



Scénarios de risque sismique dans une zone transfrontalière des Pyrénées

Daniel Monfort*, **Nieves Lantada****, **Xavier Goula*****, **Alex Barbat******, **Caterina Negulescu***, **Lluís Pujades****, **Teresa Susagna*****, **Jairo Valcarcel****, **Jessica Rodriguez****

*BRGM, Service RNSC. 3 Avenue Claude Guillemin, 45060 Orléans France, d.monfortcliment@bgm.fr

**UPC. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. C/ Jordi Girona 1-3. Módulo D2. 08034 Barcelona Espagne, nieves.lantada@upc.edu

***IGC, c/ Balmes, 209-211, 08006 Barcelona Espagne, xgoula@igc.cat

****UPC. Resistencia de materiales y estructuras en la Ingeniería. C/ Jordi Girona 1-3. Módulo C1. 08034 Barcelona Espagne, alex.barbat@upc.edu

RÉSUMÉ. Ce travail présente un scénario de risque sismique fait sur les communes de la zone transfrontalière pyrénéenne formée par les cantons de Luchon et Saint-Béat en France et Val d'Aran en Espagne. Cette zone a été choisie par la sismicité récente et pour son fort caractère touristique. L'analyse de la vulnérabilité sismique du bâti se fait avec les indices de vulnérabilité de la méthode RISK-UE. Cette méthode définit des types constructifs basée sur les classes de vulnérabilité du bâti de l'échelle d'intensités EMS-98. A partir de ces indices de vulnérabilité et pour un niveau d'agression sismique déterminé s'estime la distribution des dégâts physiques sur le bâti avec des fonctions semi-empiriques. Les types constructifs locaux ont été identifiés ainsi que sa distribution le long de tous les secteurs bâtis de la zone. Le scénario a été fait à partir des intensités observées et interprétées du séisme de Vielha 1923 (VIII). La répartition des états d'endommagement sur le milieu bâti sert à estimer des préjudices ou de pertes économiques. Ces données seront utiles pour la protection civile et les décideurs.

ABSTRACT. An evaluation of seismic risk for a cross-border zone in the Pyrenees (Saint-Beat and Luchon in France and the Val d'Aran in Spain) is presented. This area has been selected because of recent seismic activity and the importance of tourism in this region. The vulnerability of existing buildings is assessed by using the vulnerability indices proposed by the RISK-UE project. This method is based in vulnerability classes defined by the EMS-98 intensity scale. Semi-empirical functions transform vulnerabilities into physical damage distributions as a function of seismic intensity. The most representative building typologies of current buildings in the area have been identified as well as their distributions within the zone. This information has been integrated into a GIS. The scenario considered is based on the observed and interpreted intensities of Vielha 1923 earthquake (VIII). The probabilities of occurrence of direct physical damage to buildings will be used to estimate human casualties and economic losses. These results will be useful for defining prevention strategies and civil protection.

MOTS-CLÉS : risque sismique, vulnérabilité, scénarios, RISK-UE, Pyrénées

KEYWORDS: seismic risk, vulnerability, scenarios, RISK-UE, Pyrenees

1. Introduction

Cet article présente un scénario de risque sismique sur une zone transfrontalière des Pyrénées : les cantons de Saint-Béat et Luchon en France et le canton de la Val d'Aran en Espagne (Figure 1). L'intérêt de choisir cette zone est multiple : d'un côté il s'agit d'une zone avec une sismicité moyenne et avec des séismes récents, comme le séisme de Lege en 1999 (magnitude 4.8) et le séisme de Vielha en 1923 d'intensité VIII, avec son épicentre à 10 Km au sud de Vielha (Val d'Aran). D'un autre côté cette zone a une forte fréquentation touristique pendant la saison de ski. L'ensemble de la zone d'étude comprend 53 communes en France et 9 communes en Espagne, avec une population recensée de 5609 pour le canton de Luchon et 3802 pour le canton de Saint-Béat (recensement 2006). La population recensée dans le Val d'Aran est de 10203 personnes (recensement 2010).

