

IRSNINSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE*Faire avancer la sûreté nucléaire*

Influence de la variabilité du milieu et de la sollicitation sismique sur l'évaluation des effets de site - Rapport final

RT/PRP-DGE/2013-00004

Pôle radioprotection, environnement, déchets
et crise

Service de Caractérisation des Aléas Naturels



Demandeur	GIS-RAP
Référence de la demande	30000072 / 0010
Numéro de la fiche programme	A1-SA3 - Etude des effets de site
Processus de rattachement	R4

**Influence de la variabilité du milieu et de la sollicitation
sismique sur l'évaluation des effets de site**

Rapport final

C. Gélis¹, F. Lopez-Caballero², J. Régnier³ et L.F. Bonilla⁴

1 : PRP-DGE/SCAN/BERSSIN

2 : Ecole Centrale Paris

3 : CETE Méditerranée

4 : IFSTTAR Paris

Rapport PRP-DGE n° 2013-00004

	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur(s)	Vérificateur	Chef du PRP-DGE/SCAN	Directeur du PRP-DGE	Directeur Général Adjoint *
Noms	C. GELIS	D. BAUMONT	V. REBOUR	F. BESNUS	J. JOLY
Dates					
Signatures					

DIFFUSION : Libre Interne Limitée

*si nécessaire

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Auteur	Pages ou paragraphes modifiés	Description ou commentaires

LISTE DE DIFFUSION

Nom	Organisme

RESUME

LE MOUVEMENT SISMIQUE ENREGISTRÉ EN SURFACE PEUT ÊTRE SIGNIFICATIVEMENT MODIFIÉ PAR LES CONDITIONS LOCALES DE SITE ET PAR LA SOLlicitATION SISMIQUE INCIDENTE. DANS LE CADRE DE LA PREDICTION DU MOUVEMENT SISMIQUE VIA DES MODELISATIONS NUMERIQUES, LES INCERTITUDES SUR LES PARAMETRES D'ENTREE DOIVENT ÊTRE PRISES EN COMPTE AFIN QUANTIFIER DE FAÇON ROBUSTE LEUR INFLUENCE. DANS CETTE ETUDE, NOUS EXPLORONS LA VARIABILITE DU MOUVEMENT SISMIQUE EN SURFACE EN FONCTION DE :

- LA VARIABILITE DE LA SOLlicitATION SISMIQUE PUISQUE 57 ACCELEROGRAMMES DIFFERENTS SONT UTILISES COMME SOLlicitATION SISMIQUE (VARIABILITE DE L'ACCELERATION MAXIMALE, DU CONTENU FREQUENTIEL ET DE LA DUREE DU SIGNAL) ;
- LA VARIABILITE DES PROPRIETES DU MILIEU, AU TRAVERS DE LA VARIATION :
 - DES PARAMETRES DU MILIEU GEOLOGIQUE :
 - VITESSE DES ONDES S DANS CHAQUE COUCHE DU MILIEU GEOLOGIQUE
 - PROPRIETES NON LINEAIRES DU SOL AU SEIN DE CHAQUE COUCHE
 - VARIATION DE CES DEUX PROPRIETES SIMULTANEMENT
 - DU NIVEAU DE VARIATION DE CES PARAMETRES PUISQUE LE COEFFICIENT DE VARIATION (ECART-TYPE / MOYENNE) EST ALTERNATIVEMENT CONSIDERE COMME EGAL A 10%, 20% ET 30%
 - DE LA LONGUEUR DE CORRELATION, LONGUEUR CARACTERISTIQUE DE LA VARIATION DES PROPRIETES DU MILIEU AU SEIN DE CHAQUE COUCHE.

CETTE METHODE EST APPLIQUEE A UN MODELE DE VITESSE UNIDIMENSIONNEL CORRESPONDANT AUX PROPRIETES DU SOL A L'APLOMB DE LA STATION IWTH08 DU RESEAU KIK-NET AU JAPON. LES SIMULATIONS NUMERIQUES SONT REALISEES A L'AIDE DU CODE NUMERIQUE NOAH, MODELISANT LA PROPAGATION DES ONDES SH DANS UN MILIEU UNIDIMENSIONNEL NON LINEAIRE.

LORS DES BIENNALES DU RAP EN MAI-JUIN 2012, NOUS AVONS PRESENTE L'ETAT D'AVANCEMENT DE CES TRAVAUX, CE QUI CORRESPONDAIT A L'ETAPE INTERMEDIAIRE DE CE PROJET. LE PRESENT RAPPORT CONSTITUE LE RAPPORT FINAL D'AVANCEMENT DE CE PROJET EN PARTIE SUPPORTE PAR LE GIS-RAP POUR UNE ANNEE (2011-2012). CES TRAVAUX FERONT L'OBJET D'UN ARTICLE, ACTUELLEMENT EN PREPARATION.

ABSTRACT

THE SEISMIC MOTION RECORDED AT THE FREE SURFACE CAN BE SIGNIFICANTLY MODIFIED BY LOCAL SITE CONDITIONS AND BY THE INPUT MOTION. IN THE FRAMEWORK OF THE SEISMIC MOTION PREDICTION USING NUMERICAL MODELING, UNCERTAINTIES REGARDING INPUT PARAMETERS HAVE TO BE TAKEN INTO ACCOUNT IN ORDER TO QUANTIFY THEIR INFLUENCE. IN THIS STUDY, WE EXPLORE THE SEISMIC MOTION VARIABILITY AT THE FREE SURFACE AS DEPENDING ON :

- THE INPUT MOTION VARIABILITY SINCE 57 DIFFERENT ACCELEROGRAMS ARE USED AS INPUT MOTION (VARIABILITY OF MAXIMUM ACCELERATION, FREQUENCY CONTENT AND SIGNAL DURATION)
- GEOLOGICAL MEDIUM PROPERTIES :
 - S WAVE VELOCITY IN EACH LAYER OF THE GEOLOGICAL MEDIUM
 - SOIL NONLINEAR PROPERTIES IN EACH LAYER
 - SIMULTANEOUS VARIATION OF THESE TWO SOIL PROPERTIES
- THE VARIATION LEVEL OF THESE PARAMETERS SINCE THE COEFFICIENT OF VARIATION (STANDARD DEVIATION / MEAN) IS ALTERNATIVELY EQUAL TO 10%, 20% AND 30%.
- THE CORRELATION LENGTH, CHARACTERISTIC OF THE PROPERTIES VARIATION LENGTH IN EACH LAYER.

WE FOCUS HERE ON A 1D VELOCITY MODEL CORRESPONDING TO THE SOIL PROPERTIES BENEATH THE IWTH08 KIK-NET STATION IN JAPAN. NUMERICAL SIMULATIONS ARE BASED ON THE NOAH CODE THAT MODELS THE SH WAVE PROPAGATION IN A 1D NONLINEAR MODEL.

DURING LES BIENNALES DU RAP IN MAY-JUNE 2012, WE PRESENTED THE PROJECT STATUS, WHICH REPRESENTED THE INTERMEDIATE STEP OF THIS PROJECT. THIS PRESENT REPORT CORRESPONDS TO THE FINAL REPORT OF THIS PROJECT PARTLY FUNDED BY THE GIS-RAP FOR ONE YEAR (2011-2012). THE WORK DONE DURING THIS PROJECT WILL BE THE SUBJECT OF AN INCOMING PAPER.

