



Retro-scénarios de dommages sismiques à partir du cas de l'Aquila en Italie

Daniel Monfort, Caterina Negulescu, John Douglas, Agathe Roulle, Olivier Sedan

► To cite this version:

Daniel Monfort, Caterina Negulescu, John Douglas, Agathe Roulle, Olivier Sedan. Retro-scénarios de dommages sismiques à partir du cas de l'Aquila en Italie. 9ème Colloque National AFPS 2015, Nov 2015, Champs sur Marne, France. hal-01252073

HAL Id: hal-01252073

<https://brgm.hal.science/hal-01252073>

Submitted on 7 Jan 2016

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.

Retro-scénarios de dommages sismiques à partir du cas de l'Aquila en Italie

Daniel Monfort* — Caterina Negulescu* — John Douglas*,** — Agathe Roullé* — Olivier Sedan*

* BRGM, 3 avenue C. Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2

** University of Strathclyde, Department of Civil and Environmental Engineering, 75 Montrose Street, Glasgow, G1 1XJ, Ecosse, Royaume-Uni

RÉSUMÉ. *Cet étude s'intéresse à la tentative de « prédire » les dommages (simulation rétrospective) causés par le tremblement de terre de L'Aquila en 2009 (Mw 6.3) et, plus généralement, s'interroger sur les efforts pour caler des modèles d'estimations de dommages et des données provenant des observations des cas réels. Dans ce travail on a travaillé avec des méthodes empiriques basées sur des indices de vulnérabilité et les classes macrosismique (EMS98). Ce travail a été publié par Douglas et al. (2015).*

Un des objectifs de ce travail a été de travailler dans des conditions dites « a priori », où seulement des informations disponibles avant le séisme sont utilisées, c'est à dire, une distribution moyenne des types d'habitat en Italie et leur vulnérabilité et des relations d'atténuation pour simuler l'évènement. Ces simulations correspondent à celles qu'auraient pu être faites « à chaud » pendant la crise pour estimer l'ampleur de l'évènement. Ces résultats sont globalement cohérents ou acceptables mais des fortes différences peuvent apparaître localement. D'autres simulations incorporent petit à petit des éléments observés/mesurés après le séisme : l'intensité observée, les accélérations et vitesse maximales (PGA et PGV) enregistrés par les stations sur le secteur, la distribution typologique de la ville ancienne de L'Aquila, les diagnostics d'habitabilité et les effets de site lithologiques. Cette donnée « a posteriori » améliore le modèle d'estimation de dégâts et notamment la courbe de distribution des dommages mais ne reflète toujours pas toutes les variations locales observées.

Ce travail montre aussi les limites pour une validation des simulations, à cette échelle de travail il n'est pas possible considérer les caractéristiques mécaniques de chaque immeuble. Pour des travaux futurs nous encourageons la collecte systématique des dommages observés (et pas que les états d'habitabilité) et densifier le réseau d'observations sur les zones fortement peuplées.

ABSTRACT. *This article is concerned with attempting to 'predict' (hindcast) the damage caused by the L'Aquila 2009 earthquake (Mw 6.3) and, more generally, with the question of how close predicted damage can ever be to observations. This work has been published by Douglas et al. (2015).*

One of the focuses of this work was to work in "a priori" condition (like damage scenarios done during the crisis), it means, using information that was available before the earthquake and assuming the same event characteristics as the L'Aquila mainshock. The overall damage estimated by these simulations is reasonably well predicted but there are considerable differences in the damage pattern. Other simulations incorporate aftershock observed/measured data: macroseismic intensities, PGA and PGV measured in the sector, building type distribution in L'Aquila historical center, habitability assessment and soil effects. Despite some improvement in the predicted damage, in particular by the modification of the vulnerability indices and the parameter influencing the width of the damage distribution, these hindcasts do not match all the details of the observations.

At this scale of work it is impossible to consider individual building mechanical parameters. To increase the number of observations available to make these adjustments, we encourage the collection of damage states (and not just habitability classes) following earthquakes and also the installation of dense strong-motion networks in built-up areas.

