Cartes de mouvement du sol (Shakemaps) transfrontalières pour les Pyrénées: paramètres de régionalisation et procédure de réponse rapide.

Didier Bertil, Eduard Nus, Jose-Antonio Jara, Samuel Auclair, Colas Bastien, Thomas Dewez, Xavier Goula, Teresa Susagna, Marie Calvet, Luis Cabañas

▶ **To cite this version:**

Didier Bertil, Eduard Nus, Jose-Antonio Jara, Samuel Auclair, Colas Bastien, et al.. Cartes de mouvement du sol (Shakemaps) transfrontalières pour les Pyrénées: paramètres de régionalisation et procédure de réponse rapide.. 8ème colloque AFPS, Vers une maitrise durable du risque sismique, Sep 2011, Champs-sur-Marne, France. 8 p. hal-00613219

HAL Id: hal-00613219
https://brgm.hal.science/hal-00613219

Submitted on 3 Aug 2011

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.

Cartes de mouvement du sol (Shakemaps) transfrontalières pour les Pyrénées: paramètres de régionalisation et procédure de réponse rapide.

Didier Bertil*, Eduard Nus**, Jose Antonio Jara***, Samuel Auclair*, Bastien Colas****, Thomas Dewez*, Xavier Goula**, Teresa Susagna**, Marie Calvet***** et Luis Cabañas******

*BRGM, Service Risques Naturels et Sécurité du Stockage de CO2, 3, avenue C. Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2. d.bertil@brgm.fr

**Institut Geològic de Catalunya, C/Balmes, 209-211, 08006 Barcelona, Espagne

***Gestió de Projectes SA (Geocat), Av. Josep Tarradellas 34-36, 3a planta, 08029 Barcelona, Espagne

****BRGM - SGR Languedoc Roussillon, 1039 rue de Pinville, 34000 Montpellier, France

*****Observatoire Midi Pyrénées (OMP), 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

******Instituto Geográfico Nacional, C/General Ibáñez de 'Ibero 3, 28003 Madrid, Espagne

RÉSUMÉ. *Le projet Interreg SISPYR prévoit la production automatique de cartes de mouvements du sol en réponse rapide pour les séismes pyrénéens de magnitude > 3. Pour l'adaptation régionale du logiciel ShakeMap v3.5, les équations prédictives de mouvement du sol, d'intensité et de conversion mouvements du sol/intensité sont confrontées aux données régionales d'observations pour le choix des relations à utiliser. Une carte simplifiée des types de sols en classes EC8 est élaborée à partir des informations géologiques/géotechniques pour transcription en carte de Vs30. L'uniformisation et le renforcement des réseaux permettront l'utilisation en quasi temps-réel de plus de 50 stations sismiques transfrontalières. La procédure automatisée permet la réalisation de cartes ShakeMaps en réponse rapide (quelques minutes) et de cartes différées sur données d'entrées validées.*

ABSTRACT. *The Interreg SISPYR project proposes to provide automatic generation of ground motion maps in rapid response for Pyrenean earthquakes with magnitude > 3. For regional adaptation of Shakemap v3.5 software, predictive equations of ground motion, intensity and ground motion/intensity conversions are compared with observational data for the selection of relations to use. A simplified map of EC8 soil types is developed from the geological / geotechnical data before transcription on Vs30 map. More than 50 seismic stations with real time transmission will be available for ShakeMap process. The automated procedure allows the production of Near Real Time ShakeMaps (few minutes) and delayed maps with validated input data.*

MOTS-CLÉS : *mouvement du sol, intensité, effets de site, réponse rapide, Pyrénées*

KEYWORDS: *ground motion, intensity, site effects, rapid response, Pyrenees*

1. Introduction

Le projet Interreg SISPYR prévoit la production automatique de cartes de mouvements du sol en réponse rapide pour les séismes pyrénéens de magnitude supérieure à 3. La procédure utilise le logiciel ShakeMap v3.5 de l'USGS. Les cartes seront générées pour 6 paramètres de mouvement du sol : les accélérations et vitesses maximales PGA, PGV, les accélérations spectrales (SA) aux périodes 0.2s, 1 et 2s et l'intensité macrosismique.

