



Analyse de la base de données de mouvements forts Européenne : dans quelle mesure des effets de sites sont contenus dans cette base ?

Stéphane Drouet* — Marc Nicolas* — Bruno Hernandez*

* CEA DASE/LDG, Risques Sismiques et Géologiques
BP 12, 91680 Bruyères-le-Châtel, France
Bruno.Hernandez@cea.fr

RÉSUMÉ. La base de données attachée au modèle de prédiction des mouvements forts de Berge-Thierry et al. (2003) est analysée en terme d'effet de site. La collecte d'information sur les stations et l'analyse des signaux permettent de mettre en évidence des effets de site. L'influence de ceux-ci sur les prédictions issues du modèle est significative, une corrélation entre le terme de magnitude (légèrement sous-estimé) et les termes de site (légèrement sur-estimés) est mise en évidence, et la variabilité semble sur-estimée.

ABSTRACT. The database used to build the ground-motion prediction model of Berge-Thierry et al. (2003) is analysed with in terms of site effects. New information about the stations is gathered and recordings are analysed, indicating that site effects are present in the database. They have a notable influence on the model, a correlation between the magnitude term (slightly under-estimated) and the site terms (slightly over-estimated) is highlighted, and the variability is over-estimated.

MOTS-CLÉS : base de données de mouvements forts, effets de site, modèle de prédiction, aléa sismique.

KEYWORDS: strong-motion database, site effects, ground-motion prediction, seismic hazard.

1. Introduction

L'aléa sismique pour les Installations Nucléaires de Base est calculé à partir du modèle de prédiction des mouvements forts de Berge-Thierry et al. (2003). Cette étude donne deux jeux de coefficients permettant de calculer l'accélération spectrale en fonction de la magnitude de surface du séisme et de la distance hypocentrale, pour deux conditions de site : rocher et sédiment. La classification est basée sur la valeur de la vitesse moyenne des ondes S sur les 30 derniers mètres (v_{S30}), les sites au rocher étant définis par : $v_{S30} > 800$ m/s, et les sites au sédiment par : $300 < v_{S30} < 800$ m/s. La méthodologie pour calculer l'aléa sismique pour les installations nucléaires de base est définie par la Règle fondamentale de sûreté (RFS 2001-01), qui stipule d'utiliser les coefficients donnés par Berge-Thierry et al. (2003) pour prendre en compte les effets de site, mais précise aussi que dans certains cas (topographie, localisation dans un bassin, $v_{S30} < 300$ m/s, une étude spécifique devra être menée sans pour autant donner d'indications quant à cette étude. L'effet de site dans ces derniers cas est dit « particulier ».

La première question qui se pose est donc de savoir dans quelle mesure des effets de site sont déjà présents dans la base de données ayant servi à construire le modèle de Berge-Thierry et al. (2003). Cette base de données

est un sous-ensemble de la base de données de mouvements forts Européenne (Ambraseys, 2002) en accès libre sur internet. Les informations disponibles pour l'ensemble des stations utilisées dans Berge-Thierry et al. (2003) ont été rassemblées, que se soient les informations de type géologie de surface, topographie, conditions géomorphologiques, localisation du capteur... D'autre part, en plus des enregistrements présents dans la base de données de Berge-Thierry et al. (2003), un ensemble d'enregistrements supplémentaire pour un certain nombre de stations a été collecté, afin d'utiliser des méthodes de type rapports spectraux, et inversions généralisées des termes de source de propagation et de site, pour identifier de potentiels effets de site.

Le couplage de toutes les données décrites ci-dessus montre que des effets de site sont effectivement présents dans la base de données. D'autre part, les coefficients permettant la prédiction du mouvement du sol sont recalculés en tenant compte des informations nouvelles sur les effets de site dans les différentes stations. Les nouveaux coefficients sont sensiblement différents des coefficients originaux, ce qui montre bien que les effets de site ont une influence non négligeable dans le modèle de Berge-Thierry et al. (2003).

