

# Rapport Final du Projet RAP 2007

Améliorer la modélisation des effets de site  
dans l'estimation du mouvement sismique  
et de l'aléa sismique

DEI/SARG/2008-043



Systeme de management  
de la qualite IRSN certifie

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT  
ET DE L'INTERVENTION

Service d'analyse des risques liés à la géosphère

|  |   |                 |                      |                     |                             |
|--|---|-----------------|----------------------|---------------------|-----------------------------|
| Demandeur  | Réseau Accélérométrique Permanent (RAP) |                 |                      |                     |                             |
| Référence de la demande  |   |                 |                      |                     |                             |
| Numéro de la fiche programme   |   |                 |                      |                     |                             |
| Processus de rattachement  | R4                                      |                 |                      |                     |                             |
| <p><b>Rapport final du projet RAP 2007 : Améliorer la modélisation des effets de site dans l'estimation du mouvement sismique et de l'aléa sismique</b></p> <p>Bureau d'Evaluation des Risques Sismiques pour la Sûreté des Installations</p> <p>L.F. Bonilla</p> <p>Rapport DEI/SARG/2008-043</p> |   |                 |                      |                     |                             |
|  | Réservé à l'unité                       |                 | Visas pour diffusion |                     |                             |
|  | Auteur(s)                               | Vérificateur(s) | Chef du SARG         | Directeur de la DEI | Directeur Général de l'IRSN |
| Noms   | L.F. Bonilla                            | D. Baumont      | D. GAY               | D. CHAMPION         | J. REPUSSARD                |
| Dates  |   |                 |                      |                     |                             |
| Signatures   |   |                 |                      |                     |                             |

DIFFUSION : Libre  Interne  Limitée

---

---

## RESUME

DANS LE CADRE DE L'APPEL D'OFFRE RAP-2007, L'IRSN, LE BRGM, LE CETE-MEDITERRANEE ET L'UMR GEOSCIENCES AZUR SE SONT ASSOCIES POUR TRAVAILLER SUR DES SUJETS CONCERNANT LES EFFETS DE SITE. CE PROJET COMPORTE DEUX VOLETS : (1) UTILISATION DE LA METHODE « QUARTER WAVELENGTH » POUR LA CARACTERISATION DU SOL SOUS LES STATIONS ACCELEROMETRIQUES RAP AFIN D'ESTIMER L'AMPLIFICATION DU SOL ET DE QUANTIFIER L'INCERTITUDE ASSOCIEE (2) ESTIMATION CONJOINTE DE L'ALEA SISMIQUE PROBABILISTE POUR UN SITE SPECIFIQUE ET DES EFFETS DE SITE.

---

---

## MOTS-CLES

EFFETS DE SITE, RAP

## SOMMAIRE

|  |   |
|--|---|
| 1 INTRODUCTION.....  | 2 |
| 2 UTILISER AU MIEUX LES INFORMATIONS DISPONIBLES SUR LES SITES, EN VUE DE LA PREDICTION EMPIRIQUE DES MOUVEMENTS DU SOL .....              | 2 |
| 3 ESTIMATION DE LA VARIABILITE DE L'AMPLIFICATION : APPLICATION A QUATRE SITES DU RESEAU ACCELEROMETRIQUE PERMANENT DE FRANCE (RAP). ..... | 3 |

# 1 INTRODUCTION

Durant l'année 2007, le Réseau Accélérométrique Permanent (RAP) a fait appel aux chercheurs en France pour recueillir des propositions d'études et de recherche sur le risque sismique. Ainsi, l'IRSN, le BRGM, le CETE Méditerranée et l'UMR Géosciences Azur se sont associés pour travailler ensemble pendant un an sur des sujets concernant les effets de site. Le projet proposé visant à améliorer la modélisation des effets de site dans l'estimation du mouvement sismique et de l'aléa sismique. Ce projet comporte deux volets : (1) Utilisation de la méthode « quarter wavelength » pour la caractérisation du sol sous les stations accélérométriques RAP afin d'estimer l'amplification du sol et de quantifier l'incertitude associée. (2) Variabilité de l'estimation de l'effet de site pour des stations RAP à Nice. Les partenaires associés sont les personnes suivantes :

- IRSN: Fabian Bonilla et Oona Scotti
- BRGM: John Douglas, Pierre Gehl
- CETE: Anne-Marie Duval, Etienne Bertrand et Julie Régnier
- Géosciences Azur: Céline Beauval et Stéphane Gaffet

Fabian Bonilla de l'IRSN a été désigné coordinateur du projet. Le budget dédié par le bureau RAP à ce projet est de 6000 €, montant qui a essentiellement servi à réaliser des réunions techniques entre les partenaires pour discuter de l'avancement et des progrès des différents sujets concernant le projet.