Une adaptation régionale est nécessaire pour implémenter cet outil ShakeMap pour les Pyrénées. Cela consiste, d'une part, à définir les relations empiriques à utiliser: équations de prédiction de mouvements du Sol (ou **GMPE** Ground Motion Prediction Equation), équations de prédiction d'intensité (**IPE** Intensity Prediction Equation) et équations de conversions entre mouvement du sol et intensité (**GMICE** Ground Motion Intensity Conversion Equation). La prise en compte des effets de site nécessite, d'autre part, de définir des cartes de conditions de site pour calculer les amplifications.

L'outil ShakeMap est intégré à un système de transfert de données temps-réel et quasi-temps réel permettant son utilisation en réponse rapide selon une procédure automatique que nous présentons ici

2. Adaptation régionale

2.1 Base de données

Les intensités macrosismiques ainsi que les enregistrements accélérométriques et vélocimétriques ont été collectées côté français et espagnol et regroupées au sein d'une base de données. Les intensités proviennent de la base de données française SISFRANCE (13000 valeurs), de l'IGC en Catalogne (5000 valeurs) complétées par des données de l'IGN (170 valeurs). Les données de mouvements du sol utilisées pour cette étude proviennent du Réseau Accélérométrique Permanent (RAP) en France, de l'IGN et l'IGC en Espagne. Une fois filtrés les enregistrements présentant des niveaux d'accélérations suffisamment importants pour être corrélables à des valeurs d'intensité macrosismique, la base contient 2200 enregistrements (3 composantes) correspondant à 72 séismes pyrénéens de magnitude $3 \leq Ml_{IGN} \leq 4.5$. (Figure 1)

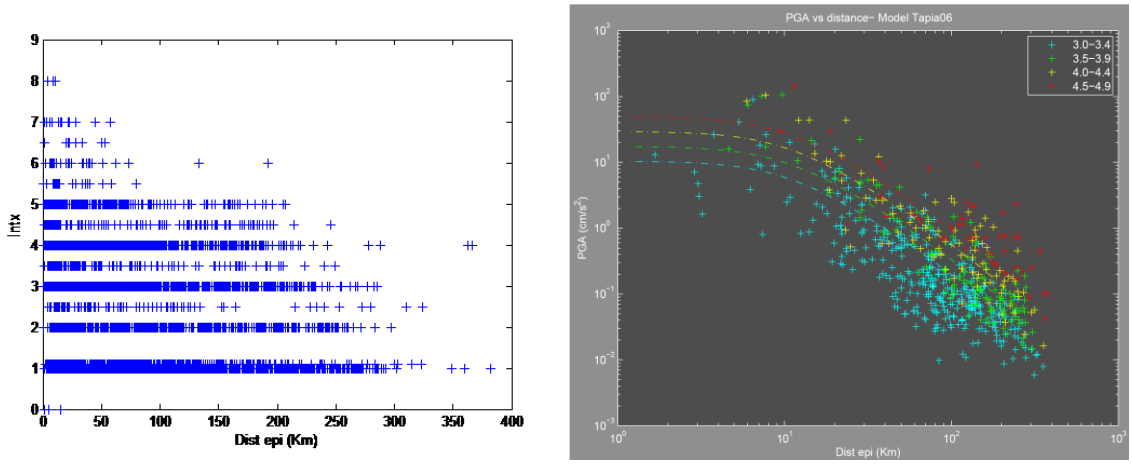

Figure 1. *Données macrosismiques et instrumentales disponibles pour les Pyrénées en fonction de la distance : à gauche données d'intensité, à droite données de PGA. Les lignes en tireté montrent en comparaison le modèle Tapia (2006) pour des magnitudes de 3 à 4.9.*