2. Présentation de la base de données

La base de données comprend 965 enregistrements (287 au rocher et 678 au sédiment) de séismes Euro-Méditerranéens (83 %) et Californiens (17 %). La gamme de magnitude analysée est comprise entre 4.0 et 7.9, pour des distances hypocentrales entre 4.1 et 332.3 km. La répartition géographique des données est très inhomogène, environ 50 % des données proviennent d'Italie. D'autre part, plus de la moitié des stations ont enregistré un unique séisme, et environ 80 % des stations possèdent trois enregistrements ou moins.

Les informations sur la vitesse moyenne des ondes S sont assez sporadiques pour la zone Euro-Méditerranée alors que la majorité des stations Californiennes sont caractérisées par une mesure directe issue de forage à proximité immédiate de la station. La Figure 1 présente une vue par histogrammes des valeurs de v_{S30} recueillies sur un fond de carte, le code de couleur indique les valeurs inférieures à 300 m/s (blanc), les valeurs entre 300 et 800 m/s (gris), et les valeurs supérieures à 800 m/s (noir).

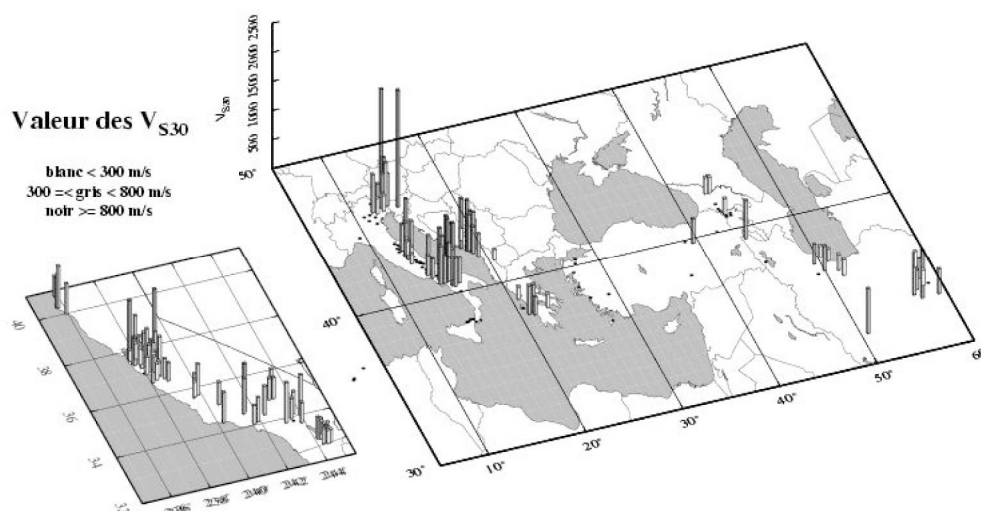


Figure 1. Valeurs de v_{S30} pour les stations présentes dans la RFS sous forme d'histogrammes. Le code de couleur blanc, gris, noir est fonction de la valeur de v_{S30} , et les stations pour lesquelles l'information n'est pas disponible sont représentées par les points noirs.

Au total, 51 % des enregistrements Euro-Méditerranéennes et 97 % des enregistrements Californiens sont associés à des stations caractérisées par une valeur de v_{S30} . Parmi les enregistrements au rocher caractérisés par une v_{S30} , 70 % sont caractérisés par une valeur de v_{S30} inférieure à 800 m/s et seulement 30 % par une valeur de v_{S30} supérieure à 800 m/s pour l’Euro-Méditerranée, et pour la Californie, ces valeurs sont 63 % et 37 %. Parmi les enregistrements au sédiment caractérisés par une v_{S30} , 41 % sont associées à une v_{S30} inférieure à 300 m/s, 7 % à une v_{S30} supérieure à 800 m/s, et 52 % à une v_{S30} entre 300 et 800 m/s pour l’Euro-Méditerranée, et pour la Californie, 46 %, 1 %, et 53 % respectivement. En conclusion, des erreurs de classification semblent assez fréquentes, et un nombre non négligeable de stations (avec $v_{S30} < 300$ m/s) ne devrait pas être pris en compte selon la réglementation.

3. Exemple d’étude sur la région de Colfiorito

Une proportion importante de données contenues dans la base est issue de la crise sismique de l’Umbria-Marche qui a débuté en septembre 1997 dans le centre de l’Italie. Nous illustrons l’étude menée sur cet exemple, et plus particulièrement sur 6 stations la région de Colfiorito (Table 1).