MOTS-CLÉS : scénarios de dommages, L'Aquila, incertitudes, risque sismique, évaluation de dommages, vulnérabilité, aléa

KEYWORDS: *damage scenarios, L'Aquila earthquake, uncertainties, seismic risk, damage assessment, vulnerability, hazard*

1. Introduction

L'objectif de ce travail consistait à explorer plusieurs pistes pour améliorer un modèle sismique d'estimation des dommages à partir de la validation d'un cas réel. Quelles sont les sources d'incertitude pour les scénarios de dommages sismiques ? Quel apport pour la calibration de ces modèles de la donnée observée ou mesurée sur le terrain ? Quel ordre de magnitude des résultats et de leur incertitude ? A quelle échelle de restitution les résultats peuvent être restitués ? Les résultats qui se montrent dans le présent document proviennent du travail publié par Douglas et al. (2015).

On a choisi comme séisme d'étude celui de L'Aquila (Abruzzes, Italie) du 6 avril 2009 (Mw 6.3). C'est un événement qui a généré un grand nombre de publications scientifiques et techniques de toute sorte : études sur la vulnérabilité du bâti, le niveau des dommages et les niveaux d'habitabilité, les intensités observées, les effets de site, la mortalité... En plus la proximité géographique, historique et culturelle entre la France et l'Italie fait que par exemple le bâti ancien soit relativement similaire, et donc on peut imaginer que l'application dans les deux pays de ce type d'approche soit soumise au même type d'incertitude.

Le scénario de dommages fait à partir d'une classification plus ou moins sommaire du bâti courant est une méthode assez classique pour estimer le risque sismique sur un territoire (Roca *et al.* 2006, Zuccaro *et al.* 2012, Schwarz *et al.* 2015). Elle s'utilise aussi bien en prévention qu'en gestion de crise. Par exemple la protection civile italienne (Sabetta 2011) utilise ce type de modèle de dommage pour estimer l'ordre de grandeur d'un événement sismique dans les minutes qui suivent le choc principal. Dans le cas du séisme de 2009 une sous-estimation de la magnitude dans les premiers calculs (Ml 5.8 au lieu de Mw 6.3 recalculé après) a amené à plutôt sous-estimer l'ordre de grandeur de l'événement. Les pertes occasionnées finalement par le séisme correspondaient donc à la fourchette plutôt haute des premières estimations des dégâts faites par la protection civile italienne. Cela montre la sensibilité aux paramètres sismologiques d'entrée.

Le travail présent s'articule autour des inputs classiques d'une étude de risque sismique, c'est à dire, les dommages sont le produit d'une agression sismique et des enjeux exposés avec une vulnérabilité. Chacun de ces items a été regardé en détail.

2. Agression sismique

Comme l'exemple de Sabetta (2011) le montre, un des paramètres clé pour un retro-scénario est l'agression sismique qui est donnée en entrée. Plusieurs sources ont été prises en compte, avec une gradation vers des données de plus en plus observées ou mesurées de l'événement.

Calcul via des relations d'atténuation (GMPE). Il s'agit des simulations qui nécessitent uniquement comme paramètre du séisme la localisation de l'épicentre et la magnitude, c'est à dire, les premiers paramètres connus via des calculs automatiques dans les minutes qui suivent le séisme. Nous avons utilisé les relations d'atténuation Akkar et Bommer (2010) et Cauzzi et Faccioli (2008), proposées pour l'Europe dans le cadre du projet SHARE (Delavaud *et al.* 2012). Pour la méthode de calcul des dommages qui est utilisée par la suite l'agression doit être exprimée en intensité macrosismique. Ainsi, si l'agression sismique a été calculée à partir d'une relation d'atténuation classique GMPE (en PGA, PGV ou PSA) elle est ensuite convertie en intensité, via des équations empiriques du type GMICE (*Ground Motion Intensity Conversion Equation*). Pour ceci nous avons utilisé la conversion Faenza et Michelini (2010) qui est celle utilisée par ShakeMaps en Italie.