2.2 GMPE

Les paramètres PGA, PGV et SA 0.2, 1.0 et 2.0s sont calculés à partir des enregistrements des signaux numériques. Ils sont ensuite confrontés à une douzaine de GMPE spécifiques du contexte français ou espagnole ou plus générales, applicables au contexte sismotectonique régional. La sélection et le classement de ces relations (Figure 2) sont effectués en utilisant une méthode similaire à celle de Sherbaum et al. (2004). Pour chaque données, des résidus entre les valeurs observées et prédites des paramètres de mouvement du sol sont calculés. Deux types de résidus Y et Z sont pris en compte selon les formules suivantes :

$$Z = \frac{\log(PGM_{observed}) - \log(PGM_{predicted})}{\sigma_{model}} \qquad Y = \log(PGM_{observed}) - \log(PGM_{predicted})$$

Les classements avec des rangs de 1 à 4 sont attribués selon des critères pris sur plusieurs paramètres statistiques appliqués à ces résidus Y et Z. Les résultats sont illustrés sur la Figure 2. Compte tenu de ce classement, la relation de Tapia (2006) est celle qui sera choisie pour les évaluations de PGA et SA des séismes de magnitude ≤ 4.5 alors que la relation Akkar et Bommer (2007) lui sera préférée pour le PGV.

Pour les séismes de magnitude > 5du fait que nous ne disposions pas de suffisamment de données pour appliquer ce type de méthode, il est proposé d'utiliser la relation d'Akkar et Bommer (2010). D'une part, cette relation est définie avec des données européennes pour des gammes de magnitudes 5.0-7.6. D'autre part, il s'agit d'une actualisation de la relation d'Akkar et Bommer (2010) proposée et utilisée dans des projets antérieurs (NERIES).

Code	PGA		PGV		PSA 0.2 s		PSA 1.0s		PSA 2.0s	
	Z rank	Y rank	Z rank	Y rank	Z rank	Y rank	Z rank	Y rank	Z rank	Y rank
Lusetal01	4	4	-	-	4	4	4	4	4	3
Beretal03	4	4	-	-	4	4	4	4	4	4
Maretal04	4	4	-	-	-	-	-	-	-	-
Ambetal05	4	4	-	-	4	4	4	4	4	4
BraaSle05	4	4	4	4	4	3	3	2	3	3
Tapia06	1	2	-	-	3	2	1	2	2	2
Souria106	4	3	-	-	-	-	-	-	-	-
Souria206	4	3	-	-	-	-	-	-	-	-
AkaaBom07	1	2	1	2	4	4	2	3	4	4
Mezetal08	4	4	-	-	-	-	-	-	-	-
Masetal08	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
AkaaBom10	3	2	3	2	4	3	3	2	2	2
Quitori99	3	2	2	2	-	-	2	2	-	-

Figure 2. *Résultats de classement des GMPE pour chaque paramètre de mouvement du sol*

2.3 IPE

Concernant les IPE une analyse similaire est actuellement en cours pour les principales équations existantes de la péninsule ibérique (Gómez et Batlló, 2008), des Pyrénées (Secanell, 2008; Bakun et Scotti, 2006 ; Souriau, 2006) et internationales (Atkinson et Wald, 2007). Au moment de la rédaction de ce résumé, les résultats ne sont pas encore disponibles.

2.4 GMICE

Le croisement entre observations instrumentales et macrosismiques a été réalisé par événement en regroupant les données par communes. Ces regroupements nécessaires induisent des incertitudes supplémentaires du fait qu'il n'y a généralement pas d'observations d'intensité ponctuelle directement corrélables avec un site de station sismique. Les observations comparables concernent alors seulement 46 points d'intensité supérieure ou égale à III dont quelques points pour une intensité maximale de VI.

La liste des équations testées est issue des compilations d'Auclair et Rey (2009). Des résultats préliminaires montrent que la relation de Kaka et Atkinson (2004) donne des résultats acceptables pour les intensités III à V

(Figure 3). Pour les intensités plus fortes et faute de données instrumentales, il n'y a pas de croisement instrumental/macrosismique possible pour la région. D'autres critères de choix doivent par conséquent être trouvés.