Table 1. Stations de la région de Colfiorito.

Nom	Latitude	Longitude	Condition	Géologie (d’après Luzi et al., 2005)
Colfiorito	43.037	12.921	Sédiment	Dépôts alluvionnaires et lacustres (>30 m)
Colfiorito Casernette	43.028	12.900	Sédiment	Dépôts alluvionnaires et lacustres (>30 m)
Nocera Umbra	43.113	12.785	Rocher	Dépôts colluviaux (3 à 10 m)
Nocera Umbra 2	43.113	12.785	Rocher	Dépôts colluviaux (3 à 10 m)
Nocera Umbra Biscontini	43.103	12.805	Rocher	Dépôts colluviaux (3 à 10 m)
Nocera Umbra Salmata	43.149	12.797	Sédiment	Dépôts alluvionnaires et lacustres (10 à 30 m)

3.1. Inversion source, propagation, site

L’ensemble des données relatives à la crise de l’Umbria-Marche est distribué sous forme de CD (S.S.N.-Monitoring System Group, 2002). Nous avons utilisé ces données pour effectuer une inversion simultanée des termes de source, de propagation et de site (Drouet et al., 2007) pour l’ensemble des stations de cette région. 21 séismes et 26 stations sont analysés, et les résultats concernant les paramètres d’atténuation et de source sont compatibles avec les études antérieures (Castro et al., 2004).

Les réponses de site horizontales et verticales obtenues pour les 6 stations de la Table 1 sont représentées sur la Figure 1 sur un fond topographique où sont localisées les stations. Malgré l’homogénéité de la géologie décrite dans la Table 1, les réponses de site sont très différentes d’une station à l’autre. Nous remarquons les fortes amplifications autour de 7-8 Hz pour les stations Nocera Umbra, Nocera Umbra 2, et Nocera Umbra Biscontini. D’autre part, la station Colfiorito présente une amplification importante autour de 1 Hz déjà mise en évidence par de nombreux auteurs alors que la station Colfiorito Casernette située à proximité dans le même bassin mais plus proche de la bordure ne présente pas d’amplification particulière. Enfin, la station Nocera Umbra Salmata présente une réponse de site quasi-plate que ce soit sur la composante horizontale ou verticale, suggérant l’absence d’effet de site à cette station.

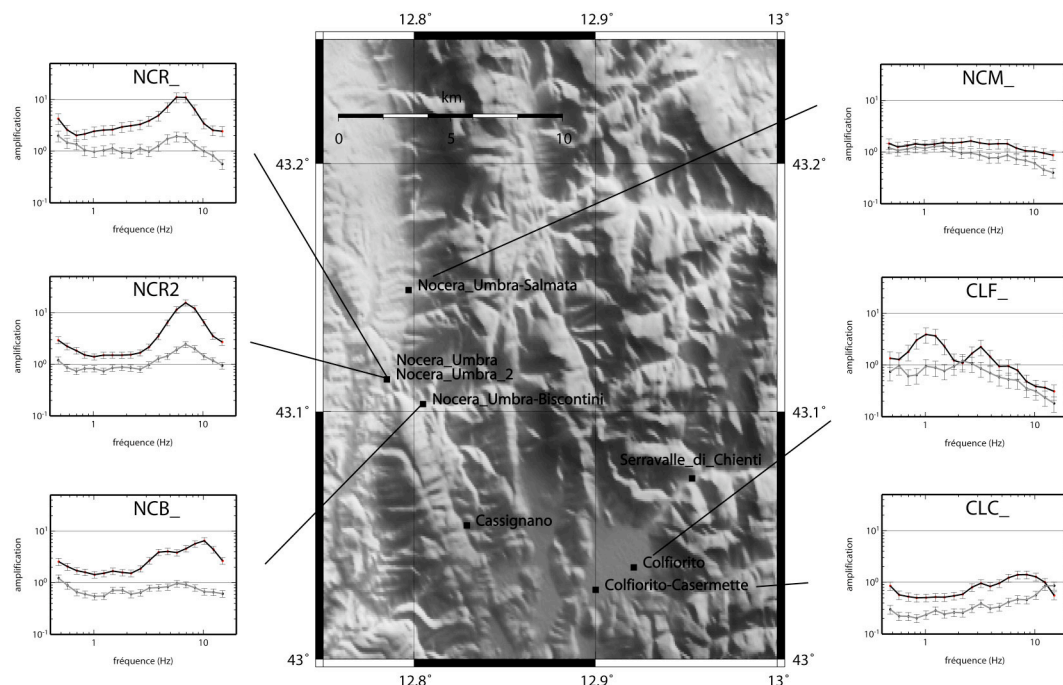


Figure 2. Fonctions de site horizontales (noir) et verticales (gris) déterminées par inversion pour la région de Colfiorito.