MOTS-CLES

Variabilité du mouvement sismique, modélisation numérique, rhéologie non linéaire

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION	2
2 OBJECTIFS DU PROJET.....	2
3 TRAVAUX REALISES DURANT LA PREMIERE PHASE DU PROJET	5
4 TRAVAUX REALISES DURANT LA SECONDE PHASE DU PROJET	5
5 CONCLUSIONS.....	9
6 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	10
7 ANNEXE 1 : RESUME ET PRESENTATION AU COLLOQUE AFPS 2011 A MARNE-LA- VALLEE, SEPTEMBRE 2011	11
8 ANNEXE 2 : PRESENTATION AUX JOURNEES DU RAP A HYERES, MAI-JUIN 2012 .	17
9 ANNEXE 3 : RESUME ET PRESENTATION A LA 15EME CONFERENCE MONDIALE D'INGENIERIE SISMIQUE, SEPTEMBRE 2012.....	18

1 INTRODUCTION

Ce rapport constitue le rapport final du projet GIS-RAP intitulé « Influence de la variabilité du milieu et de la sollicitation sismique sur l'évaluation des effets de site » accepté lors de la réponse à l'appel d'offre du GIS-RAP en septembre 2011.

Ce projet a été mené par Céline Gélis (IRSN), Fernando Lopez-Caballero (Ecole Centrale Paris), Julie Régnier (CETE Méditerranée) et Fabian Bonilla (IFSTTAR Paris). Des réunions mensuelles se sont tenues entre les participants, principalement à Paris, entre septembre 2011 et fin 2012. Elles ont permis aux participants de discuter les résultats obtenus au cours du projet, de les mettre en perspective par rapport à d'autres travaux issus de la bibliographie ou réalisés dans les différentes équipes des participants et d'organiser et de se répartir le travail associé aux prochaines étapes du projet.

Dans ce qui suit, nous rappelons brièvement les objectifs du projet et en présentons les principaux résultats. La présentation des résultats est divisée en deux parties. La première concerne les travaux obtenus pendant la première phase du projet, durant laquelle une présentation a été effectuée au colloque de Marne-la-vallée en septembre 2011 (Lopez-Caballero et al., 2011) dont le résumé se trouve dans l'annexe 1. La première partie s'est achevée par la présentation des travaux en cours aux Biennales du RAP à Hyères en mai-juin 2012 (Lopez-Caballero et al., 2012a). Cette présentation se trouve dans l'annexe 2 et constitue l'étape intermédiaire du projet. La deuxième partie de la présentation des résultats de ce projet concerne l'estimation de l'influence de la longueur de corrélation associée aux variations de vitesse S sur le mouvement sismique. Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet ont été présentés à la 15^{ème} conférence mondiale d'ingénierie parasismique (15th World Conference of Earthquake Engineering) qui s'est tenue à Lisbonne du 24 au 28 septembre 2012. Un résumé de 10 pages, synthétisant les résultats obtenus, a été soumis à cette occasion et a fait l'objet d'une présentation sous forme de e-poster (Lopez-Caballero et al., 2012b). Le résumé de cette présentation se trouve dans l'annexe 3. A la fin de la présentation des principaux résultats, nous concluons sur les enseignements tirés de cette étude dans la perspective de l'évaluation de la réponse d'un site sous sollicitation sismique en tenant compte de la variabilité associée.

2 OBJECTIFS DU PROJET

Le mouvement sismique enregistré peut être significativement modifié par les conditions locales du site et par la sollicitation sismique. Pour évaluer la variabilité des propriétés du sol, nous utilisons dans un premier temps les enregistrements sismiques et les caractérisations géophysiques des stations du réseau KiK-net au Japon. Ce réseau est composé de 688 stations 3-composantes en surface et en profondeur. La figure 1 montre la répartition des vitesses des ondes S dans les premiers 30 mètres ainsi que la profondeur pour les stations du KiK-net (Regnier et al, 2011).

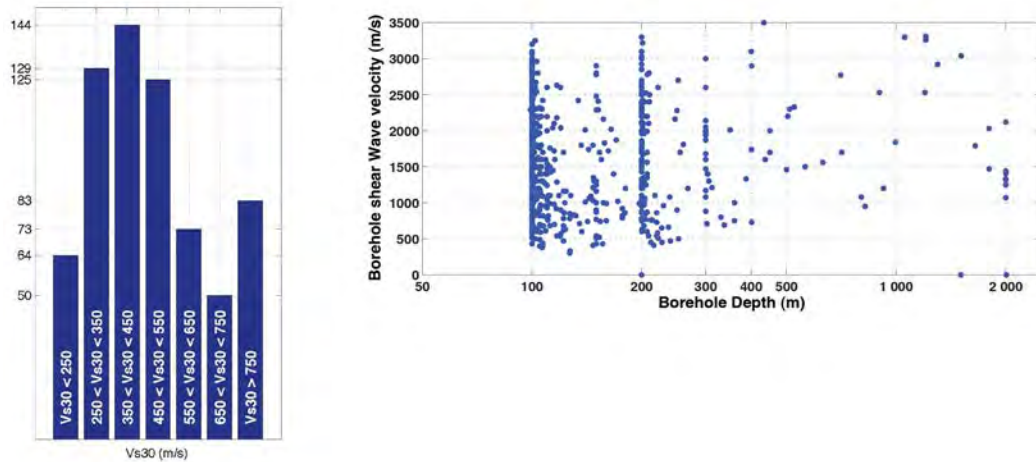


Figure 1 : Histogramme de la distribution de Vs30 et de la profondeur des stations Kik-net

Afin d'étudier l'influence de la variabilité des propriétés du sol sur le mouvement sismique, nous générons des profils de vitesse des ondes S de manière aléatoire. Ces profils sont généralement construits à partir d'un profil de vitesse moyen (issu de la base de données Kik-net) et d'un coefficient de variation moyen. Cependant, nous introduisons aussi une longueur de corrélation afin d'étudier l'influence du niveau d'hétérogénéité dans la réponse du profil de sol (Popescu et al. 2006; Lopez-Caballero and Modaressi-Farahmand-Razavi, 2010 ; Rathje et al. 2010). La figure 2 montre un exemple de profil de vitesse correspondant à la station KMMH09 modifié de façon aléatoire avec deux longueurs de corrélation (Lopez-Caballero et al. 2011). Le choix de la valeur de la longueur de corrélation est très important car des valeurs faibles produisent des variations rapides du modèle de vitesse (Vanmarcke, 1983; Griffiths and Fenton, 2001; Popescu et al. 2006).

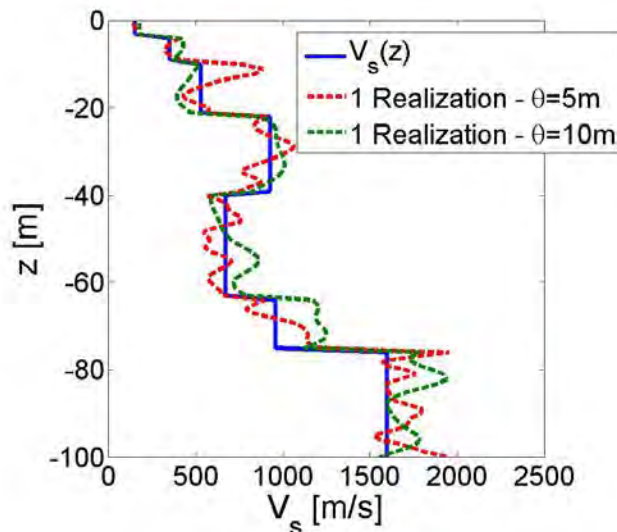


Figure 2 : Exemple de profil de vitesse stochastique généré avec une longueur de corrélation de 5m et 10m autour du profil de vitesse du site KMMH09 obtenu par des mesures géophysiques.

Pour caractériser la réponse linéaire empirique du site KMMH09 (figure 2), les enregistrements de séismes pour lesquels le PGA (Peak Ground Acceleration, accélération maximale du sol dans le domaine temporel durant la sollicitation sismique) n'excède pas 10 cm/s^2 sont sélectionnés et la fonction de transfert entre la surface et la

profondeur est calculée. Pour cela, les deux composantes horizontales sont combinés dans le plan complexe et la transformée de Fourier du signal entier (ondes P, S et coda) et celle du bruit pré-événement sont calculées. La fonction de transfert n'est calculée que lorsque le rapport signal/bruit est supérieur à 3 pour la surface et la profondeur. La valeur moyenne et l'écart-type associés à ces enregistrements sont ainsi obtenus.