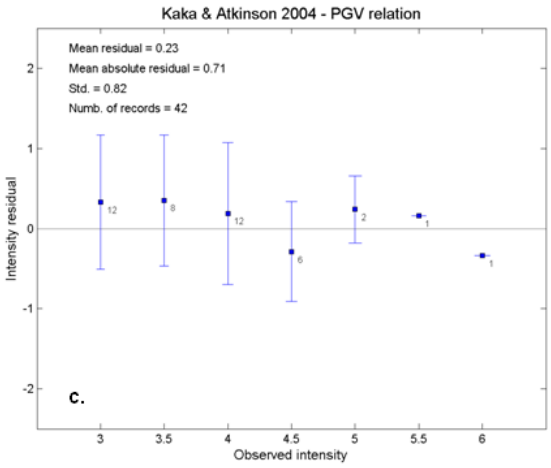

Figure 3. *Résidus d'intensité (observé – calculé) pour le calcul d'intensité avec le PGV et la relation Kaka et Atkinson (2004).*

2.5 Carte de condition de site

La prise en compte des effets de site dans les ShakeMaps repose sur une carte des sols exprimée en Vs_{30} et sur des coefficients d'amplifications définis par Borcherdt (1994) à appliquer au PGA et PGV en fonction de Vs_{30}.

La méthode de calcul de Vs_{30} à partir des critères de pente topographique selon la méthode d'Allen et Wald (2009) n'est pas satisfaisant selon les analyses effectuées à l'échelle régionale sur la France par Roullé et al.(2010). Par conséquent, une approche plus complexe par la méthode d'Iwahashi et al. (2010) a été testée. L'évaluation de Vs_{30} se fait alors par des critères de pente, d'altitude et de texture. Les résultats préliminaires ne sont pas non plus concluants avec des Vs_{30} équivalents à des sols de classe B et C (EC8) sur l'ensemble des Pyrénées. Une approche selon des critères géologiques et géotechniques est donc privilégiée.

Tout d'abord, une classification des principales unités lithologiques superficielles est effectuée par simplification et croisement de la carte géologique BRGM-IGME (2009a) et celle des formations quaternaires BRGM-IGME (2009b) à l'échelle1 :400 000. On distingue 5 types de formations HR (rocher dur), SR (rocher), SRa (Rocher altéré), SS (Sol mou), VSS (Sol très mou). Cette classification est ensuite étendue en tenant compte des types de formations sous-jacentes (Figure 4) puis des gammes d'épaisseurs possibles. Enfin ces colonnes de sols sont rapprochées des caractéristiques des classes de sols EC8. La qualification des lithologies et l'interprétation en classes de sol sont affinées en utilisant les données de forages géotechniques disponibles dans les Pyrénées (plus de 5000 points) et en comparant avec les microzonages sismiques existants dans la région ou en cours de réalisation avec le projet Sispyr. La transcription en carte de Vs_{30} est l'étape finale de la procédure.

