AS}$ pour un même événement. Pour chacune des deux méthodes une procédure semi-automatique a été développée afin de déterminer la pente de régression présentant le meilleur coefficient de détermination. Pour ce faire, toutes les combinaisons de pente réalisables entre deux intervalles de fréquences sélectionnés manuellement, larges de 2 Hz et écartés d'au moins 5 Hz, sont réalisées. Cela permet également d'avoir accès à une valeur d'incertitude pour chaque évaluation de κ , fournissant ainsi les barres d'erreurs visibles sur la Figure 7.

κ a été évalué sur 3 sites A01, A02 et A03 pour lesquels la base de données disponible est la plus fournie. La Figure 7 présente les résultats obtenus sur chacun des sites, les deux colonnes font coïncider les résultats issus des deux différentes méthodes introduites précédemment. Sur chacune des figures, les mesures individuelles de κ sont représentées par des cercles dont le diamètre est proportionnel à la magnitude et dont la couleur fournit le back-azimut de l'événement correspondant. Si l'on s'intéresse tout d'abord à la méthode κ_{AS} , les deux résultats au rocher (A01 et A02) montrent des similitudes tant au niveau des κ_0 obtenus qu'au niveau des pentes de régression avec la distance épacentrale même si celles-ci diffèrent légèrement. Cela est cohérent puisque ces deux sites sont situés à proximité sur un rocher analogue. La valeur 30 ms obtenue pour le $\kappa_{0,AS}$ rocher est élevée en comparaison des valeurs communément proposées dans la littérature pour les corrélations $V_{S30} - \kappa_0$ (Drouet, 2010 ; Van Houtte, 2011). Cette valeur est cependant en accord avec les résultats obtenus par Douglas *et al.* (2010) dans les Alpes. Plus surprenant encore, pour le site sédimentaire pourtant supposé plus atténuant, une valeur similaire de κ_0 est de nouveau obtenue. Cependant, l'effet de site prépondérant au-dessus de 2 Hz vient perturber la mesure de κ et permet d'expliquer qu'une apparente ressemblance puisse survenir. Une telle perturbation a déjà été constatée par Ktenidou *et al.* (2013). Il n'existe actuellement pas de méthode permettant de séparer complètement l'amplification du site de son atténuation. Les deux phénomènes sont intrinsèquement mélangés, y compris dans les rapports SSR entre deux stations.

Un premier résultat attendu est que le nombre d'événements utilisables avec la méthode en déplacement est plus important que celui avec la méthode en accélération. Cela est d'autant plus vrai que la méthodologie d'extraction des événements à partir des catalogues nationaux impose une limite inférieure aux magnitudes que nous avons pu exploiter. Les très nombreux événements locaux de très petite magnitude (< 1.5) qui ne sont pas répertoriés dans les catalogues n'ont pas pu être traités alors même que ceux-ci sont particulièrement adaptés à l'application de cette méthode. Le second résultat attendu est que, de façon générale, la méthode en déplacement fournit des valeurs de κ supérieures à celles obtenues pour la méthode en accélération, même lorsque les deux méthodes sont appliquées sur les mêmes enregistrements (Ktenidou *et al.* 2014 ; 2015). Ensuite, les barres d'erreur de chaque évaluation individuelle de $\kappa_{r,DS}$ sont plus grandes que celle de $\kappa_{r,AS}$. On peut remarquer

également que les pentes de régressions de κ_{r_DS} en fonction de la distance épacentrale sont plus de deux fois plus raide que celles obtenues avec la méthode en accélération. D'après la définition originale d'Anderson and Hough (1984), κ est supposé être indépendant de la fréquence. Or comme le facteur de qualité Q régional, qui est lié à l'atténuation, est souvent considéré et mesuré comme dépendant de la fréquence, l'hypothèse faite pour κ fait encore l'objet d'une controverse. Le paramètre Q est supposé augmenter avec la fréquence. Or, la méthode κ_{DS} s'applique justement à plus basse fréquence que la méthode κ_{AS} . Cette différence dans la bande de fréquence à laquelle κ est mesuré pourrait expliquer les différences de pentes observées entre les deux méthodes. Les résultats entre les deux stations au rocher ne coïncident pas parfaitement. La pente sur A01 semble trop forte ce qui induit une valeur de κ_{0_DS} plus petite que sur A02 et même plus petite que le résultat κ_{0_AS} de A01. La valeur de κ_0 peut-être approximée par les κ_r individuels des événements les plus proches (< 40 km). Ceux-ci montrent bien que la valeur de κ_{0_DS} sur A01 est bien du même ordre de grandeur que celle estimée sur A02 et est bien supérieure à κ_{0_AS} . La différence réside donc dans les événements situés à grande distance épacentrale et qui présentent des κ_{r_DS} excessivement grands. Sur A03, la pente est du même ordre de grandeur que celle mesurée sur A02. La valeur de κ_{0_DS} est, cette fois, bien supérieure à celle estimée sur les sites au rocher. Ce résultat doit néanmoins être considéré avec précaution car l'influence de l'effet de site est majeure et vient complètement perturber les mesures.