Le calcul d'accélération ou vitesses permet la prise en compte de l'effet de site lithologique. Nous avons utilisé une carte de classification des sols en classes EC8 basé sur la cartographie géologique de l'Italie (Di Capua *et al.* 2011). Plus localement nous avons intégré les résultats de microzonages sismiques de certaines

localités (1 :10 000) faits dans les mois qui ont suivi le séisme, qui couvraient notamment le centre historique de l'Aquila (Gruppo di Lavoro MS-AQ 2010). Ces microzonages ont été faits selon la méthode décrite par Gruppo di Lavoro MS (2008).

Shakemaps. L'INGV a mis en place depuis quelques années le logiciel ShakeMaps sur toute l'Italie (Michelini *et al.* 2008). En 2009 le système était activé et avait produit une carte d'intensité Shakemap, en prenant en compte la première magnitude estimée par l'INGV, 5.8 au lieu de 6.3 réévaluée par la suite. Nous avons pris la carte d'intensité, disponible en ligne.

Calcul via l'observation instrumentale. Dans le cas de l'Aquila la densité de stations sismologiques n'était pas très élevée. Malgré cela nous avons produit une carte d'intensité à partir d'un krigeage (e.g. Douglas 2007) de la donnée enregistrée, en prenant en compte l'effet de site ajusté aux classes Eurocode 8 et la cartographie de Di Capua *et al.* (2011).

Calcul à partir de l'intensité observée. Les enquêtes macrosismiques menées par les équipes italiennes (Galli *et al.* 2009) ont abouti à une carte de l'intensité, disponible en ligne (Locati *et al.* 2011), qui attribue un niveau d'intensité par localité, une commune pouvant être composée par plusieurs localités. Ces valeurs ponctuelles ont été interpolées afin d'avoir une carte continue d'intensité sur toute la zone. Par définition la donnée intensité intègre les effets de sites possibles (topographiques et lithologiques). Finalement, et uniquement pour le périmètre restreint du centre historique de L'Aquila, nous avons réalisé une simulation avec une intensité constante IX, qui est la borne supérieure de l'intensité observée pour cette zone.

3. Modèle de vulnérabilité macroscopique

Pour ce travail nous avons retenu un modèle de vulnérabilité du bâti courant macroscopique, commun à toute l'Italie, basée sur la donnée des recensements ISTAT (équivalent de l'INSEE en Italie). Zuccaro *et al.* (2012) proposent une classification en classes de vulnérabilité selon l'EMS98 (Conseil de L'Europe 1998) adaptée aux périodes de constructions données par le recensement du bâti ISTAT 2001. Bernardini *et al.* (2007) donnaient des indices de vulnérabilité RISK-UE (Lagomarsino et Giovinazzi 2006 ; Mouroux et Le Brun 2006) pour ces mêmes classes (Table 1). La donnée ISTAT vient donnée par îlots, qui délimitent les zones bâties.

	Classes de vulnérabilité selon EMS98 (en %) et indices de vulnérabilité associés			
Période de construction ISTAT	A ($V_i=0.88$)	B ($V_i=0.72$)	C ($V_i=0.56$)	D ($V_i=0.4$)
Avant 1919	64.0	26.8	8.4	0.8
1919-1945	41.3	36.5	18.7	3.5
1946-1961	16.8	34.2	32.8	16.2
1962-1971	4.8	14.8	33.4	47.0
1972-1981	24.2	11.4	27.5	36.9
Après 1982	0.4	4.2	9.0	86.4

Table 1. Distribution en % des bâtiments en classes de vulnérabilité par période de construction selon Zuccaro *et al.* (2012). Indices de vulnérabilité (V_i) associés à ces mêmes types selon Bernardini *et al.* (2007).

4. Dommages observés. Lesquels ?

Trois types de données sur l'endommagement observé ont été prises en compte dans ce travail. D'abord le travail de Tertulliani *et al.* (2010) fait dans le périmètre du centre historique de L'Aquila (dénommé par la suite *zona rossa*), qui identifiait bâtiment par bâtiment leur classe de vulnérabilité selon l'échelle EMS98 et le niveau de dommages atteint selon cette même échelle (D1 à D5). Cette étude très détaillée et exhaustive pour cette partie de la ville nous a servi de base de travail. Ainsi par exemple la figure 1 montre les différences entre la classification macroscopique du parc bâti appliquée à L'Aquila (Zuccaro *et al.* 2012) et l'analyse en local de Tertulliani *et al.* (2010).