L'évaluation numérique de la fonction de transfert surface/profondeur est calculée à l'aide de la méthode de Haskell-Thomson simulant la propagation des ondes SH dans un milieu 1D viscoélastique. Les paramètres d'entrée correspondent au profil de vitesse probabiliste des ondes S, au profil de densité ρ et au profil du facteur de qualité Q_s . Ici, la densité et le facteur de qualité sont considérés comme constants sur toute la colonne de sol ($\rho=2t/m^3$, $Q_s=50$).

La figure 3 montre la réponse 1D du site en utilisant les propriétés du milieu mesurées sur le site (courbe rouge) et les fonctions de transfert obtenues à partir des profils de vitesse probabiliste (courbes jaunes). Les statistiques des observations in-situ sont aussi superposées. La zone mauve foncé montre la valeur médiane \pm un écart-type tandis que la zone mauve clair montre la valeur médiane \pm deux écart-types.

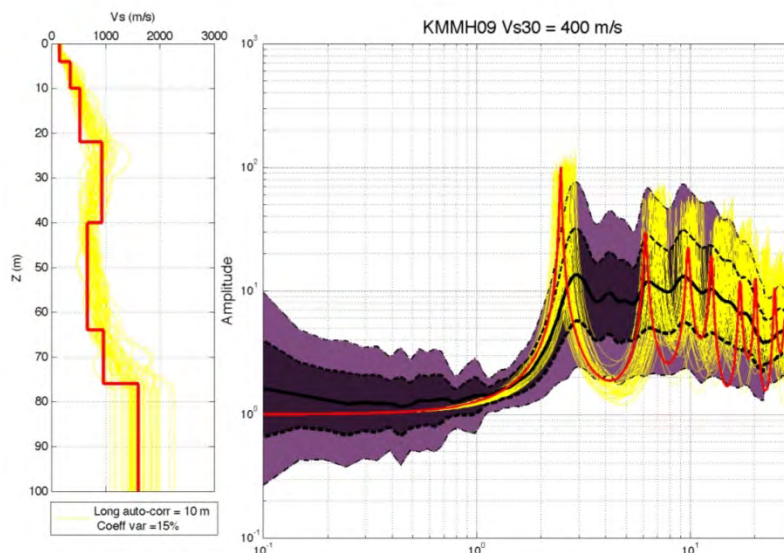


Figure 3 : Fonctions de transfert pour les modèles de sol probabilistes obtenus avec une longueur de corrélation de 10m (courbes jaunes) et calculées à partir des données réelles (surfaces mauves).

La figure 3 montre que les simulations numériques linéaires basées sur des modèles probabilistes donnent des résultats similaires à la réponse empirique du site. Cependant, les simulations numériques ne permettent pas de reproduire l'amplification plate pour des fréquences supérieures à la fréquence fondamentale de résonance. Cette différence est probablement liée à des effets de site 2D ou 3D. De plus, les fonctions de transfert empiriques sont calculées à partir de la totalité du signal, ce qui n'est pas directement comparable à une fonction de transfert des ondes SH.

Suite à cette première exploration des effets de la variabilité du profil de vitesse sur la réponse du site, nous proposons (1) de poursuivre cette étude sur d'autres stations du KiK-net et d'étudier aussi la réponse non linéaire du sol avec une longueur de corrélation associée à la résistance du matériel et (2) de mener ce type d'étude sur quelques stations du RAP ayant une caractérisation géotechnique ou géophysique ainsi qu'une évaluation de la réponse sous sollicitation sismique (e.g. Drouet et al., 2010).

3 TRAVAUX REALISES DURANT LA PREMIERE PHASE DU PROJET

Ce travail consiste à étudier l'influence de la variabilité des propriétés du sol (vitesse des ondes S et paramètre caractéristique de la non linéarité¹) sur le mouvement sismique en surface. Des simulations numériques de la propagation des ondes dans une colonne de sol donnée (station IWTH08 du réseau KiK-Net) sont effectuées pour 57 accélérogrammes différents. Nous avons testé trois jeux de paramètres variables : (1) seule la vitesse des ondes S est variable, (2) seul le paramètre caractéristique de la non linéarité l'est, et (3) les deux le sont. Des coefficients de variation ($cv = \text{écart-type} / \text{moyenne}$) égaux à 10%, 20% et 30% sont considérés pour chaque cas et chaque paramètre. Afin d'évaluer la variabilité du mouvement sismique en surface, 100 colonnes de sol sont considérées pour chaque cas. Pour finir, la contribution de chaque paramètre à la variabilité du mouvement sismique est étudiée.

Cette première étude a montré que lorsque l'on ajoute de la variabilité au profil de vitesse et aux paramètres non-linéaires, la variabilité sur le PGA en surface augmente et la valeur moyenne diminue. Comme il a été souligné par Rathje et al (2010), cela indique que l'introduction de la variabilité des paramètres n'est pas nécessairement (en valeur moyenne) conservative. Cela montre d'une part qu'il faut être extrêmement prudent lors du choix des coefficients de variation et d'autre part qu'il est nécessaire que les résultats en surface soient interprétés non seulement en tant que valeur moyenne mais aussi en prenant en compte la variabilité associée.

4 TRAVAUX REALISES DURANT LA SECONDE PHASE DU PROJET

Des simulations supplémentaires ont été effectuées afin d'estimer l'influence de la longueur de corrélation associée aux variations de vitesse S sur le mouvement sismique. La figure 4 montre la variation du PGA moyen calculé à la surface libre en fonction du PGA de la sollicitation sismique (rapporté au rocher affleurant, nommé PHA pour Peak Horizontal Acceleration). Cette courbe a la même allure que celle pour laquelle la longueur de corrélation n'était pas introduite (figure 6 de l'annexe 3, correspondant à une longueur de corrélation infinie). Les valeurs moyennes de PGA sont plus faibles lorsque la longueur de corrélation est plus faible, ce qui peut s'expliquer par la présence de nombreuses variations spatiales des vitesses sismiques, pouvant notamment comporter des inversions de vitesse, générant une perte d'énergie par réflexions ou diffractions multiples. Les valeurs moyennes de PGA diminuent lorsque les variations des propriétés du milieu sont plus fortes (coefficient de variation de 30% vs 20% et 10%).

Les écart-types augmentent lorsque le PHA augmente et les valeurs sont plus fortes lorsque le coefficient de variation du milieu est plus fort (figure 5). Cela correspond aux observations effectuées sans introduire la longueur de corrélation. Le coefficient de variation associé au PGA augmente généralement lorsque le PHA augmente (figure 6). Pour les faibles PHA, le comportement est un peu différent, ce qui pourrait s'expliquer par une faible

¹considérées dans un premier temps comme homogènes dans chaque couche

non-linéarité. Ce comportement est similaire à celui observé sans longueur de corrélation (figure 8 de l'annexe 3). Dans l'ensemble, les valeurs sont proches avec les deux longueurs de corrélation utilisées (5m et 10m).

En conclusion, l'introduction d'une longueur de corrélation a tendance à diminuer la valeur moyenne du PGA en surface. Plus elle est petite, i.e. plus les variations du milieu sont fortes au sein de chaque couche, plus cette diminution est importante (figure 7). Le coefficient de variation ne semble pas particulièrement affecté par la présence de la longueur de corrélation (figure 8).