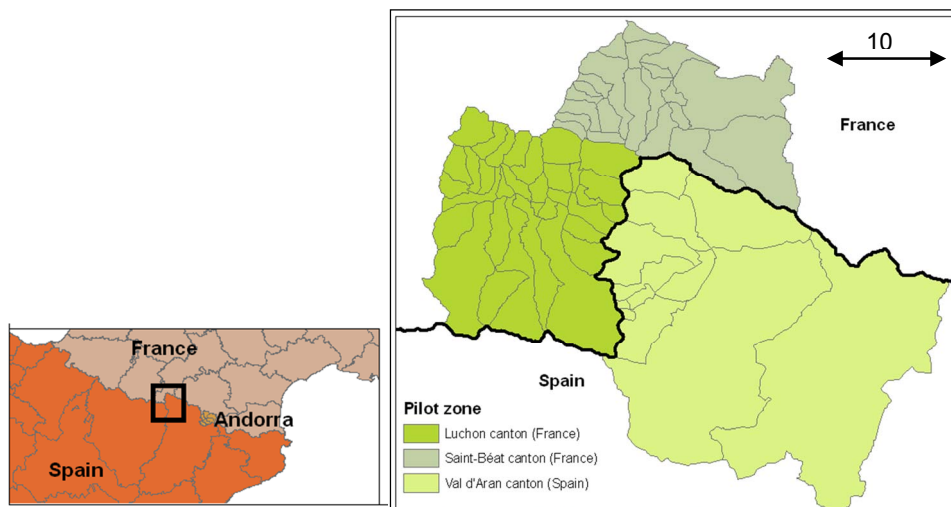


Figure 1 : situation de la zone d'étude.

2. Objectifs

Le premier objectif de la présente étude est d'identifier les types constructifs du bâti à usage d'habitation les plus caractéristiques de toute la zone et analyser la vulnérabilité sismique. Ensuite, en utilisant la méthode RISK-UE de l'indice de vulnérabilité, s'évalue la vulnérabilité sismique des bâtiments. Les scénarios de risque sismique estiment un niveau de dégâts physiques du bâti à partir de l'analyse de la vulnérabilité sismique et d'un niveau d'agression sismique. Ces scénarios peuvent être d'intérêt et d'utilité pour les collectivités et les services de protection civile.

3. Méthodologie

Cette étude utilise la méthode de niveau 1 proposée dans le cadre du projet RISK-UE (Milutinovic et Trendafiloski, 2003) pour évaluer la vulnérabilité sismique des bâtiments à usage d'habitation. L'application de cette méthode classe le parc bâti de la zone d'étude en classes de vulnérabilité, en s'appuyant sur des visites de terrain et données statistiques (Lantada et al. 2010, Sedan et al. 2008). Le projet RISK-UE propose une méthode de niveau 1 qui exprime la vulnérabilité par le biais d'une matrice de probabilité de dommages (DPM). Celle-ci résulte d'une corrélation statistique entre l'intensité macrosismique EMS98 (Grunthäl, 1998) et le dommage apparent, décrit en termes de degré de dommage. Ces niveaux de dommages sont 5 (figure 2).

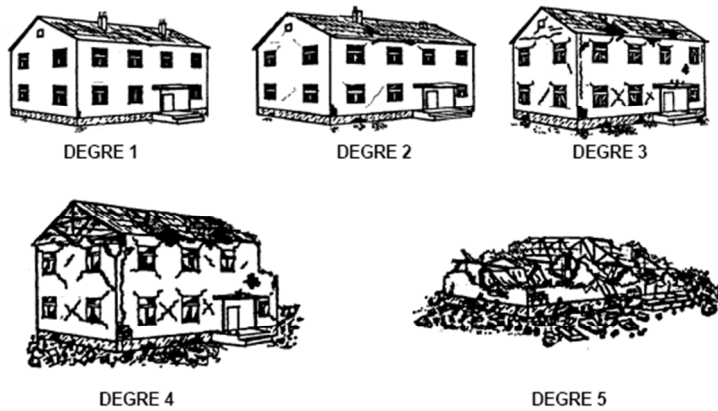


Figure 2 : classification des dommages pour un bâtiment en maçonnerie selon l'échelle macrosismique européenne EMS'98 (Grunthäl, 1998).