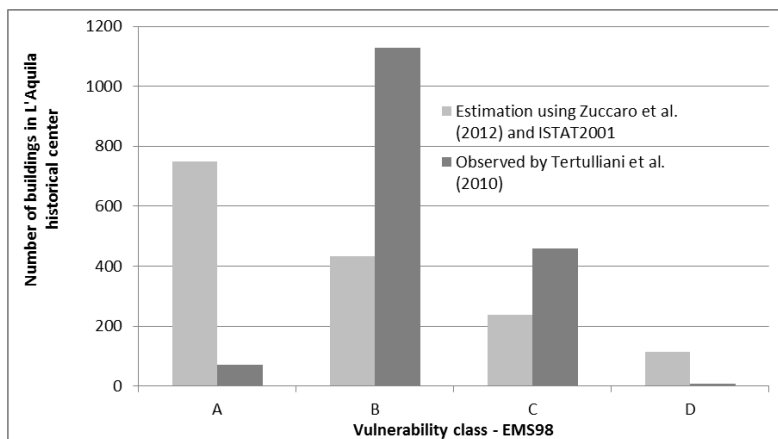


Figure 1. Comparaison entre la distribution des classes de vulnérabilité obtenues avec selon Zuccaro *et al.* (2012) et la distribution observée par Tertulliani *et al.* (2010) dans le périmètre de la « *zona rossa* ».

Deuxièmement, des équipes de recherche se sont penché à analyser les différents types et niveaux de dommage par type de structure (maçonnerie ancienne et récente, béton armé). Parmi ces différents travaux est intéressant le comptage d'une bonne partie des bâtiments endommagés dans le village d'Onna (intensité IX-X) fait par Rossetto *et al.* (2009). A partir de leurs observations nous avons établi une gamme des valeurs en indices de vulnérabilité RISK-UE qui s'ajustent le plus aux bâtiments en maçonnerie à l'ancienne d'Onna (Figure 2).

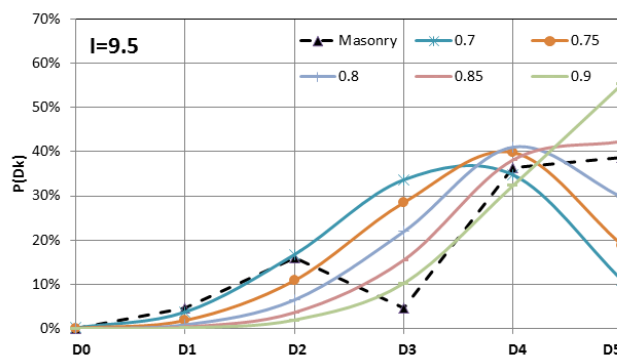


Figure 2. Distribution des dommages selon l'échelle EMS98 observés dans le village d'Onna pour les bâtiments en maçonnerie (Rossetto *et al.* 2009) et fonctions continues de vulnérabilité (indices de vulnérabilité RISK-UE).