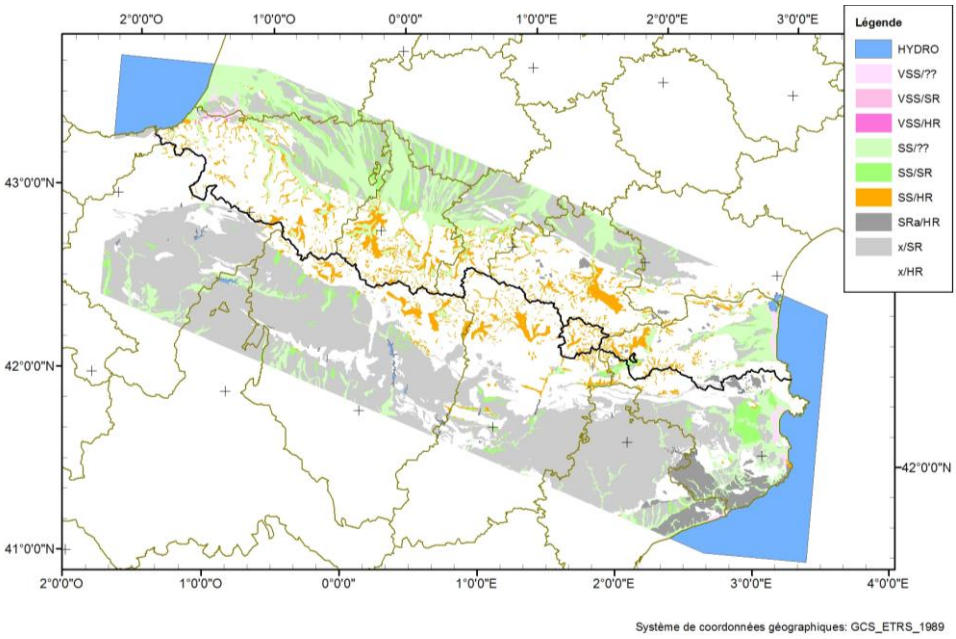

Figure 4. *Carte simplifiée des formations lithologiques pour les Pyrénées.*

3. Procédure de réponse rapide

3.1 Système de transfert de données quasi-temps réel

Sispyr prévoit le renforcement et l'homogénéisation du réseau sismique transfrontalier avec la mise en place de transmission temps-réel de stations existantes et la création de nouvelles stations large bande ou accélérométriques. Lorsque le déploiement sera terminé, les organismes participant au projet (BRGM, IGN, IGC et OMP) se partageront plus de 50 stations avec transmission en temps réel via satellite ou internet (Figure 5).

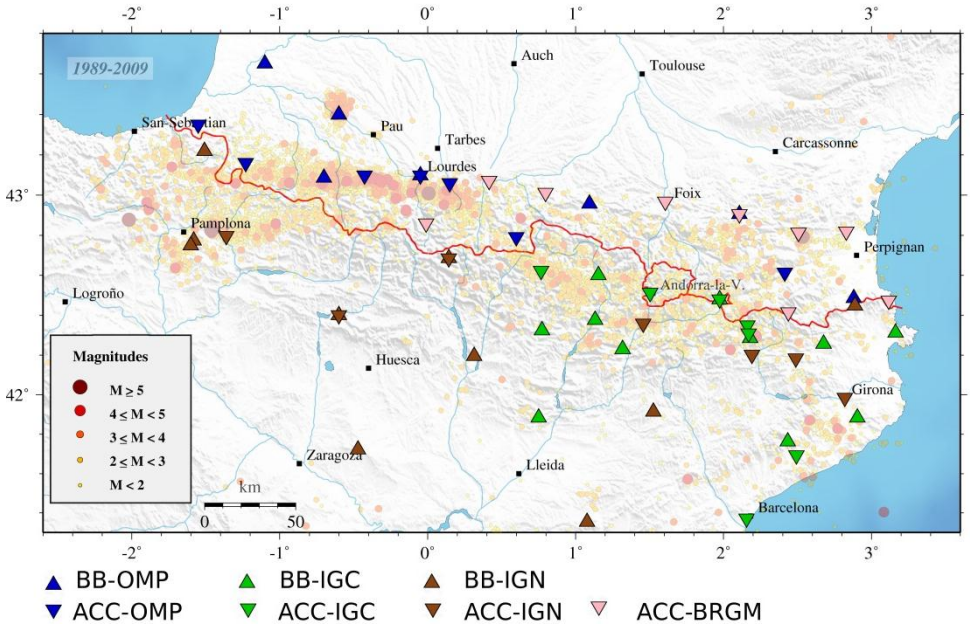

Figure 5. *Stations Large Bande ou accélérométriques qui seront transmises en temps réel en fin de projet Sispyr*

Pour minimiser le temps de réalisation des cartes de ShakeMap, il est nécessaire d'avoir un accès rapide à l'ensemble des données. Les signaux des stations sont donc transmis vers un centre de données unique où les enregistrements des stations sont partagés et accessibles en quasi temps-réel (NRT) pour les organismes du projet. Un serveur NRT est donc en cours de mise en place. Un logiciel spécifique a été développé (Arturo et al., 2010) pour gérer la réception et le stockage des formes d'ondes provenant des stations et l'accès de façon permanente et en NRT à ces informations partagées (Figure 6). Le stockage se fait sur une mémoire tampon pouvant stocker 24 heures de signal continu. Les requêtes d'extraction permettent de fournir pour chaque station et composante 180 s de signal au format mini-seed.