L'échelle macrosismique EMS98 établie que le dommage provoqué par les séismes suit une distribution binomiale ou une distribution beta équivalente (Giovinazzi et Lagomarsino, 2002), donnée par :

$$p_{\beta}(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(q) \Gamma(t-q)} \frac{(x-a)^{q-1} (b-x)^{t-q-1}}{(b-a)^{t-1}} \quad \text{pour } a \leq x < b \quad [1]$$

où $\Gamma(t)$ est la fonction Gamma, a et b se rapportent avec l'intervalle de définition de la fonction de densité de probabilité, et par conséquent avec le nombre d'états d'endommagement, prenant comme valeurs 0 et 6 respectivement. Le paramètre t et le paramètre r sont pour caler la distribution binomiale (de paramètre μ_D) et la distribution Beta définie par l'équation [1], qui se lient avec l'équation [2] (Giovinazzi et Lagomarsino, 2002).

$$q = t(0.007 * \mu_D^3 - 0.052 * \mu_D^2 + 0.287 * \mu_D) \quad \text{avec } t=8 \quad [2]$$

où μ_D est le degré d'endommagement moyen, qui peut se considérer l'état d'endommagement le plus probable de la structure et qui varie entre 0 et 5. Le degré moyen de dommage s'estime à partir de l'indice de vulnérabilité et de l'intensité selon l'équation 3 proposée par Giovinazzi et Lagomarsino (2002) à partir des informations des dégâts en séismes passés.

$$\mu_D = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I+6.25V_i-13.1}{2.3} \right) \right] \quad [3]$$

La fonction discrète beta de la densité de probabilité est calculée à partir des probabilités associées aux degrés des dommages k et $k+1$ ($k=0, 1, 2, 3, 4$ et 5) :

$$P_k = P_{\beta}(k+1) - P_{\beta}(k) \quad [4]$$

4. Analyse de la vulnérabilité

Les bâtiments de la zone d'étude ont été identifiés selon les critères de la méthode RISK-UE (Lungu et al., 2001; Milutinovic et al., 2003). En total il s'agit de 8338 bâtiments estimés du côté français et 2859 bâtiments dans le Val d'Aran (recensement 2001). L'identification des types constructifs les plus fréquents a été faite à partir des visites de terrain de communes des deux pays et à partir des entretiens avec des architectes et constructeurs de la zone. Etablir cette typologie du bâti dite "local" a été le premier pas pour les associer aux types proposés par la méthode RISK-UE (Lungu et al. 2001) comme il a été déjà fait dans le projet ISARD en Cerdagne (France et Espagne) et Andorre (ISARD, 2006; Gonzalez, 2010). Le tableau 1 présente la typologie de bâtiments finalement prise en compte.

Une fois distinguée la typologie constructive des bâtiments de la zone il a été analysé la répartition des différents types sur le secteur (distribution relative, en pourcentage, et absolue, en nombre). Au même temps il a été estimé la répartition du nombre d'étages et d'autres caractéristiques constructives. Les données des recensements des deux pays ont été utilisées. Dans tous les cas une délimitation des zones habitées a été faite, en les classant entre zones de centre-ville, lotissements, zones d'habitat collectif et d'habitat disparate. À l'intérieur de chaque zone habitée on estime le nombre de bâtiments de chaque type constructif. Cette répartition se fait à partir de : 1) visites de terrain de la zone en question; 2) données statistiques des deux pays; 3) d'après le critère des architectes et constructeurs de la zone et 4) par similarité avec d'autres zones habitées.

La méthode de RISK-UE donne un indice de vulnérabilité de base pour chaque type de bâtiment. A part les indices de vulnérabilité de base de chaque type constructif, des facteurs aggravants ont été considérés. Seulement les facteurs aggravants rencontrés d'une manière plus ou moins systématique ou qui peuvent être évalués à partir des données du recensement ont été pris en compte. Ces facteurs sont le nombre d'étages, qui se corrige de manière différente s'il s'agit d'une construction en maçonnerie ou en béton ; l'état de conservation et pour les bâtiments en maçonnerie en pierre (types T1 et T1') le facteur système structural et les connections de la toiture. Finalement, pour les zones de centre-ville, où il se trouve un fort ratio de bâtiments jointifs, il a été pris en considération un facteur qui pénalise les bâtiments jointifs à des hauteurs différentes.

Tableau 1. Typologie constructive de la zone d'étude.