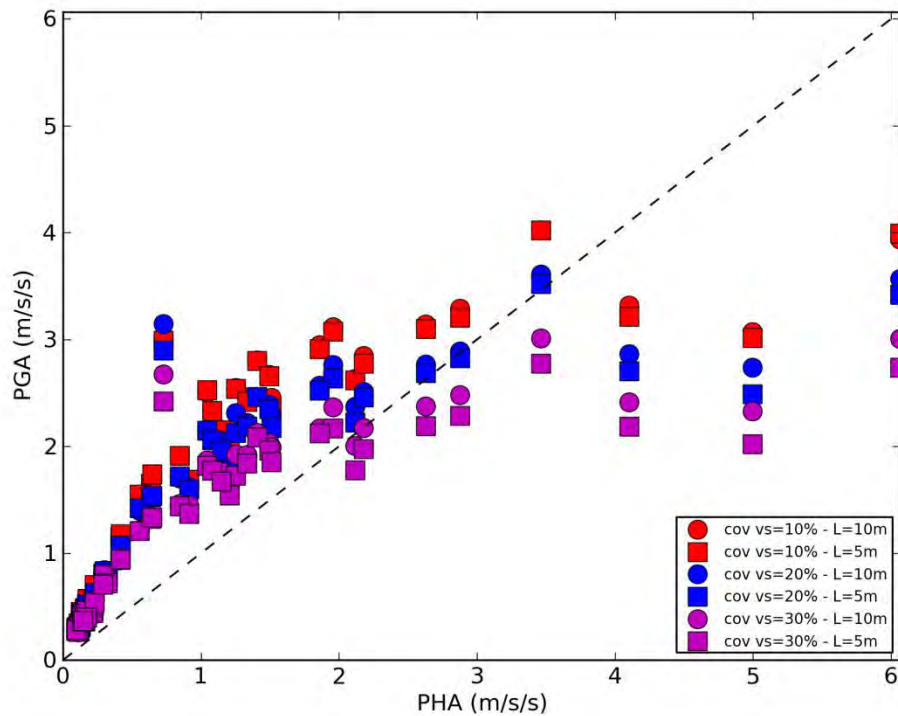


Figure 4 : Variation du PGA en surface en fonction du PGA calculé au rocher affleurant (PHA) pour différentes longueurs de corrélation et coefficients de variation.

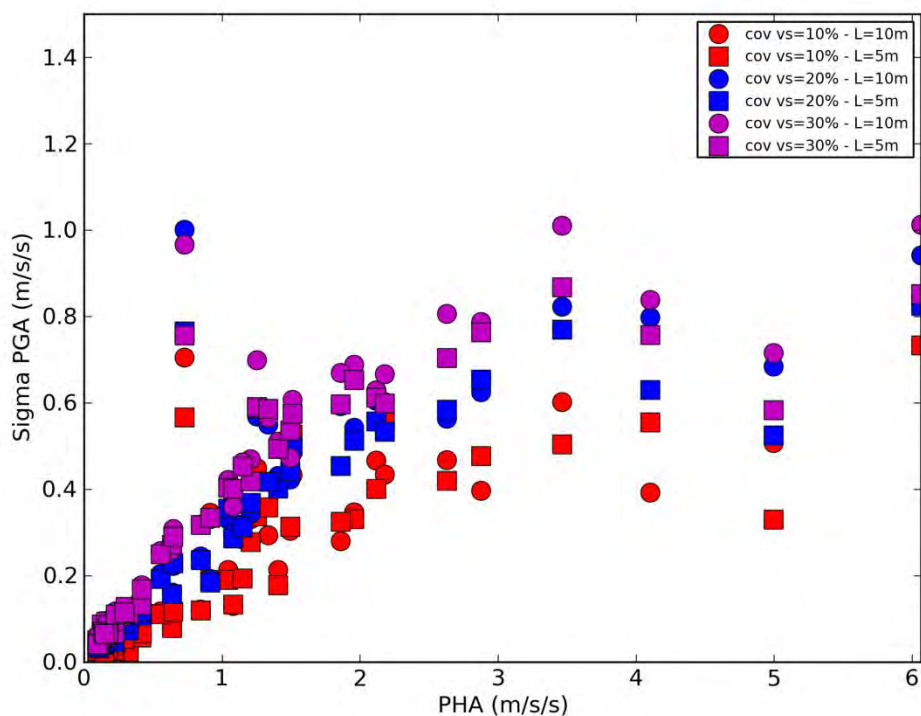


Figure 5 : Variation de l'écart-type associé au PGA en surface en fonction du PGA calculé au rocher affleurant (PHA) pour différentes longueurs de corrélation et coefficients de variation.

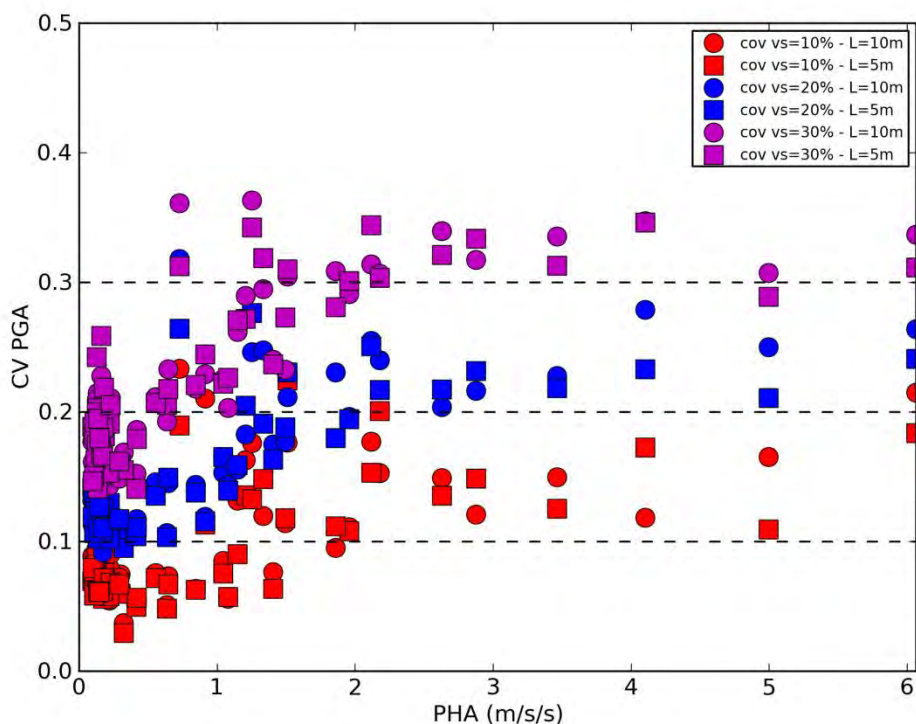


Figure 6 : Variation du coefficient de variation associé au PGA en surface en fonction du PGA calculé au rocher affleurant (PHA) pour différentes longueurs de corrélation et coefficients de variation.

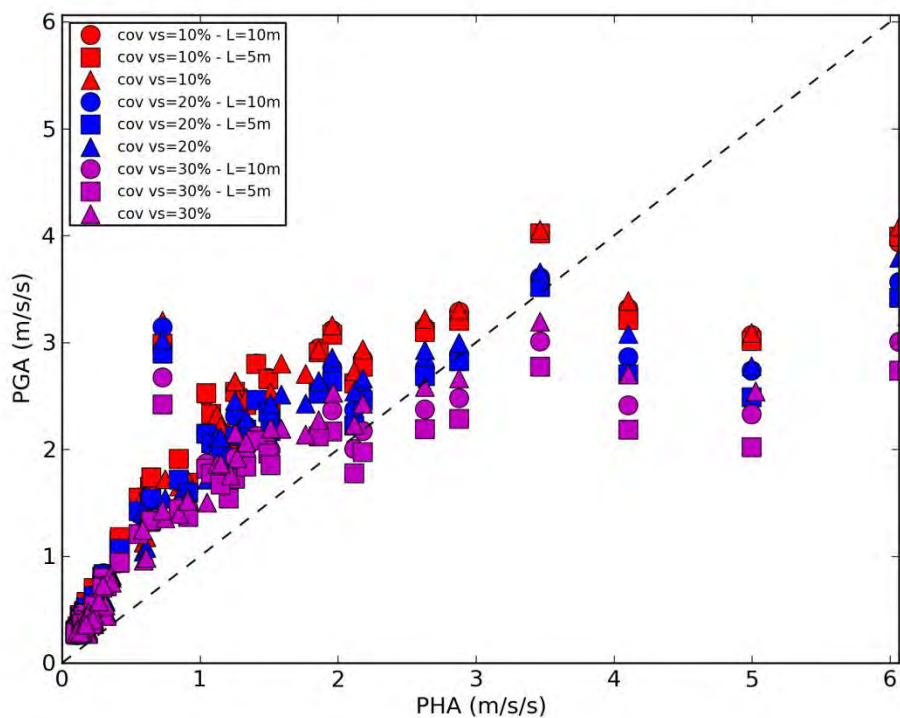


Figure 7 : Variation du PGA en surface en fonction du PHA avec et sans longueur de corrélation pour Vs.