En troisième, la protection civile italienne (Dipartimento della Protezione Civile, 2009) a publié, sur l'ensemble des communes et villages impactées par le séisme, le nombre de bâtiments par état d'habitabilité (AeDES, Chianello *et al.* 2009). A différence des sources de données précédentes, celle-ci est la seule à être systématique sur l'ensemble de la zone. En plus la mise en place d'un SIG parcellaire par la mairie de L'Aquila nous a permis localiser précisément les bâtiments en fonction de son état d'habitabilité selon AeDES. Ainsi, dans le périmètre de la « zona rossa » nous avons pu comparer les endommagements au sens de l'EMS98 (Tertulliani *et al.*, 2010) et les niveaux d'habitabilité AeDES, pour un échantillon d'environ 200 bâtiments (Tableau 2). Logiquement les niveaux d'endommagement forts (D4 et D5) correspondent à des bâtiments inhabitables (E), mais ce qui est plus intéressant est le fait que les bâtiments en D3 sont aussi majoritairement classés en inhabitables. A différence de l'échelle EMS98, qui se base sur une description des dégâts qualitative, l'échelle AeDES prend en compte l'importance des travaux pour réhabiliter l'édifice. En effet un bâtiment en maçonnerie peut présenter des grandes lézardes qui correspondent au niveau D3 mais en termes d'habitabilité et lourdeur de travaux la solution envisagée serait plutôt la démolition (classe E). Cet exercice comparatif fait sur un échantillon très réduit, montre néanmoins les limites d'usage quand on compare les deux échelles. Les ratios issus de ce tableau nous les avons utilisés pour estimer le nombre de bâtiments inhabitables (classe E) à partir des états d'endommagement de l'échelle européenne.

		Etats habitabilité AeDES (Comune di L'Aquila, 2014)				
		A	B	C	D	E
		Bâtiment habitable	Temporairement inhabitable. Habitable après petits travaux	Partiellement inhabitable	Temporairement inhabitable. Habitable après gros travaux	Bâtiment inhabitable
Etats de dommages EMS98 observés par Tertulliani et al. (2010) à L'Aquila (zona rossa)	D0	2	2	-	-	-
	D1	5	11	-	-	1
	D2	6	14	1	-	19
	D3	1	11	4	-	106
	D4	-	-	-	-	16
	D5	-	-	-	-	5

Tableau 2. Comparaison entre dommages selon échelle EMS98 (Tertulliani *et al.* 2010) et diagnostics d'habitabilité (AeDES) pour le centre historique de L'Aquila.

5. Résultats

Plusieurs simulations ont été réalisées, en prenant en compte différentes agressions sismiques pour ce même évènement et intégrant des fonctions de vulnérabilité *a priori* (Zuccaro *et al.* 2012, Bernardini *et al.* 2007) et d'autres adaptées aux dégâts observés. L'ensemble est présenté par Douglas *et al.* (2015). Les simulations ont été faites à l'aide du logiciel Armagedon (Sedan *et al.* 2013). Dans le présent article nous nous focalisons sur trois aspects.

La conversion en états d'habitabilité. En toute logique le résultat d'un scénario calculé sur l'intensité observée devrait être très proche des observations mais ce n'est pas vraiment le cas partout. Sur l'ensemble de la commune de L'Aquila la seule information des dégâts étaient les diagnostics d'habitabilité. Si l'on regarde en détail ces diagnostics par localité et les niveaux d'intensité attribués par Galli *et al.* (2009) pour ces mêmes localités (Tableau 3), on trouve que pour quelques villages avec une intensité modérée (VI) le nombre de bâtiments non habitables selon AeDES est significatif, mais globalement les résultats sont corrects. Il y a donc ponctuellement une incohérence entre les deux sources de données. Sans plus de données et sans un rapport des

états de dommage comme ceux donnés par Tertulliani *et al.* (2010) dans le centre historique il est très difficile revenir en arrière. Dans tous les cas cela prouve, comme Rivas-Medina *et al.* (2014) l'ont dit après le séisme de Lorca en Espagne, que la donnée « habitabilité » risque d'être influencé par de facteurs externes.

La prise en compte de l'effet de site lithologique. La figure 3 compare la distribution des états d'endommagement par îlot obtenus via une simulation qui prenait en compte l'effet de site lithologique selon le microzonage fait à L'Aquila et la localisation des dommages de Tertulliani *et al.* (2010) à l'intérieur de la dite « zona rossa ». Au centre-ouest de la zone s'observe une zone qu'a été plus endommagée que le reste. Cela correspond à un secteur avec un fort effet de site lithologique qu'a été identifié par le microzonage fait a posteriori dans L'Aquila. La simulation prenait en compte l'amplification et en conséquence cette situation se retrouve dans le scénario. Au contraire, au nord-ouest, l'endommagement observé est globalement plus fort que celui du modèle. On peut évoquer plusieurs solutions, soit il existe une particularité du bâti plus vulnérable sur ce secteur de la ville, mais cela n'a pas été vraiment prouvé, soit il existe un effet de site local par des anciens remblais comme évoqué par Tertulliani *et al.* (2010) qui n'a pas été cartographié par le microzonage. Au-delà de ces différences ponctuelles au sein d'un périmètre urbain relativement homogène, si l'on additionne les résultats de tout le centre-historique de L'Aquila on trouve un endommagement du même ordre de grandeur que les observations faites par Tertulliani *et al.* (2010).