Type	Système porteur	Type RISK-UE	Description
T1	Maçonnerie en pierre	M1.2	Murs porteurs en maçonnerie en pierre simple.
T1'		M1.2- M1.3	Hôtels de Bagnères-de-Luchon. Murs porteurs en maçonnerie en pierre, éléments en pierres de taille.
T2	Maçonnerie en parpaings ou briques	M3.3	Plancher en poutrelles et entrevous.
T3		M3.4	Plancher en béton.
T4	Structure en béton	RC3.2	Portiques en béton armé. Remplissage en maçonnerie, structure irrégulière
T5		RC2	Murs en béton
T6	Ossature métallique	S3	Ossature en acier, remplissage en maçonnerie
T7	Bois	W	Chalets en bois

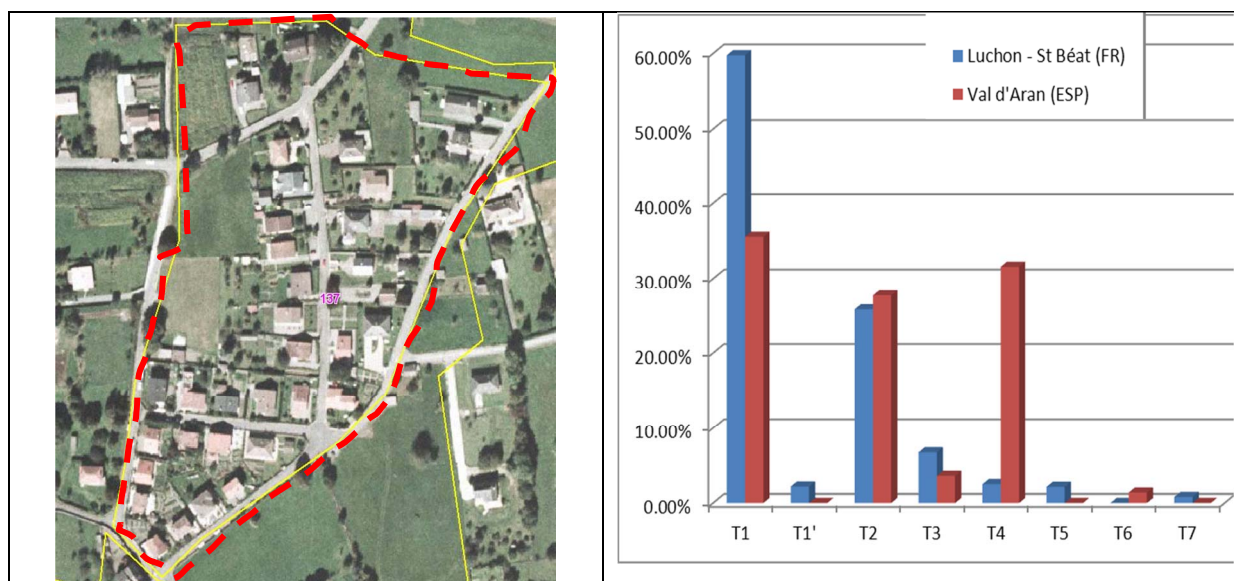


Figure 3 : a) Exemple de délimitation d'une zone habitée (trait en rouge discontinu) b) Distribution de des bâtiments par types constructifs.

Les résultats de la répartition de la typologie montrent que les deux régions ont suivi une évolution urbaine bien différente (figure 3). Les cantons de de Saint-Béat et Luchon se caractérisent par un grand nombre de bâtiments de type T1, car la croissance urbaine de ces villes au cours des 40 dernières années est très faible. Bagnères-de-Luchon, la ville la plus importante du côté français, s'est développée en particulier au début du XXème siècle avec le tourisme thermal. Les nouvelles constructions dans la zone française sont principalement de l'habitat pavillonnaire et des lotissements (T2 et T3), et quelque zone d'habitat collectif (T4 et T5). En revanche les résultats dans le Val d'Aran, qui est une zone avec un fort développement urbain depuis les années 1970 avec l'ouverture des pistes de ski de Baqueira, montrent une répartition plus similaire entre la maison traditionnelle (T1), les bâtiments en maçonnerie (T2) et les bâtiments d'habitat collectif en portiques en béton (T4).

5. Le séisme de référence, Vielha 1923

Plusieurs grands tremblements de terre sont survenus dans la région au fil du temps. En 1373, il y a eu un tremblement de terre, avec une intensité épicentrale de VIII-IX qui a dévasté une grande partie de la Ribagorza en Espagne (Olivera et al., 1994a). En 1427 et 1428 a eu lieu dans les Pyrénées Orientales une crise sismique avec des intensités sismiques comprises entre VIII-IX et IX (Olivera et al., 1994b). Dans la région de Luchon et dans la région voisine du Haut-Comminges au XIXe siècle il y a eu plusieurs tremblements de terre, en 1870, 1855 et 1813 avec des intensités VII (SisFrance). Cette étude présente le résultat d'un scénario de risque sismique déterministe, basée sur l'estimation de l'intensité du tremblement de terre survenu en 1923, avec son épicentre près de Vielha et des intensités maximales entre VII et VIII. Pour toutes les municipalités de la zone d'étude une intensité de cet événement a été attribuée, comme on le voit dans la Figure 4, basée sur des données observées (Susagna et al., 1994), et estimées à partir d'une loi l'atténuation d'intensité avec la distance à l'épicentre.