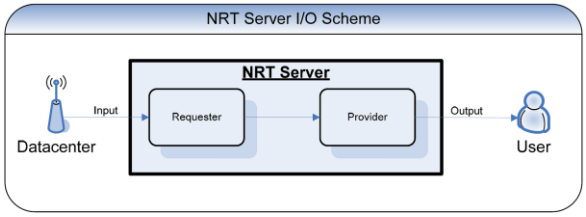

Figure 6. *Schéma du processus de réception/transmission des données au travers du serveur*

3.2 Procédure de ShakeMap en réponse rapide

La génération des cartes ShakeMap est déclenchée pour les séismes des Pyrénées de magnitude Ml≥3. La détection, la localisation et l'estimation de magnitude sont fournis et transmis de façon automatique par l'IGN.

La procédure prévoit, dès réception du message de détection de séisme, de lancer des scripts permettant:

- l'interrogation du serveur NRT pour extraire les signaux des stations ;

- le calcul des paramètres de mouvements du sol de chaque enregistrement ;
- la lecture le cas échéant de données d'intensité macrosismiques transmis par chaque organisme ;
- le formatage en XML des données d'entrées pour la lecture par le logiciel ;
- l'exécution du programme ShakeMap pour produire les cartes ;
- la transmission des cartes produites sur un site ftp interrogé régulièrement pour alimenter le site Web du projet (www.sispyr.eu) où ces cartes seront affichées.

Les cartes sont construites avec le logiciel libre GMT.

Le processus se fait automatiquement à différents moments pour inclure différents types de données. La première carte est produite en quasi temps-réel (quelques minutes) avec la localisation automatique et les premiers enregistrements disponibles. Une seconde carte, entre 30 minutes et deux heures après le séisme, peut être complétée par les intensités automatiques (données d'intensité provenant d'interprétations automatiques de questionnaires). Enfin la troisième carte est réalisée avec toutes les données instrumentales et d'intensité disponible et avec la dernière localisation et magnitude révisée.

Préalablement à la mise en place de la procédure, des tests sont en cours pour valider les choix de régionalisation sur quelques exemples de séismes.

La principale spécificité de cette version 3.5 de ShakeMap est de permettre l'utilisation d'intensité macrosismique en données d'entrée. En cas de séisme, les données interprétées en intensité seraient rassemblées sur un site ftp commun interrogeable par le système de ShakeMap. Des conventions de partage sont proposées aux agences produisant ce type de données.

4. Conclusions

Au moment de la rédaction de ce résumé, les paramètres de régionalisation sont toujours en cours d'étude ou de validation. La procédure de réponse rapide et le serveur NRT ne sont pas encore opérationnels. Les résultats présentés ici sont donc préliminaires.

Les données instrumentales et macrosismiques rassemblées sur les Pyrénées permettent de classer et choisir les relations GMPE, IPE et GMICE utilisables pour les séismes faibles à modérés ($Ml < 5$ et intensités $\leq$ V). Pour les séismes forts, le choix ne peut plus se faire par rapport aux données régionales qui sont alors insuffisantes.

La carte de condition de site permettant le calcul des effets est basée sur le croisement des données géologiques et géotechniques plutôt que sur les méthodes de calculs de Vs_{30} reposant sur les pentes topographiques. Ces dernières donnent, pour les Pyrénées et à l'échelle utilisée, des gammes de Vs_{30} trop restreintes par rapport à ce qu'on peut attendre des formations lithologiques présentes.