Le présent document constitue le rapport final du projet. Ce travail a permis la réalisation d'une grande partie de la thèse de Mlle Julie Régnier de Master 2 à la Rose School (European School for Advances Studies in Reduction of Seismic Risk), et la soumission de deux articles scientifiques. Ce rapport présente brièvement une synthèse des travaux réalisés. Les articles soumis sont attachés à la fin de ce rapport.

## 2 UTILISER AU MIEUX LES INFORMATIONS DISPONIBLES SUR LES SITES, EN VUE DE LA PREDICTION EMPIRIQUE DES MOUVEMENTS DU SOL

Le mouvement sismique enregistré à certaines stations peut être significativement amplifié en particulier lorsque les stations sont situées sur des sites caractérisés par des couches superficielles à vitesse de cisaillement  $V_s$  particulièrement lente ( $V_s < 300$  m/s) par rapport à celle du substratum rocheux sur lequel elles reposent. La prise en compte de ces amplifications dans l'estimation du mouvement sismique est fondamentale car elles peuvent induire des dommages bien plus importants sur des sites localisés sur des sols « mous » par rapport aux sites situés sur du « rocher ».

La prise en compte des effets de site dans l'établissement des équations empiriques des mouvements forts est aujourd'hui acquise. Pour cela, il est nécessaire d'effectuer une classification des sols selon leur qualité géomécanique. Le critère sur lequel se baser pour établir la classification reste encore un problème. En effet, la caractérisation des propriétés géomécaniques des sols sous chaque site est souvent sommaire voire inexistante. De plus, la classification reste souvent limitée à très peu de catégories: un sol très mou, un sol mou, un sol rigide, un sol très rigide, un rocher. Ceci est dû au fait que l'estimation empirique des mouvements forts nécessite une classification homogène pour tous les types de données et donc le niveau de détail de la classification est contrôlé par les sites les moins

bien renseignés. Si ces classifications sont satisfaisantes pour le calcul des équations empiriques, elles ne sont pas d'une très grande utilité lorsqu'il s'agit de quantifier l'amplification due aux effets de site lithologiques. En effet, dans ce cas, il est nécessaire de connaître au minimum la vitesse de propagation des ondes de cisaillement,  $V_s$ , dans les couches superficielles.

Ce travail présente une nouvelle approche pour prendre en compte les effets de site dans les équations empiriques de prédiction du mouvement sismique, en décrivant les sites de stations accélérométriques par la vitesse des ondes S au quart de la longueur d'onde et en évaluant les incertitudes associées. Cette méthode permet d'utiliser toutes les informations disponibles sur un site donné, telles que la géologie de surface, le profil du sol, les mesures géotechniques (SPT...), la vitesse superficielle estimée par la topographie du sol, la profondeur au rocher ou la structure de la croûte. L'ensemble de ces données permet de contraindre des profils de vitesse physiquement réalistes jusqu'à plusieurs kilomètres de profondeur, en se basant sur une étude statistique de 858 profils réels mesurés dans trois régions (Japon, Côte Ouest des Etats-Unis et France). Cette méthode a été appliquée à 14 stations du Réseau Accélérométrique Permanent (RAP).

Afin d'évaluer des intervalles de confiance pour les profils de vitesse et les amplifications de site qui en découlent, une approche probabiliste a été retenue : plusieurs milliers de profils synthétiques sont générés aléatoirement à partir des paramètres obtenus par l'analyse statistique des profils réels, ainsi que des contraintes (informations connues) propres à chaque station. L'approximation du quart de longueur d'onde permet alors de calculer l'amplification inhérente à chaque station. Il en découle qu'une bonne connaissance de l'atténuation en surface (facteurs  $\kappa$  ou  $Q$ ) est nécessaire pour obtenir une estimation précise de l'amplification dans le domaine des hautes fréquences. La méthode présentée ici met tout en même en évidence des différences importantes dans les incertitudes relatives à l'amplification, selon la quantité d'information disponible pour une station donnée. Ces résultats pourraient alors être utilisés pour développer des lois d'atténuation en pondérant les enregistrements issus des stations, en fonction de la variabilité obtenue lors du calcul des vitesses pour différentes longueurs d'onde.