Les dommages les plus graves de ce tremblement de terre furent observés à Vielha (intensité VIII), où quelques granges se sont effondrées causant la mort de quatre chevaux (La Vanguardia). A Bagnères-de-Luchon

(intensité VII) des murs, cheminées et toits se sont fissurés (Sisfrance.fr, Le Midi socialiste). Dans beaucoup de communes des deux vallées des intensités VII ont été assignés (Figure 4).

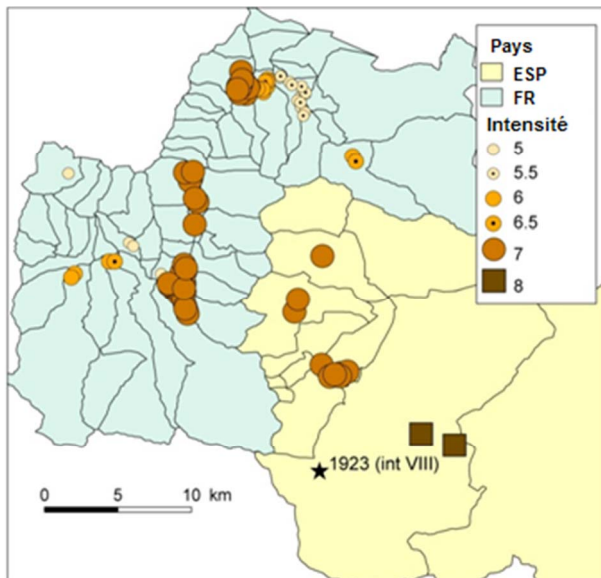


Figure 4 : distribution des intensités observées du séisme de Vielha 1923.

6. Résultats

Globalement, les dommages simulés pour un tremblement de terre tel que celui-ci de 1923, avec les bâtiments existants maintenant, sont légers ou nuls. Le pourcentage des bâtiments fortement endommagés (états de dommage D4 et D5), seraient inférieurs à 2% dans les zones avec une intensité plus forte. Cela signifie que seulement certaines constructions parmi les plus vulnérables souffriraient des dommages importants ou l'effondrement. Les secteurs les plus impactés seraient surtout les secteurs de Casarilh et Gaussac à Vielha dans le Val d'Aran et certains secteurs du centre historique de Bagnères-de-Luchon. Tous ces secteurs ont été identifiés avec un taux élevé de bâtiments datant d'avant 1950.

Des dégâts graves (état de dommage D3) seraient plus importants à Vielha, Gaussac et Casarilh (entre 10 et 15% du parc en état d'endommagement D3) dans le Val d'Aran. D'autres communes de la vallée et du côté français auraient entre un 5 et un 10% des bâtiments dans cet état d'endommagement. Ces zones coïncident en général avec les zones avec un fort pourcentage de bâtiments vulnérables (types T1 et T1') et impactées par une intensité sismique de VII. Les communes avec des intensités plus faibles à VII présentent un taux inférieur à 2% de bâtiments en état D3. Le nombre de bâtiments en état d'endommagement D3 est un chiffre important pour l'estimation du nombre de personnes sans abri. Par exemple, seulement à Bagnères-de-Luchon ou à Vielha des dizaines de personnes pourraient se trouver sans-abris.