Le nombre de stations sismologiques qui seront partagés en quasi temps-réel est suffisant pour une utilisation de la ShakeMap couvrant l'ensemble des Pyrénées, bien qu'il existe quelques zones de faible densité de stations.

La mise en place du serveur NRT parait une bonne solution comme point d'accueil unique de partage des données entre organismes différents.

La procédure envisagée ici en contexte transfrontalier France-Espagne pourrait servir d'exemple pour une application de ShakeMap à d'autres zones transfrontalières.

5. Bibliographie

Akkar, S., y Bommer, J.J., (2007), New Empirical Prediction Equations for Peak Ground Velocity Derived from Strong-Motion Records from Europe and the Middle East. *Bulletin of Seismological Society of America*. 97(2), 511-530.

Akkar, S., Bommer, J.J., (2010), Empirical prediction equations for peak ground velocity derived from strong-motion records from europe and the middle east. *Seismological Research Letters*, 81:195–206.

Allen, T.I, Wald, D. (2009). On the Use of High-Resolution Topographic Data as a Proxy for Seismic Site Conditions (VS30), *Bull. Seism. Soc. Am*., 99, 935-943.

Artero, J, Jara, J, Romeu, N. (2010) Near Real Time data exchange. Informe técnico SISPyr.

Atkinson, G., Wald, D., (May/June 2007). Did you feel it? Intensity data: A surprisingly good measure of earthquake ground motion. *Seismological Research Letters*. Volume 78, Number 3.

Auclair, S. Rey, J. (2009). « Corrélation indicateur de mouvement du sol / intensité. Vers l'acquisition conjointe de données instrumentales et macrosismiques ». Rapport final. BRGM/RP-57785-FR, 84 p., 18 fig., 17 tabl., 3 ann.

Bakun,W.H., Scotti, O.,(2006). Regional intensity attenuation models for France and estimation of magnitude and location of historical earthquakes. *Geophys. J. Int.*, 164, 596-610.

Borcherdt, R. D. (1994). Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification), Earthquake Spectra 10, 617–654.

BRGM – IGME (2009a). Carte géologique des Pyrénées 1 : 400 000.

BRGM – IGME (2009b). Carte géologique du Quaternaire des Pyrénées 1 : 400 000.

Gomez, A., Batlló, J. (2008). State-of-the art about Intensity Attenuation relationships and methods for computing earthquake parameters for Iberian Peninsula. Informe técnico proyecto NERIES NA4.

Iwahashi J., Kamiya I., Matsuoka M. (2010) Regression analysis of Vs30 using topographic attributes from a 50-m DEM. *Geomorphology.* Vol 117, Issues 1-2, 202-205

Kaka, S., Atkinson, G. (2004) Relationships between instrumental intensity and ground motion parameters in eastern North America. *Bull. Seism. Soc. Am*. 94, 1728–1736.

Roullé A., Auclair S., Dewez T., Hohmann A., Lemoine A., Rey J. (2010) – Cartographie automatique des classes de sol à l'échelle régionale à partir d'un modèle numérique de terrain ou de surface. Rapport final. BRGM/RP-58853-FR, 66 p.

Scherbaum, F., Cotton, F., Smit, P. (2004). On the use of response spectral-reference data for the selection of ground-motion models for seismic hazard analysis: the case of rock motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(6), 2164-2185.

Secanell, R. , Bertil, D., Martin, Ch., Goula, X., Susagna, T., Tapia, M., Dominique, P., Carbon, D. y Fleta, J. (2008). Probabilistic seismic hazard assessment of the Pyrenean region. *Journal of Seismology*, 12, 323-341.

Souriau A. (2006) Quantifying felt events: A joint analysis of intensities, accelerations and dominant frequencies. *Journal of Seismology* 10: 23–38.

Tapia, M (2006) Desarrollo y aplicación de métodos avanzados para la caracterización de la respuesta sísmica del suelo a escala regional y local. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. 355 pp.