Pour les stations pour lesquelles le jeu de données n'était pas suffisant pour une telle inversion, les fonctions de site obtenues à partir de rapports spectraux H/V ont été analysées.

3.2. Forme des spectres de réponse

Une autre information relativement facile à obtenir vient de la forme des spectres de réponses normalisés par le pga. En effet, Seed et al. (1976) montrent une corrélation entre la forme des spectres de réponses normalisés, en fonction de la période, et le type de sol sur lequel est installée la station. Les stations sur des sols meubles présentent un élargissement vers les grandes périodes du spectre de réponse.

La Figure 3 montre toujours pour les 6 stations de la région de Colfiorito, la forme des spectres de réponse en fonction de la période. Les trois stations Nocera Umbra, Nocera Umbra 2, et Nocera Umbra Biscontini présentent une forme étroite, compatible avec une classification de type « rock soil » ou « stiff soil » d'après les résultats de Seed et al. (1976). Les spectres pour stations Nocera Umbra Salmata et Colfiorito Casernette sont un peu moins étroits que pour les stations précédentes, mais la forme reste toujours compatible avec un type « stiff soil », la différence entre cette catégorie, et le « rock » étant difficile à mettre en évidence. Enfin, pour la station de Colfiorito située au milieu du bassin, nous observons un élargissement conséquent du spectres, et l'apparition d'un pic secondaire autour de 1 Hz, confirmant les résultats précédents.

Cette méthode permet donc principalement d'identifier les stations sur des sols très meubles, ou la forme du spectre de réponse est fortement modifiée, en particulier vers les grandes périodes (i.e. basses fréquences).

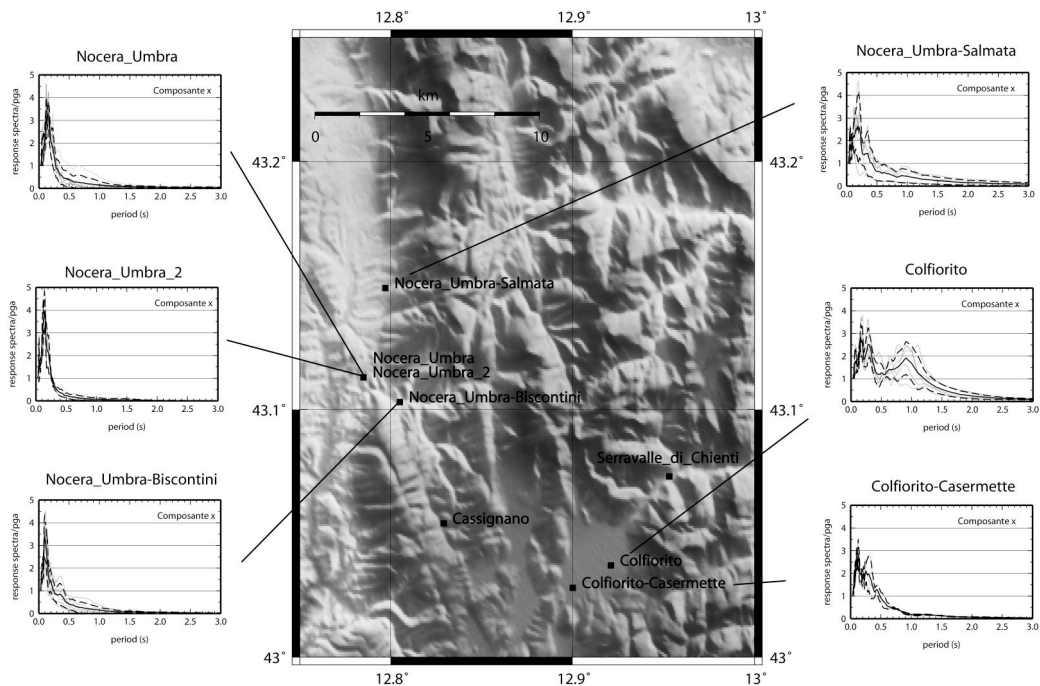


Figure 3. *Forme des spectres de réponse normalisés par le pga (traits gris) et moyenne plus ou moins un écart-type (trait plein et discontinus noirs) pour la région de Colfiorito.*