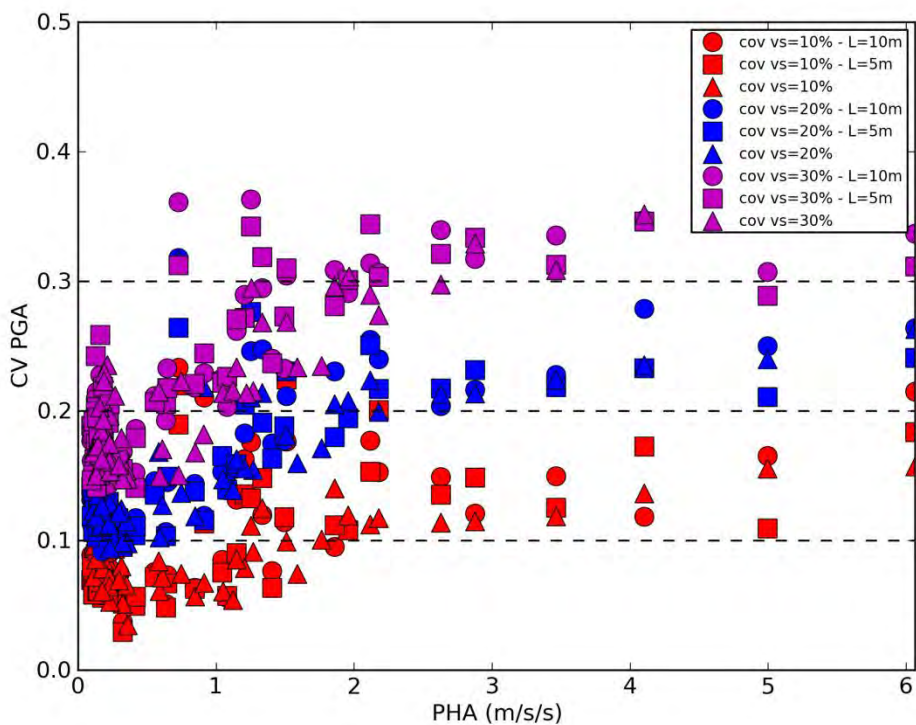


Figure 8 : Variation du coefficient de variation associé au PGA en surface avec et sans longueur de corrélation pour Vs en fonction du PGA calculé au rocher affleurant (PHA).

5 CONCLUSIONS

Le mouvement sismique enregistré en surface peut être significativement modifié par les conditions locales de site et par la sollicitation sismique incidente. Dans le cadre de la prédiction du mouvement sismique via des modélisations numériques, les incertitudes sur les paramètres d'entrée doivent être prises en compte afin de quantifier de façon robuste leur influence. Dans cette étude, nous avons ainsi exploré la variabilité du mouvement sismique en surface en fonction de :

- la variabilité de la sollicitation sismique à l'aide de 57 accélérogrammes différents utilisés comme sollicitation sismique (variabilité de l'accélération maximale, du contenu fréquentiel et de la durée du signal) ;
- la variabilité des propriétés du milieu, au travers de la variation :
 - des paramètres du milieu géologique :
 - vitesse des ondes S dans chaque couche du milieu géologique,
 - propriétés non linéaires du sol au sein de chaque couche,
 - variation de ces deux propriétés simultanément,
 - du niveau de variation de ces paramètres puisque le coefficient de variation (écart-type / moyenne) est alternativement considéré comme égal à 10%, 20% et 30%
 - de la longueur de corrélation, longueur caractéristique de la variation des propriétés du milieu au sein de chaque couche.

Cette étude a montré que lorsque l'on ajoute de la variabilité au profil de vitesse et aux paramètres non-linéaires, que ce soit en introduisant des coefficients de variation de plus en plus élevés ou des longueurs de corrélation de plus en plus petites, la variabilité du PGA en surface augmente et la valeur moyenne diminue. Cela indique que l'introduction de la variabilité des paramètres n'est pas nécessairement (en valeur moyenne) conservative. Cela montre d'une part qu'il faut être extrêmement prudent lors du choix des coefficients de variation et des longueurs de corrélation et d'autre part qu'il est nécessaire que les résultats en surface soient interprétés non seulement en tant que valeur moyenne mais aussi en prenant en compte la variabilité associée.

Les travaux effectués dans le cadre de ce projet ont été présentés à deux colloques et à une conférence internationale, qui sont :

- le colloque AFPS à Marne-la-Vallée en septembre 2011 (Lopez-Caballero et al., 2011),
- les Biennales du RAP à Hyères en mai-juin 2012 (Lopez-Caballero et al., 2012a),
- la 15^{ème} conférence mondiale d'ingénierie parasismique (15th World Conference of Earthquake Engineering) à Lisbonne en septembre 2012 (Lopez-Caballero et al., 2012b).

Ces travaux font l'objet d'un article en cours de rédaction.

6 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Drouet, S., Cotton, F. and Guéguen P. 2010. VS30, K, regional attenuation and Mw from accelerograms : application to magnitude 3-5 French earthquakes, *Geophysical Journal International*, 182(2) : 880-898, DOI : 10.1111/j.1365-246X.2010.04626.x

Griffiths D. V., Fenton G. A., Bearing capacity of spatially random soil: the undrained clay Prandtl problem revisited, *Géotechnique*, vol. 51, n° 4, 2001, p. 351-359.

Lopez-Caballero F., Modaressi-Farahmand-Razavi A. Assessment of variability and uncertainties effects on the seismic response of a liquefiable soil profile. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, Volume 30, Number 7, 600-613.

Lopez-Caballero F., Régnier J., Bonilla, L.F., Gélis, C., Site response analysis including earthquake input ground motion and soil dynamic properties variability, 8ème colloque National AFPS 2011

Lopez-Caballero F., Gélis C., Régnier J. Bonilla L.F., 2012a. Site response analysis including earthquake input ground motion and soil dynamic properties variability. *Journées du RAP*, Hyères, 30 mai-1er juin 2012.

Lopez-Caballero F., Gélis C., Régnier J. Bonilla L.F., 2012b. Site response analysis including earthquake input ground motion and soil dynamic properties variability. 15th WCEE Lisboa 2012, 24-28 September 2012.

Popescu R., Prévost J. H., Deodatis G., Chakraborty P., Dynamics of nonlinear porous media with applications to soil liquefaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 26, n° 6-7, 2006, p. 648-665.

Rathje E. M., Kottke A. R., Trent W. L., Influence of Input Motion and Site Property Variabilities on Seismic Site Response Analysis, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 136, n° 4, 2010, p. 607-619.

Régnier J., Bonilla, L.F., Semblat, J.F., Bertrand, E., Vs30, un paramètre pertinent pour décrire les effets de site? Test sur la base de données Kiknet, 8ème colloque National AFPS 2011.

Vanmarcke E. H., *Random fields: analysis and synthesis*. Cambridge, MA: MIT Press; 1983.