On peut donc conclure que la méthode en déplacement apparaît être un bon proxy de la méthode de référence en accélération si toutes les précautions sont prises lors de l'acquisition et dans l'interprétation des résultats qui en sont déduits. La méthode en déplacement présente l'avantage de pouvoir être mise en œuvre même dans les zones de faible sismicité et ce d'autant plus si une procédure efficace de récupération des petits événements depuis les enregistrements en continu est mise en place.

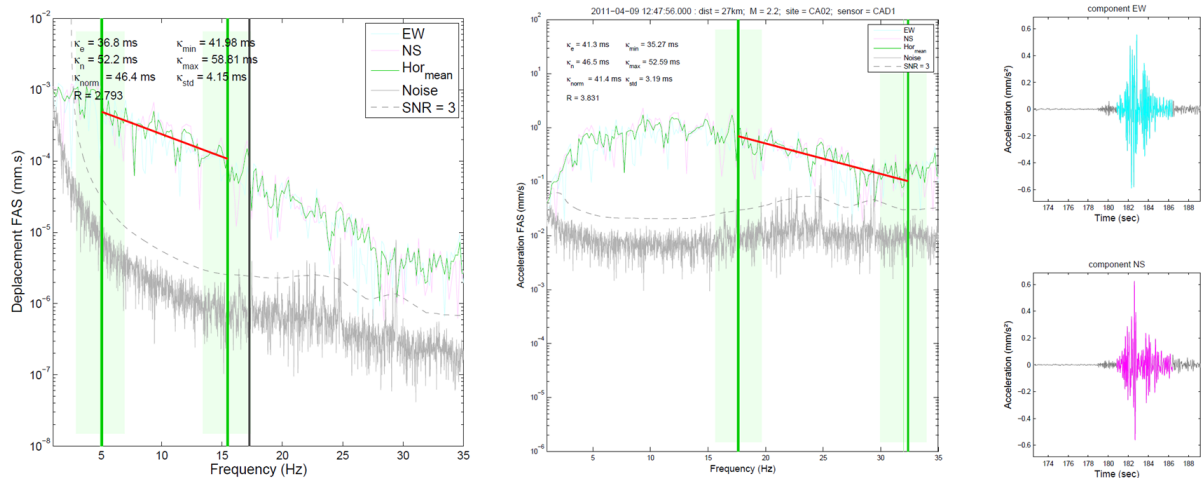


Figure 6. Exemple d'évaluation de κ_{r_DS} (figure de gauche) and κ_{r_AS} (figure centrale) sur un enregistrement au niveau du site A02. Sur ces deux figures, les amplitudes des spectres de Fourier (FAS) des composantes horizontales du bruit et des ondes S sont représentées respectivement en gris et en vert. Les deux figures de droite illustrent, pour chacune des composantes horizontales, les fenêtres temporelles correspondant aux ondes S utilisées pour calculer les spectres.

4. Conclusions

L'instrumentation sismique permet l'enregistrement de nombreux événements et ce même dans les zones à sismicité faible. Toutefois, afin de bénéficier rapidement d'un nombre suffisant de séismes, nous recommandons fortement l'emploi de vélocimètres large-bande enregistrant en mode continu.

Les résultats issus de la méthode SSR sont robustes et suivent une loi de distribution log-normale ce qui permet d'anticiper l'intervalle de variation de la moyenne. Une quantité limitée à seulement 15 événements suffit à l'application de cette méthode. L'évaluation du paramètre kappa depuis les spectres en déplacement, même si elle doit être faite avec précaution, semble être un bon proxy des valeurs obtenues par la méthode classique en accélération. Cette approche permet d'envisager l'approximation de ce paramètre même dans les zones de faible sismicité.

Les méthodes empiriques d'évaluation de l'effet de site sont applicables après un temps d'acquisition relativement court (de moins de un mois à un an) qui est fonction de la sismicité du site et de la bande de fréquence à étudier. Cela permet d'envisager l'emploi de ses méthodes par anticipation à un projet d'aménagement.