3.3. Comparaison des amplitudes spectrales observées et prédites

Finalement, pour les 6 stations, nous avons comparé les amplitudes spectrales observées pour l'ensemble des séismes qu'elles ont enregistré, et les amplitudes prédites par le modèle de Berge-Thierry et al. (2003), en tenant compte de la magnitude de l'événement, de la distance et de la condition de site indiquée dans la Table 1. La Figure 4 montre les différences entre les logarithmes des amplitudes spectrales observées et prédites pour les 6 stations en fonction de la fréquence. Nous pouvons remarquer que la forme de ces résidus est similaire à la forme des fonctions de site représentées dans la Figure 2. Ceci suggère que la réponse de site est assez mal prise en compte par le modèle. En effet, la séparation des stations en deux classes ne permet pas de prendre en compte les variations fréquentielles des effets de site. D'autre part, les stations classées au rocher dans la Table 1, montrent des amplifications importantes en particulier à haute fréquence, ce qui résulte en des résidus assez importants surtout à haute fréquence et du même ordre de grandeur que les résidus observés à la station Colfiorito située dans un bassin relativement profond et qui engendre une résonance à 1 Hz observable sur les Figures 2, 3, et 4.

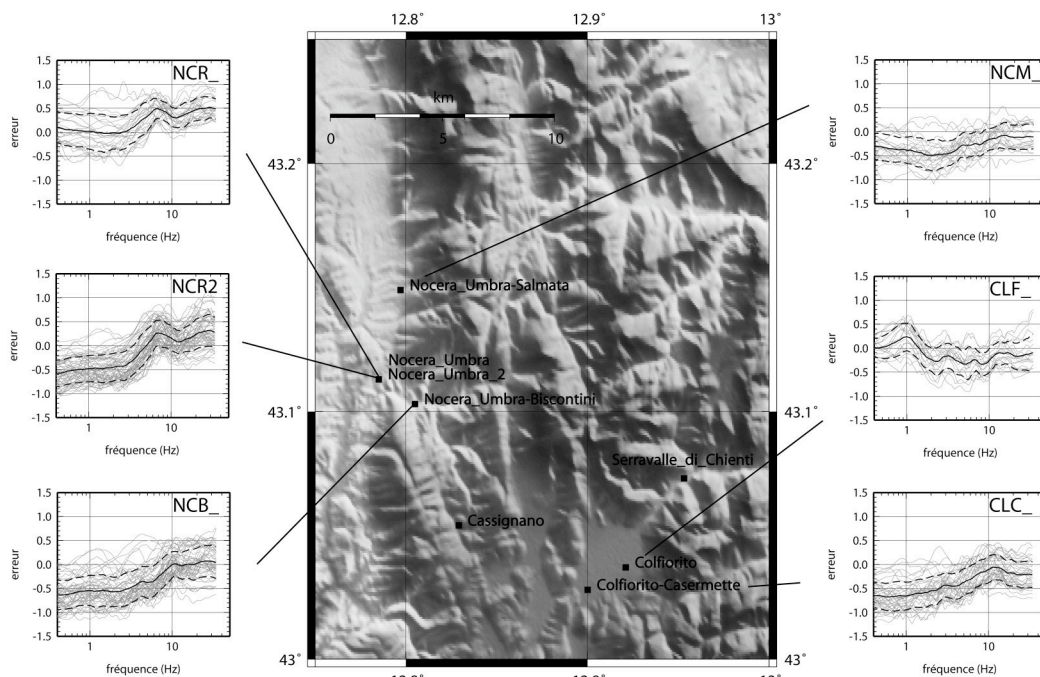


Figure 4. Différences entre l'accélération spectrale observée et celle prédite par le modèle de Berge-Thierry et al. (2003) (traits gris) et moyenne plus ou moins un écart-type (trait plein et discontinus noirs) pour la région de Colfiorito.