7 ANNEXE 1 : RESUME ET PRESENTATION AU COLLOQUE AFPS 2011 A MARNE-LA-VALLEE, SEPTEMBRE 2011

Site response analysis including earthquake input ground motion and soil dynamic properties variability

Fernando Lopez-Caballero* — Régnier Julie** — Luis Fabian Bonilla*** — Céline Gélis****

* *Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures et Matériaux (MSSMat), Ecole Centrale Paris
CNRS UMR 8579*

Grande Voie des Vignes, 92290 Châtenay-Malabry, France

fernando.lopez-caballero@ecp.fr

** *ERA Risque sismique, Laboratoire de Nice, CETE Méditerranée.*

56 Bd de Stalingrad 06359 Nice cedex

*** *GER, IFSTTAR, Paris.*

58 boulevard Lefebvre 75732 Paris

**** *IRSN.*

BP 17, 92 262 Fontenay-aux-roses, France

RÉSUMÉ. Dans cet article nous avons étudié la variabilité des fonctions de transfert en fond de puits, (1) calculées à partir de données accélérométriques provenant de la base de données Kik-net (Japon), et (2) évaluées numériquement à l'aide d'une méthode 1-D linéaire. L'évaluation empirique a été réalisée en un site en sélectionnant des séismes dont le PGA en surface ne dépassait pas 10 gal à la station Kik-net KMNH09. Les profils de vitesse des ondes de cisaillement servant de paramètre d'entrées de la méthode numérique ont été générés grâce à un algorithme de génération de champs aléatoire calibré par une étude statistique menée sur les profils Vs de la base de données Kik-net. Nous avons trouvé que les simulations étaient proches de l'évaluation empirique mais que la variabilité du profil de vitesse seule ne pouvait entièrement expliquer la variabilité empirique. Des études sont en cours afin de tester l'influence de la variabilité d'autres paramètres tels que le mouvement sismique incident et les paramètres dynamiques du sol.

ABSTRACT. In this article, we investigate the variability of borehole site responses, computed from accelerometric data from the well-characterized Kik-net network (Japan) and evaluated numerically thanks to a 1-D visco-elastic linear method. For the empirical evaluation we selected recordings with surface PGA lower than 10 gal at the KMNH09 Kik-net site. The shear wave velocity profiles input for the numerical simulations were generated using a random field generation algorithm calibrated on a statistical study of Kik-net Vs profiles. We find that the numerical simulations are close to the empirical one but the Vs variability cannot fully explain the empirical site response variability. Further researches are currently led to investigate not only the impact of Vs variability but also the variability of input motion and dynamic soil properties.

MOTS-CLÉS :

KEYWORDS :

1. Introduction

Local site effects have long been recognized as an important factor contributing to variations in strong ground motions. Their study is one of the most important goals of earthquake engineering. Seismic hazard evaluations are calculated over broad geographical areas; however, as more ground motion data are collected, the local geology condition is emerging as one of the dominant factors controlling the variation in ground motion and determination of the site-specific seismic hazard for a given earthquake.

Because of this, earthquake engineering analyses often concentrate on the variability of soil properties when computing site-specific ground motion. To evaluate soil parameters variability, we chose the well-characterized KIK-net boreholes in Japan, which provides surface and borehole high quality digital 3-components accelerometers.

Thus, a probabilistic analysis is performed in order to illustrate the effect of uncertainty in soil properties and their spatial variability on the surface response of one of the KIK-net borehole. The Monte Carlo simulation probabilistic analysis technique is used to obtain the uncertainties in the seismic response. At a Kik-net site, we compared the results of a 1-D elastic numerical evaluation of site response including shear wave velocity variability to empirical evaluation.

The uncertainty associated with the other parameters such as the non linear soil behaviour, the thickness of soil layers, the initial water table position or the bedrock depth have not been considered in this work and it will be addressed in future studies.

2. Kik-net database

2.1. Geotechnical information

For the purpose of this study, we used the Kiban-Kyoshin Network (Kiknet) in Japan. The Kiknet is composed of 688 stations with surface and borehole high quality digital 3-components accelerometers. Among the Kiknet sites, 668 shear and compressive waves velocities profiles were collected (www.kik.bosai.go.jp/). A more detailed presentation of the Vs profiles is available in Regnier et al. (2011). We performed a statistical analysis of this data to generate stochastic shear wave velocity profiles. The data are assumed to be characterized statistically by a lognormal distribution at any given depth.

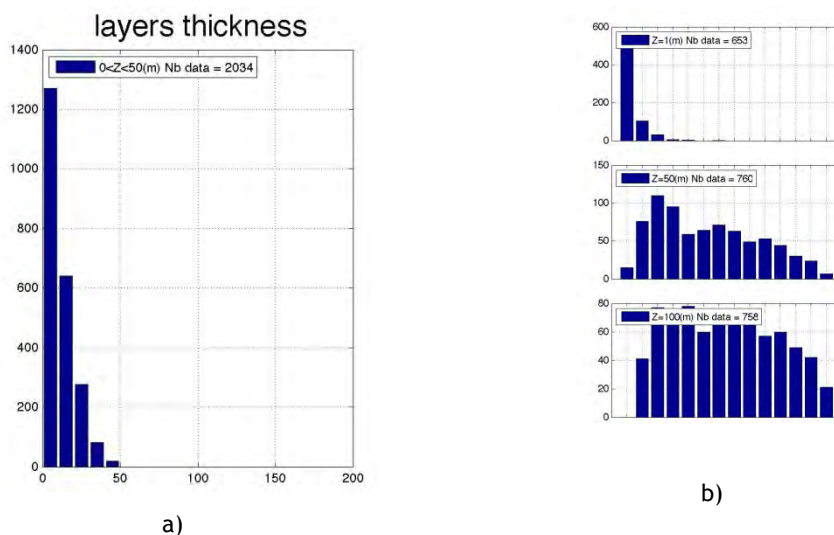


Figure 1. Example of histograms of a) layers' thickness and b) layers' shear-wave velocity (Regnier et al., 2011).

3. Random field generation algorithm

This section gives an overview of the homogeneous either Gaussian or non-Gaussian stochastic field generation method used in this work. The midpoint method is used in order to discretize the field. In this method the field within an element or cell is described by a single random variable, which represents the field value at the centroid of the element and the value of the field is assumed to be constant within the entire element. Its statistics (i.e. mean, variance) are readily computed from the statistics at the centroids (Der Kiureghian and Ke, 1998; Huyse and Walters, 2001).

The auto-correlation matrix $[R]$ of the discretized field is generated first. This matrix represents the correlation structure of the field, giving the correlation coefficient ρ_{ij} between the random variables X_i and X_j for any two locations z_i and z_j . These coefficients are derived directly from the auto-correlation function. Afterward, a Gaussian correlated field is first generated and then transformed into a non-Gaussian one using the inverse cumulative density function (CDF) method. Thus, the output field is compatible with both the autocorrelation matrix and the marginal probability distribution function (Haldar and Mahadevan, 2000).

The procedure used for generating correlated random Gaussian fields $[P]$ is based on principal component analysis with random Gaussian amplitudes. Principal components are the eigenvectors of the correlation matrix $[R]$, while its eigenvalues represent the variance of each component. By construction, the principal components are

uncorrelated or orthogonal to each other. Thus stochastic principal component amplitudes may be generated by multiplying n independent Gaussian random variables $[G]$ (i.e. zero mean and unit variance) by the square root of the eigenvalues. The transformation from principal component space back to the original space introduces the desired correlations (Huysse and Walters, 2001; Evans and Wiscombe, 2004).

$$[P] = [B] \cdot [\Lambda] \cdot [G] \quad [1]$$

where matrix $[\Lambda]$ is a diagonal matrix with the square root of the n eigenvalues of $[R]$ ($\Lambda = \text{diag}[\lambda_1^{1/2}; \lambda_2^{1/2}; \dots; \lambda_n^{1/2}]$) and $[B]$ is a matrix containing the n eigenvectors of $[R]$. Finally, as recalled before, a simulated Gaussian stochastic field $f_p(x)$ can be transformed into a non-Gaussian field $f_B(x)$ using the following expression (i.e. the inverse CDF method):

$$f_B(x) = F_B^{-1} \left\{ F_G[f_p(x)] \right\} \quad [2]$$

where F_G is the Gaussian cumulative distribution function and F_B corresponds to the non-Gaussian cumulative distribution function. This transformation is applied to the correlated Gaussian field $[P]$ obtained by equation (1).