Localité	Intensité observée (Emidius – INGV)	% bâtiments inhabitables – E (AeDES)	% estimé bâtiments inhabitables (agression sismique : interpolation intensités observés)
L'Aquila – zona rossa	VIII-IX	60.4	55.2
Bazzano	VIII	35.2	41.8
Tempera	IX	36.4	43.2
Aragno	VI	3.3	5.9
Collebrincioni	VI	23.0	6.2
Pianola	VII	17.4	34.0
Preturo	VI	13.8	5.4
Paganica	VIII	35.6	27.7
San Gregorio	IX	47.9	43.7

Tableau 3. Pourcentage de bâtiments inhabitables (classe E) selon AeDES pour quelques localités de la commune de L'Aquila et estimation faite par le modèle pour ces mêmes localités. La conversion entre états d'endommagement EMS98 et classes AeDES s'inspire du tableau 2 ; E=100% des bâtiments en D4 et D5 + 85% de D3 + 47% de D2).

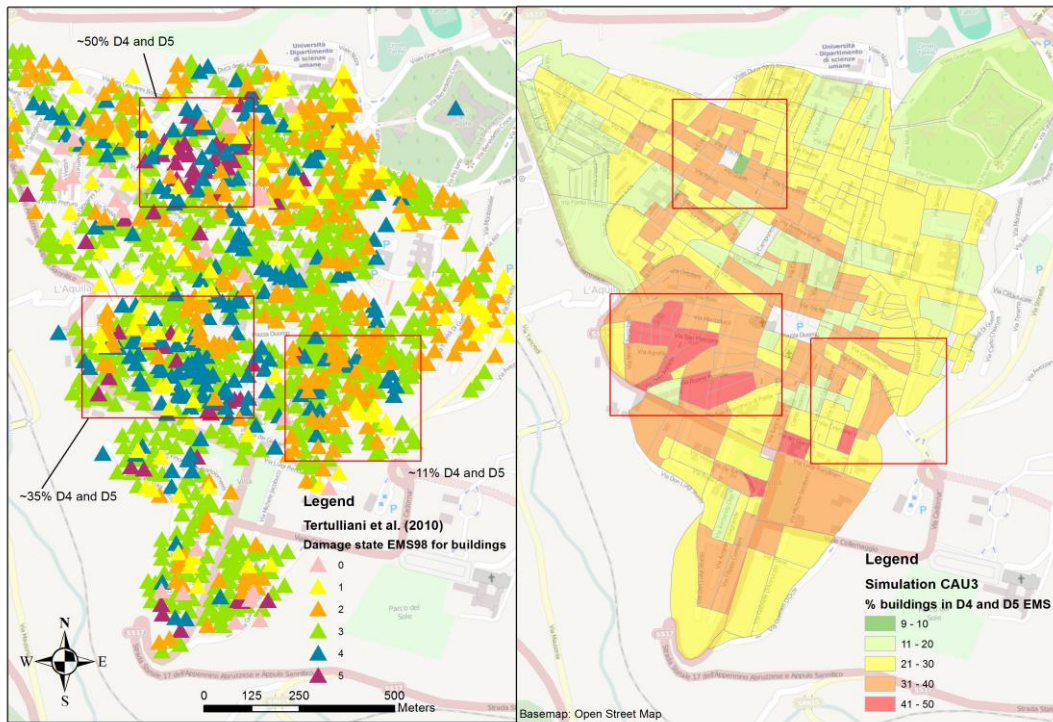


Figure 3. Comparaison entre les dégâts observés par Tertulliani et al. (2010) à gauche et les résultats d'une simulation à droite (simulation avec GMPE Cauzzi et Faccioli prenant en compte le microzonage sismique de L'Aquila et adaptant des indices de vulnérabilité).