4. Calcul de nouveaux coefficients

Comme illustré dans les paragraphes précédents, nous avons essayé de caractériser au mieux les stations présentes dans la base de données en fonction des valeurs de v_{S30} issues de la littérature, et des analyses de fonctions de site que nous avons menées. Cela nous a conduit à construire une nouvelle liste de données pour lesquelles ces informations étaient disponibles, en supprimant les stations correspondant à des v_{S30} inférieures à 300 m/s, en reclassant certaines stations qui étaient incluses dans des classes ne correspondant pas aux valeurs de v_{S30} , et en tenant compte des amplifications observées. A partir de cette nouvelle liste de données correspondant à environ 1/3 de la liste originale, nous avons recalculé les coefficients du modèle de Berge-Thierry et al. (2003).

Ce modèle est basé sur la forme suivante :

$$\log_{10}(SA(f)) = a(f) \times M + b(f) \times R - \log_{10}(R) + c_{1-2}(f) \quad [1]$$

avec $SA(f)$ l'amplitude spectrale à la fréquence f , M la magnitude de surface, R la distance hypocentrale, et $c_1(f)$, $c_2(f)$ les coefficients de site correspondant au rocher et au sédiment, respectivement. La Figure 5 montre les coefficients originaux de Berge-Thierry et al. (2003) obtenus par régression à partir de la base de données complète, et ceux obtenus par régression à partir de la base de données que nous avons modifiée.

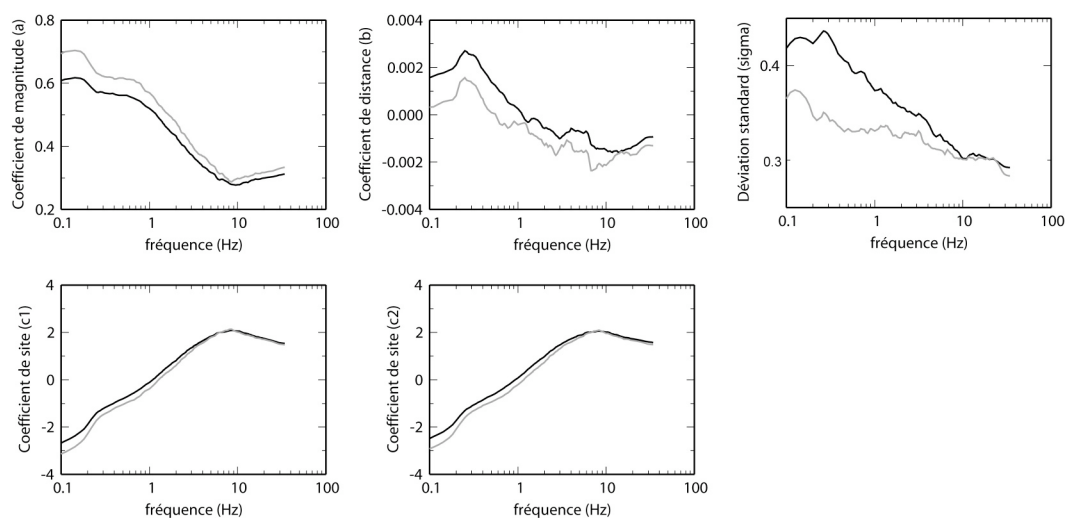


Figure 5. Comparaison entre les coefficients du modèle original de Berge-Thierry et al. (2003) (en noir), et les coefficients recalculés en incluant les informations de site nouvelles (en gris).

Nous observons sur la Figure 5 des variations relativement importantes des coefficients $a(f)$, $b(f)$, $c_1(f)$, et $c_2(f)$, ainsi que pour la déviation standard (σ). Le terme de magnitude, légèrement sous-estimé est corrélé avec les termes de site, légèrement sur-estimés. D'autre part, la variabilité semble sur-estimée. Ces variations de coefficients conduisent à des estimations des spectres de réponse différentes, en particulier pour les séismes forts à courte distance et les séismes faibles à grande distance. Pour les fortes magnitudes et les faibles distances, les nouvelles prédictions semblent supérieures aux prédictions originales, alors qu'elles semblent inférieures pour les faibles magnitudes et les grandes distances. Cependant, ces conclusions restent préliminaire car la base de données mise à jour contient peu d'enregistrements.