3.1. Auto-correlation models

For a homogeneous random field, the marginal distribution is independent of the location and the auto-correlation function ρ depends only on the distance τ between the two points (e.g. $\tau = z_i - z_j$ in 1D case). The correlation length or scale of fluctuation θ is a measure for the rate of fluctuation within the random field model. A larger correlation length θ corresponds to a slower varying random field and fields having small θ values tend to vary erratically over shorter distances (Vanmarcke, 1983; Griffiths and Fenton, 2001; Popescu et al. 2006). In this work, concerning the spatial variability, a squared exponential autocorrelation function (equation 3), with two different correlation lengths θ (i.e. 5 and 10m), is used in the performed parametric study. These θ values are chosen in order to represent two different scenarios.

$$\rho_{ij}(\tau) = \exp\left(-\pi \frac{\tau^2}{\theta^2}\right) \quad [3]$$

4. Probabilistic shear-wave velocity profile

It is well known that the shear-wave velocity profile and the nonlinear modulus reduction and damping curves have a significant feature of the soil behaviour submitted to cyclic loading. Furthermore the estimation of the soil profile layout and the corresponding properties (e.g. V_s , density, shear modulus) and their evaluation in the laboratory exhibits some degree of uncertainty. Recently some authors (Koutsourelakis et al., 2002; Popescu et al. 2006; Rathje et al. 2010) among others propose to adopt probabilistic approaches in practical earthquake engineering applications. In this way, the variability in soil properties can be incorporated in site response analysis through a Monte Carlo simulation. This method allows estimating the statistical response of a model by computing their response for different input parameters' values. Two main sampling procedures can be used to generate these parameters: simple random sampling and Latin hypercube sampling (Xu et al. 2005; Helton et al., 2006). According to Xu et al. (2005) several studies point out that Latin hypercube sampling can more exhaustively explore model parameter space than simple random sampling with a small sample size.

For example, in this work, the relevant input parameter is the shear wave velocity profile and the studied response parameter concerns the spectral amplification factors. According to Griffiths and Fenton, (2001), Popescu et al. (2006) among others, it is no clear evidence pointing to any specific model for the probability density function (pdf) of soil properties. However, they proposed to use non-negative functions as Beta, Gamma or lognormal for many material properties.

The probabilistic shear-wave velocity profiles generated for Latin hypercube simulations are based on a baseline shear-wave velocity profile, a measure of variability, and an interlayer correlation. The baseline shear-wave velocity profile used in this study is based on the statistical models of Regnier et al (2011) and according to the same authors; it is assumed to be characterized statistically by a lognormal distribution at any given depth. Thus, the baseline shear-wave velocity profile defines the mean values of V_s and it is assumed a coefficient of variation (CV) equal to 15% at any given depth. Finally, as recalled before, concerning the spatial variability, a squared exponential autocorrelation function (equation 3), with two different correlation lengths θ (i.e. 5 and 10m), will be used.

Figure 2a shows the effect of correlation lengths on the probabilistic shear-wave profile obtained for the site KMMH09. It is observed as expected that for the case where $\theta=5\text{m}$, the V_s values tend to vary erratically over the

baseline shear-wave velocity profile. On the other hand, when $\theta=10\text{m}$, the obtained profile follows the shape of the baseline shear-wave velocity profile.

Figure 2b displays the obtained uncertainty shear-wave profile. In this figure, the median, the \pm one standard deviation and the range of V_s profiles determined by Latin hypercube sampling are showed. These summarized curves involve 50 sample computations. The range of V_s profiles represents the limits of the probabilistic profiles. It is important to note that the median response obtained is in agreement with the baseline shear-wave velocity profile.

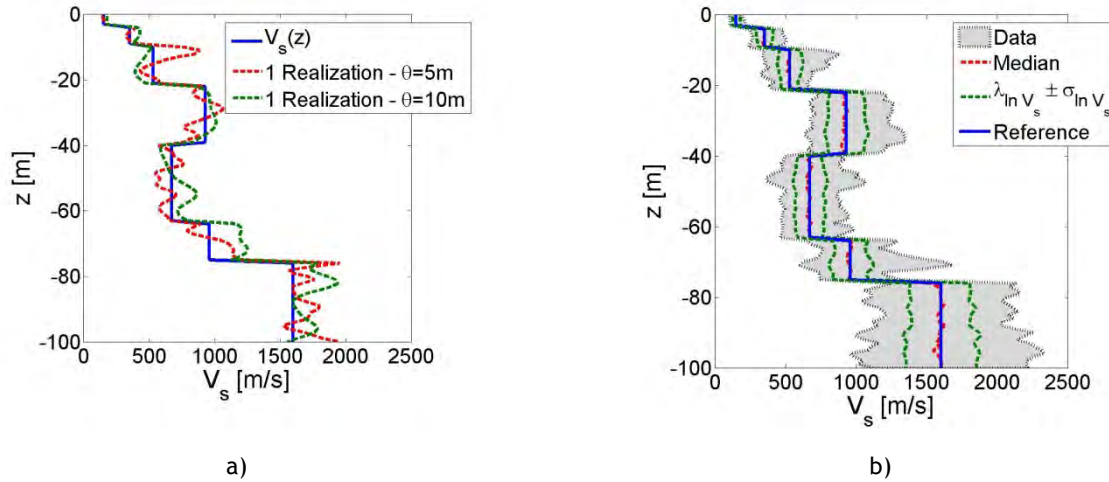


Figure 2. a) Example of probabilistic shear-wave velocity profile realisations, effect of correlation lengths $\theta=5$ and 10m and b) Simulated probabilistic shear-wave velocity profiles ($\theta=10\text{m}$).

5. Linear soil response

In order to characterize the empirical linear site response of KMMH09 Kiknet site, we collected accelerometric data from the Kiknet network. In this study we focus on the linear evaluation of site response, hence we selected recordings for which the surface PGA did not exceed 10 gal (Figure 3). We calculated the borehole transfer function of the selected recordings. We combined the two horizontal components of motion into a complex plane and computed the Fourier transform of the whole signal (P, S, and coda waves) and the pre-event noise. We calculated the site-to-reference spectral ratios with reference at borehole depth only when the signal to noise ratio exceeded 3 (surface and borehole). We found the mean and standard deviation of the empirical linear site response (for more details on the signal processing see Regnier et al 2011).

The numerical borehole site responses evaluations were performed using a 1-D visco-elastic linear method based on the calculations of the well-known Haskell Thomson transfer matrix. The Input parameters are the probabilistic shear-wave velocity profiles, the density profile and the quality factor profile. We choose a density (ρ) and a quality (Q_s) factor constant for all depth ($\rho=2\text{t/m}^3$, $Q_s=50$).

Figure 3 displays the transfer functions for the simulated 1D probabilistic soil profiles (yellow lines). The statistics of the in-situ observations are superposed in the same Figure. The dark purple area represents the mean \pm one standard deviation and the light purple area the mean \pm two standard deviations. Finally, the red line corresponds to the theoretical mean 1D response of the KMMH09 KIK-net site using the measured 1D soil properties.