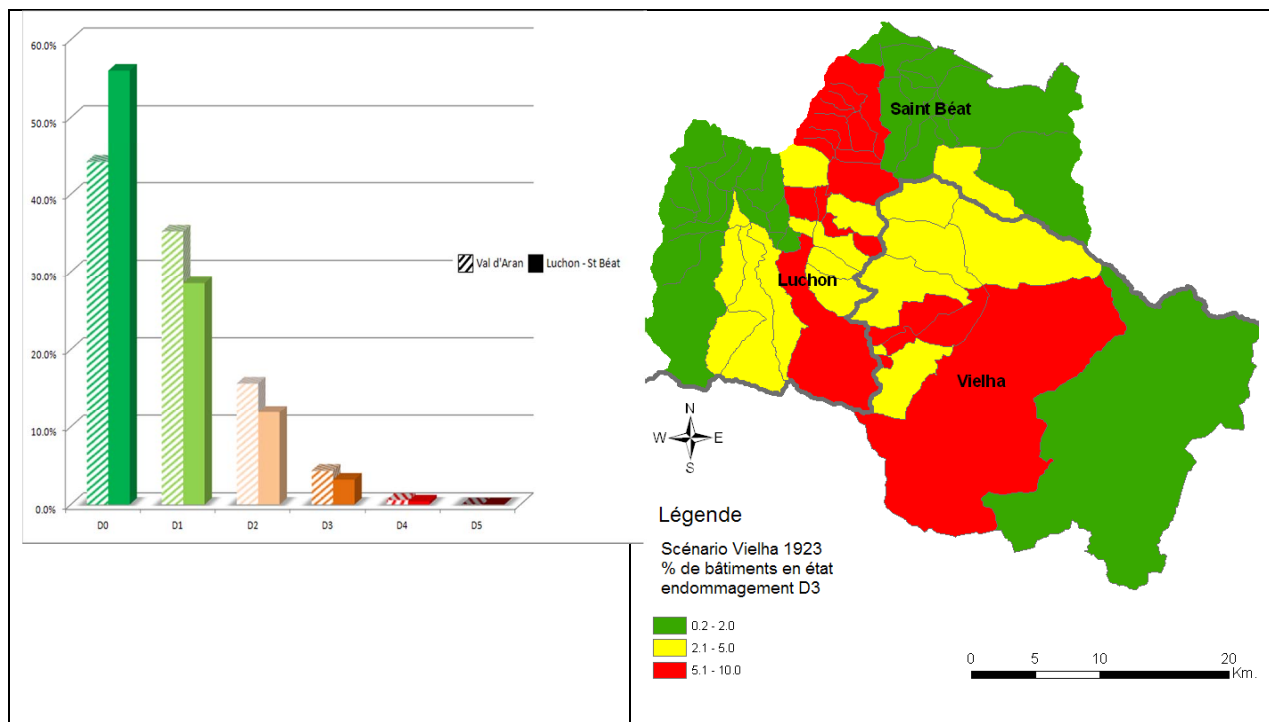


Figure 5 : a) distribution de los dommages pour les bâtiments à usage d'habitation en Val d'Aran et dans les cantons de Luchon – Saint Bât. b) distribution des dégâts de degré D3 (sévéres) pour la zone d'étude.

7. Conclusions

Huit grands types de construction ont été identifiés dans l'ensemble la zone d'étude. Les bâtiments les plus vulnérables de la région seraient les types T1 et T1', bâtiments avec des murs en maçonnerie porteuse en pierre, avec des planchers en bois et généralement inadaptés à des charges horizontales. La distribution géographique des types constructifs est très liée aux évolutions urbaines des différentes communes de la zone, ainsi dans le côté français l'habitat traditionnel et en général pavillonnaire est majoritaire tandis que dans la Val d'Aran l'habitat collectif avec un système structural en poteaux-poutres en béton est très fréquent.

Cette étude a présenté les résultats d'une simulation des dégâts sur le bâti courant causés par un séisme tel que celui-ci de Vielha de 1923, à partir des intensités observées et interprétées. Les dommages seraient surtout très faibles. Seulement environ un 4% du parc immobilier total subirait des dégâts de degré D3 (jusqu'à un 15% pour les communes le plus impactées), soit environ 250 bâtiments pour les cantons de Saint-Bât et Luchon et 125 dans la Val d'Aran.

Si on compare des zones avec la même intensité, les dommages ont tendance à être plus élevés dans les zones urbaines avec une plus grande proportion de bâtiments vulnérables (types T1 et T1') qui correspondent à la construction traditionnelle de la région. Les nouvelles zones d'habitation construites après les années 1970 ont un dommage inférieur à la moyenne.

Les dégâts très forts et l'effondrement total ou partiel serait très rare et situé dans des immeubles vulnérables, comme c'était déjà le cas en 1923 après l'effondrement de quelques granges à Vielha. En conséquence, le nombre de victimes serait également très réduit. En revanche, le nombre de bâtiments fortement endommagés (état d'endommagement D3) pourrait être considérable dans certaines communes comme Vielha et Bagnères de

Luchon. Le nombre de personnes sans-abris serait en conséquence de l'ordre de 800 personnes en occupation normale et supérieur en fonction de l'occupation touristique.