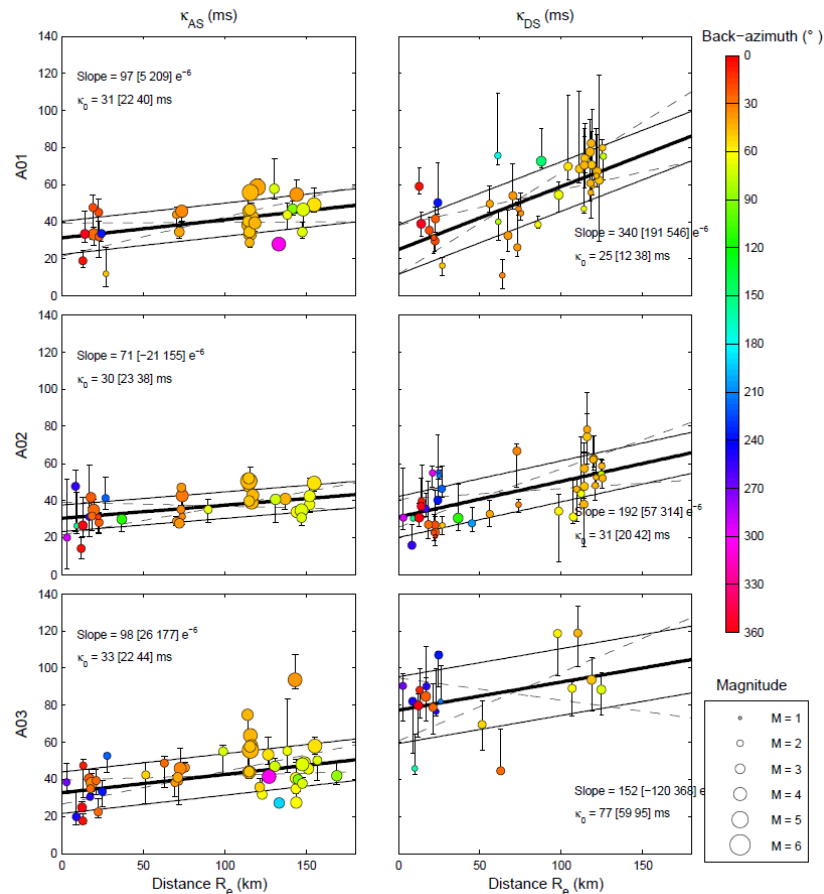


Figure 7. Estimation du paramètre kappa sur les stations A01, A02 et A03 depuis les spectres en accélération selon la méthode κ_{AS} d'Anderson and Hough (1984) et depuis les spectres en déplacement selon la méthode κ_{DS} proposée par Biasi and Smith (2001). Pour chaque résultat, la composante de site κ_0 est extrapolée par une régression linéaire pondérée.

5. 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).

6. Bibliographie

- Anderson J. G., Hough S. E., « A Model for the Shape of the Fourier Amplitude Spectrum of Acceleration at High Frequencies », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 74, n° 5, 1984, p. 1969-1993.
- Anderson J. G., Lee Y., Zeng Y., Day S., « Control of strong motion by the upper 30 meters », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 86, 1996, p. 1749-1759.
- Andrews, D. J., « Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size », *Earthquake Source Mechanics*, vol. 5, 1978, p. 1-4.
- Biasi, G. P., Smith K. D., Site Effects for Seismic Monitoring Stations in the Vicinity of Yucca Mountain, Nevada, a report prepared for the US DOE/ University and Community College System of Nevada (UCCSN) Cooperative Agreement.
- Borcherdt R. D., « Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 60, 1970, p. 29-61.
- Campbell, K. W., « Prediction of strong ground motion using the hybrid empirical method and its use in the development of ground-motion (attenuation) relations in eastern North America », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 93(3), 2003, p. 1012–1033.
- Chávez-García, F.-J., Pedotti G., Hatzfeld D., Bard, P.-Y., « An experimental study of site effects near Thessaloniki (northern Greece) », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 80, 1990, p. 784–806.
- Delavaud E., Cotton, F., Akkar S., Scherbaum F., Danciu L., Beauval C., Drouet S., Basili R., Abdullah Sandikkaya M., Segou M., Faccioli E., Theodoulidis N., « Towards a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe », *Journal of Seismology*, vol. 16, 2012, p. 451-473.
- Douglas, J., Gehl, P., Bonilla, L. F., Gélis, C. « A κ Model for Mainland France. Pure and Applied Geophysics », vol. 167(11), 2010, p. 1303–1315
- 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 », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 98, 2008, p. 198–219.
- Drouet, S., Cotton F., Guéguen P., « V_{S30} , κ , Regional Attenuation and Mw from Accelerograms: Application to Magnitude 3-5 French Earthquakes: v_{S30} , κ , Attenuation and Mw from Accelerograms », *Geophysical Journal International*, vol. 182, n° 2, 2010, p. 1969-1993.
- Hartzell S. H., « Earthquake aftershocks as Green's functions », *Geophysical Research Letters*, vol. 5, 1978, p. 1-4.
- Ktenidou, O.-J., Cotton F., Abrahamson N. A., Anderson J. G., « Taxonomy of Kappa: A Review of Definitions and Estimation Approaches Targeted to Applications », *Seismological Research Letters*, vol. 85, n° 1, 2014, p. 135-146.
- Ktenidou, O.-J., Gelis, C., & Bonilla, L.-F., A Study on the Variability of Kappa in a Borehole: Implications of the Computation Process. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 103(2A), 2013, p. 1048–1068.
- Laurendeau, A., Cotton F., Ktenidou, O.-J., Bonilla, L.-F., Hollender, F., « Rock and Stiff-Soil Site Amplification: Dependency on VS30 and Kappa (K0) », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 103(6), 2013, p. 3131–3148.
- Van Houtte, C., Drouet, S., Cotton, F., « Analysis of the Origins of K (Kappa) to Compute Hard Rock to Rock Adjustment Factors for GMPEs », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 101(6), 2011, p. 2926–2941.