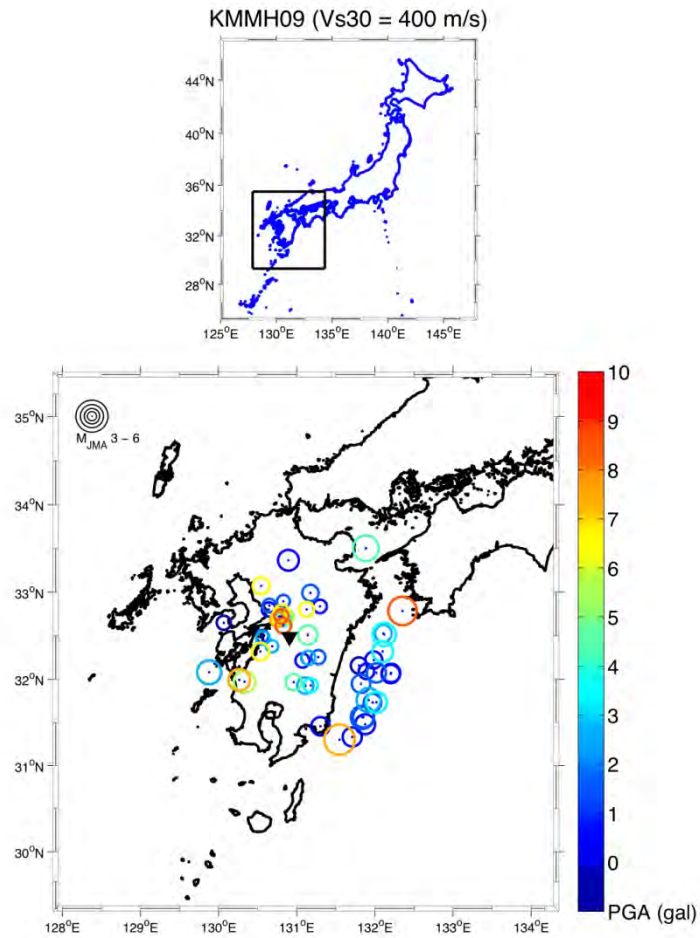


Figure 3. Location of the earthquakes recorded by the KMMH09 Kik-net station

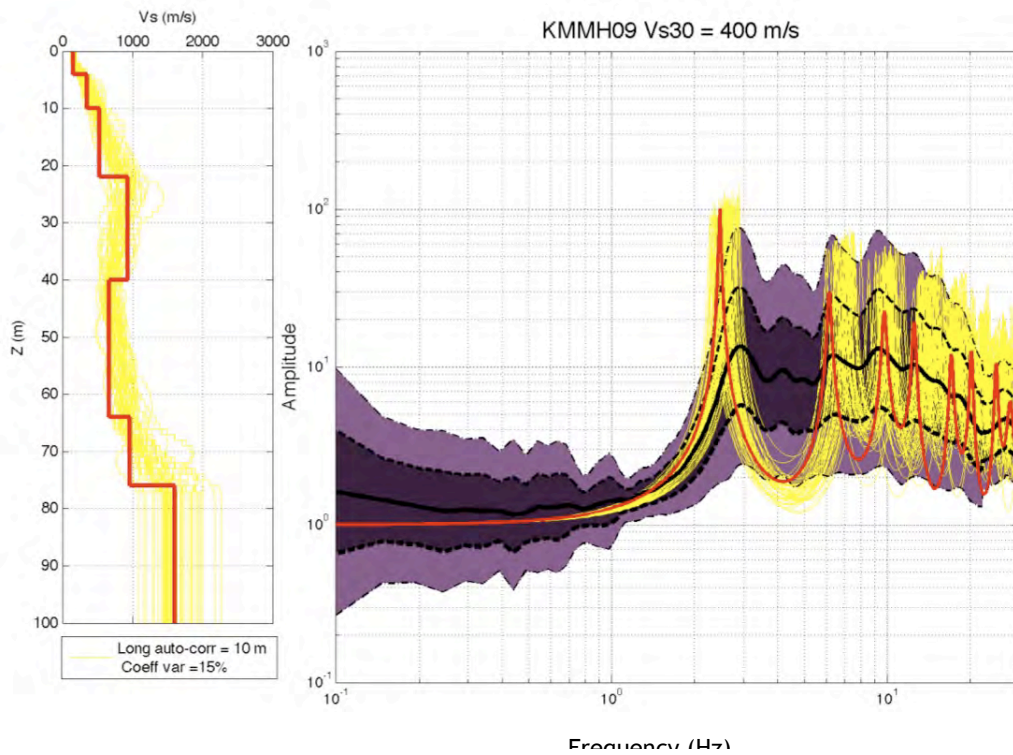


Figure 4. Transfer functions for the probabilistic soil profiles. Model with $\theta=10m$.

Figure 4 shows that the linear numerical simulation gives close results with the empirical evaluation of site response. However, the numerical evaluation is unable to reproduce the flat amplification after the first resonance frequency. This discrepancy is likely to be related to 2D or 3D effects at the KMNH09 site that cannot be reproduced by the 1D numerical model. Recall that the empirical borehole transfer function was obtained using the whole record, thus strictly speaking this is not an SH transfer function as the computed one.

6. Conclusions

In this study, we tested the generation of stochastic shear wave velocity profiles to see the impact of the variability of this parameter into site response. The soil parameter comes from the Kik-net network in Japan. This network was chosen because two stations at the surface and at depth are present and allow computing the borehole response. Hence, we compare numerical and empirical evaluations of borehole site response at KMMH09 Kik-net site. We find that the numerical simulations are close to the empirical one but the V_s variability cannot fully explain the empirical site response variability. Further researches are currently led to investigate not only the impact of V_s variability but also the variability of input motion and dynamic soil properties.

7. Bibliographic

- Evans K. F., Wiscombe W. J., « An algorithm for generating stochastic cloud fields from radar profile statistics ». *Atmospheric Research*, vol. 72, n° 1-4, 2004, p. 263-289.
- Der Kiureghian A., Ke J-B., « The stochastic finite element method in structural reliability », *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 3, n° 2, 1998, p. 83-91.
- Griffiths D. V., Fenton G. A., « Bearing capacity of spatially random soil: the undrained clay Prandtl problem revisited », *Géotechnique*, vol. 51, n° 4, 2001, p. 351-359.
- Haldar A, Mahadevan S. *Reliability assessment using stochastic finite element analysis*. New York: Wiley; 2000.
- Helton J. C., Johnson J. D., Sallaberry C. J., Storlie C. B., « Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis », *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 91, n° 9-10, 2006, p. 1175-1209.
- Huyse L, Walters R. Random field solutions including boundary condition uncertainty for the steady-state generalized burgers equation. Icase Report no. 2001-35, NASA/CR-2001-211239; 2001.
- Popescu R., Prévost J. H., Deodatis G., Chakraborty P., « Dynamics of nonlinear porous media with applications to soil liquefaction », *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 26, n° 6-7, 2006, p. 648-665.
- Rathje E. M., Kottke A. R., Trent W. L., « Influence of Input Motion and Site Property Variabilities on Seismic Site Response Analysis », *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 136, n° 4, 2010, p. 607-619.
- Régnier J., Bonilla, L.F., Semblat, J.F., Bertrand, E., « V_{s30} , un paramètre pertinent pour décrire les effets de site? Test sur la base de données Kiknet », *8ème colloque National AFPS 2011*.
- Vanmarcke E. H., *Random fields: analysis and synthesis*. Cambridge, MA: MIT Press; 1983.
- Xu C., He H. S., Hu Y., Chang Y., Li X., Bu R., « Latin hypercube sampling and geostatistical modeling of spatial uncertainty in a spatially explicit forest landscape model simulation », *Ecological Modelling*, vol. 185, n° 2-4, 2005, p. 255-269.

8 ANNEXE 2 : PRESENTATION AUX JOURNEES DU RAP A HYERES, MAI-JUIN 2012

**9 ANNEXE 3 : RESUME ET PRESENTATION A LA 15EME
CONFERENCE MONDIALE D'INGENIERIE SISMIQUE, SEPTEMBRE
2012**