5. Conclusion

Nous avons étudié l'influence des effets de site dans la base de données associée au modèle de prédiction de Berge-Thierry et al. (2003), qui est un sous-ensemble de la base de données de mouvements forts Européenne (Ambraseys, 2002). Pour cela nous avons collecté l'ensemble des informations décrivant les stations d'enregistrement : conditions géologiques, localisation géomorphologique, profil de vitesse et v_{S30} ... Nous avons aussi étudié les effets de site à ces stations via différentes méthodes à partir des signaux : rapports spectraux H/V, inversion des termes de source, de propagation et de site, ou encore forme des spectres de réponse.

Cette étude montre que des effets de site sont déjà présents dans les données. En particulier, beaucoup de stations sont associées à des v_{S30} très faibles (<300 m/s) dans toute la base de données et particulièrement pour les données Californiennes. D'autre part, de nombreux enregistrements sont issus d'Italie, dans des contextes montagneux, en présence de bassins sédimentaires qui produisent des amplifications basse fréquence (i.e. exemple de Colfiorito). Enfin cette analyse met en relief le problème de la valeur moyenne du spectre de réponse prédit. En effet, des stations situées sur des rochers compétents, présente en générale des amplitudes spectrales plus faibles que celle prédite par le modèle. Ainsi, la prédiction moyenne au rocher est plutôt représentative d'un rocher plus ou moins altéré. Ceci pose donc le problème de la prise en compte des effets de site à partir d'un mouvement de référence.

Finale­ment, nous avons amélioré la classification originale rocher-sédiment proposée par Berge-Thierry et al. (2003), en tenant compte des nouvelles informations relatives aux stations d'enregistrement, afin de recalculer les coefficients du modèle de prédiction. Nous avons ainsi mis en évidence une corrélation entre les termes de magnitude et de site, et montré que la variabilité semble sur-estimée. Ces nouveaux coefficients conduiraient à penser que les amplitudes prédites pour les forts séismes à courte distance sont légèrement sous-estimées par le modèle original, et à l'inverse, les mouvements attendus pour les faibles magnitudes à grande distance semblent surestimées. Cependant une collecte de nouvelles données, avec des informations plus fiables sur les localisations des événements et des stations, ainsi que sur la caractérisation des conditions de station permettrait de vérifier ces conclusions.

12. Bibliographie

- Ambraseys N., Smit P., Sigbjornsson R., Suhadolc P., Margaris B., Internet-Site for European Strong-Motion Data, European Commission, Research-Directorate General, Environment and Climate Programme, 2002.
- Berge-Thierry C., Cotton F., Scotti O., Griot-Pommer D.A., Fukushima Y., « New empirical response spectral attenuation laws for moderate European earthquakes », *J. Earthquake Eng.*, vol. 7, 2003, p. 193-222.
- Castro R.R., Pacor F., Bindi D., Francheschina G., Luzi L., « Site response of strong motion stations in the Umbria, Central Italy, region », *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 94, n° 2, 2004, p. 576-590.
- Drouet S., Chevrot S., Cotton F., Souriau A., « Simultaneous inversion of source spectra, attenuation parameters and site responses. Application to the data of the French accelerometric network », *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2007, in revision.
- Luzi L., Bindi D., Francheschina G., Pacor F., Castro R.R., « Geotechnical site characterisation in the Umbria-Marche area and evaluation of earthquake site-response », *Pure Appl. Geophys.*, vol. 162, 2005, p. 2133-2161.
- RFS 2001-01, Règle Fondamentale de Sûreté relative à la détermination du risque sismique pour la sûreté des installations nucléaires de base de surface.
- Seed H.B., Ugas C., Lysmer J., « Site-dependent spectra for earthquake-resistant design », *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 66, 1976, p. 221-243.
- S.S.N.-Monitoring System Group, The Strong Motion Records of Umbria-Marche Sequence, (September 1997 – June 1998), CD-ROM, 2002.