Cette méthode repose sur l'hypothèse que les effets de site locaux sont uniquement monodimensionnels, ce qui est loin d'être le cas, en particulier dans les bassins sédimentaires. Cependant, la plupart des lois d'atténuation ne modélisent que des effets de site 1D, et il ne s'agit pas d'un problème spécifique à cette étude. Enfin, afin d'améliorer cette technique, il serait souhaitable d'utiliser les enregistrements de bruit de fond ou de séismes pour mieux contraindre les profils de vitesse, et accroître ainsi la précision des résultats.

Les résultats de ce travail ont été soumis au Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA).

### **3 ESTIMATION DE LA VARIABILITE DE L'AMPLIFICATION :** **APPLICATION A QUATRE SITES DU RESEAU** **ACCELEROMETRIQUE PERMANENT DE FRANCE (RAP).**

L'estimation probabiliste de l'aléa sismique (Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA) est aujourd'hui une méthodologie de référence pour le dimensionnement des structures. En effet, l'Eurocode 8, le nouveau code de construction parasismique en Europe, est désormais basé sur des études probabilistes. Si le PSHA est la méthodologie de base pour les nouveaux zonages sismiques pour

chaque pays d'Europe, les études d'aléa sismique spécifiques à un site demeurent essentiellement déterministes. Cependant, une étude probabiliste peut être requise dans le cas de bâtiments à intérêt particulier ou « à risque spécial », tels que les hôpitaux, les barrages, les installations nucléaires de base, etc. Lorsque qu'un site particulier est considéré, une étude « site-spécifique » doit être menée. Elle aboutit à un spectre de réponse uniforme (Uniform Hazard Spectrum, UHS), c'est à dire un spectre dont chaque amplitude a la même probabilité d'être dépassée sur une période de temps donnée. Ces études utilisent en général des équations empiriques pour la prédiction du mouvement sismique. De ce fait, la prise en compte des effets de site dans les spectres de réponses découle directement du degré de précision des équations empiriques utilisées (via les coefficients de site).

L'objectif de cette étude est d'estimer la variabilité de l'amplification du signal sismique due aux effets de site. Dans ce but, différentes méthodes de simulations numériques 1D sont mises en œuvre pour modéliser la réponse du sol. La variabilité de l'amplification est évaluée en effectuant des simulations numériques pour différentes combinaisons des paramètres de la colonne de sol et une sélection d'accélérogrammes échelonnés à différents PGA (Peak Ground Accélération). Trois méthodes numériques sont utilisées ; il s'agit de la méthode équivalente linéaire « classique » (EQL), la méthode EQL avec une dépendance du module de cisaillement et de l'amortissement avec la fréquence (AKEQL) et une méthode non linéaire elasto-plastique (NL).

L'étude porte sur 4 sites du Réseau Accélérométrique Permanent (RAP) français. Ces sites sont situés dans la ville de Nice où d'importants effets de site ont été observés. Une étude de sensibilité sur les méthodes numériques montre que les résultats du modèle non linéaire dépendent largement de la série temporelle en entrée quelque soit le niveau du  $PGA_r$  (PGA à la base de la colonne) ; les méthodes équivalente linéaire présentent une sensibilité aux paramètres d'entrée variable suivant la valeur du  $PGA_r$ . La variabilité de l'amplification obtenue pour les trois méthodes numériques est ensuite présentée. Il apparaît que les résultats issus du modèle AKEQL sont très proches de ceux du modèle équivalent linéaire « classique » pour des  $PGA_r$  supérieur à 0.7g. Alors que pour des  $PGA_r$  intermédiaire, le premier modèle dé-amplifie beaucoup moins les hautes fréquences. De plus, quelque soit la méthode numérique, l'écart-type sur l'amplification augmente lorsque le  $PGA_r$  et la fréquence augmentent. En utilisant les précédents résultats, le rapport des spectres de réponse en fonction du  $PGA_r$  a été calculé et intégré dans une étude d'évaluation de l'aléa sismique probabiliste site-spécifique. Finalement, une comparaison avec des données empiriques du RAP montre que les résultats 1D sont une approximation de premier ordre des effets de site à Nice.

Les résultats de ce travail font partie de la thèse de Master 2 de Mlle Julie Regnier et un premier article a été envoyé à la 14th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE) à Pékin (2008).