Dans une zone de sismicité modérée comme cella, lire les résultats d'un scénario de risque seulement en termes de dégâts très forts et des effondrements graves du bâti peut conduire à sous-estimer le risque. En effet, pour un scénario tel que celui discuté dans cet article l'impact en termes de victimes serait très réduit, car l'intensité varie entre V et VIII. En revanche, le nombre de personnes qui seraient temporairement sans-abri et les pertes économiques indirectes d'un tel événement pourrait être très important.

Remerciements

Ce travail a été financé par le projet européen Interreg S. (2007-2013 POCTEFA pas. 73/08) "Système d'information sismique Pyrénées SISPYR." Cette recherche a été aussi soutenue par le Ministère de la Science et innovation (MICINN) de l'Espagne par le biais du projet de référence CGL2008-00869/BTE et partiellement financé par le FEDER.

8. Références

Giovinazzi, S. et Lagomarsino, S. (2002). "WP04: Guidelines for the implementation of the I level methodology for the vulnerability assessment of current buildings". Genoa, Italy.

González, M. (2010), "Evaluación del riesgo sísmico en el Principado de Andorra". Tesis doctoral del Departamento d'Enginyeria del terreny, cartogràfica i geofísica de la Universitat Politècnica de Catalunya. (Disponible en: - www.tdx.cat/TDX-0618110-122408.)

Grünthal, G. (1998), "European Macroseismic Scale 1998". Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg.

ISARD (2006), "Información Sísmica Automática Regional de Daños", Interreg IIIA France Spain 2000–2006 programme. (Disponible en: www.isard.project.eu.)

Lantada N, Irizarry, J., Barbat H.A., Goula, X., Roca, A., Susagna, T., Pujades L.G., (2010), "Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method". *Bulletin of earthquake engineering*, 8 (2) p. 201-229.

Le Midi Socialiste (édition 21-11-1923).

La Vanguardia (édition du 21 et 22 de novembre 1923). Consultable en ligne www.lavanguardia.es.

Lungu, D., Aldea, A., Arion, A., Vacareanu, R., Petrescu, F. et Cornea, T. (2001), "WP1 Report European distinctive features, inventory database and typology". Risk-UE Project. 58 pp.

Milutinovic, Z. V. et Trendafiloski, G. S. (2003), "WP04. Vulnerability of current buildings". RISK-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract No.EVK4-CT-2000-00014. Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS), Skopje. 109 pp.

Olivera, C., A. Riera, J. Lambert, E. Banda et P. Alexandre (1994a), "Els terratrèmols de l'any 1373 al Pirineu: efectes a Espanya i França". Servei Geològic de Catalunya. Generalitat de Catalunya. *Monografies*, vol. 3, 220p.

Olivera, C., A. Riera-Melis, B. Martínez, et A. Roca. (1994b), "Revision of the 1427 earthquakes in the Eastern Pyrenees. Delimitation of the epicentral area and intensity assessment for the March 15 and May 15 events". In: Albini, P. and Moroni, A. (editors): *Historical investigation of european earthquakes*. CNR, Milan, vol. 2, 169-179.

Risk-UE (2003), “An advanced approach to earthquake RISK scenarios with applications to different European towns”. European Commission 5FP - City of Tomorrow and Cultural Heritage. CEC Contract Number: EVK4-CT-2000-00014. Duration: 44 Months (15/01/2001-30/09/2004). (Disponible en: www.risk-ue.net).

Sedan O., Terrier M., Nesgulescu C., Winter T., Roullé A., Douglas J., Rohmer J., Bes-de-Berc S., de Martin F., Arnal C., Dewez T., Fontaine M. (2008). Scénario départemental de risque sismique- Méthodologie et processus de réalisation. Rapport BRGM/RP-55415-FR, 459p, 96 fig., 45 tabl., 25 annexes

SisGeoInRisk (2010), “Contribuciones sismológicas, geofísicas y de ingeniería a la predicción y prevención del riesgo sísmico”. Proyecto de investigación del Ministerio de Educación y Ciencia 2009-2011(CGL2008-00869/BTE).

SisFrance. Sismicité de la France. Histoire et caractéristiques des séismes ressentis en France. (Disponible en: www.sisfrance.fr).