Réajuster le modèle de vulnérabilité. Un autre groupe de simulations est présentée en figure 4. Dans ce cas on considère une intensité homogène sur tout le centre historique de l'Aquila (IX). Une première simulation présente le résultat fait à partir de la distribution typologique dite *a priori* (Zuccaro et al. 2012) et les indices de vulnérabilité associés (Tableau 1), une deuxième simulation incorpore la distribution typologique observée par Tertulliani et al. (2010) (Figure 1) et des indices de vulnérabilité adaptés aux dommages observés dans L'Aquila (plus de détails dans Douglas et al. 2015). Les résultats de la deuxième simulation correspondent assez bien à la distribution des dégâts observée. Il existe donc une bonne adéquation entre la classification qualitative des classes de vulnérabilité faite par Tertulliani et al. (2010) et les fonctions de vulnérabilité attribués par Douglas et al. (2015).

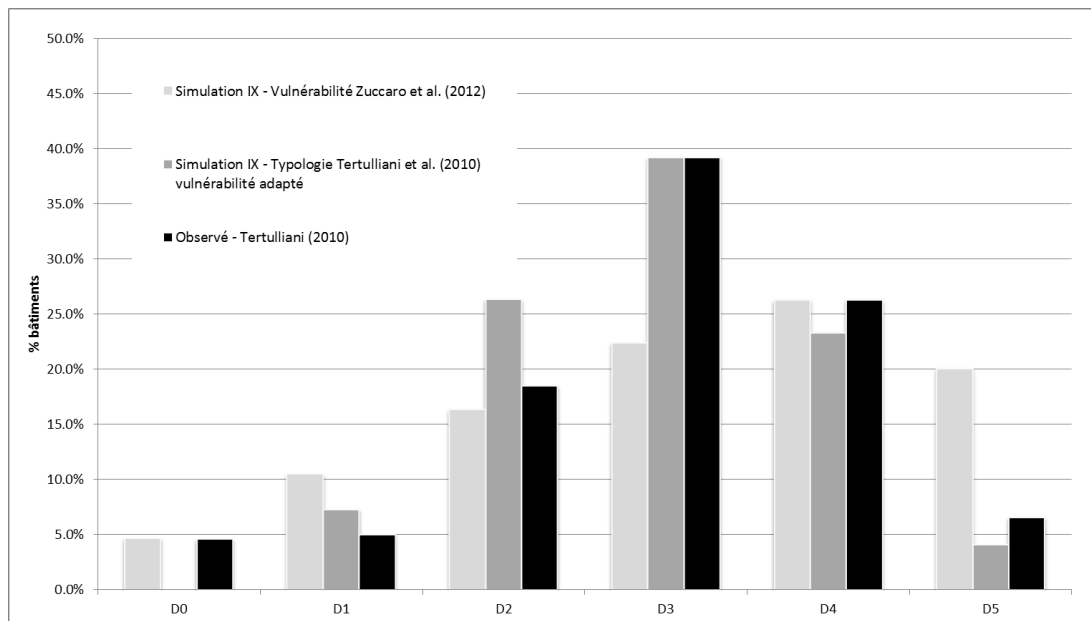


Figure 4. Comparaison entre la distribution des dommages observée par Tertulliani et al. (2010) dans le centre de L'Aquila et les résultats obtenus en simulant une intensité constante IX, avec un modèle de vulnérabilité dit a priori (Zuccaro et al. 2012) et un autre adapté aux observations.

6. Conclusions

La méthode mise en œuvre arrive à estimer pour cet événement l'ordre de magnitude des dégâts observés. Ceci dit des très fortes différences entre le modèle et les observations peuvent apparaître localement. Sans être exhaustif celles-ci peuvent être dues à des hétérogénéités dans l'atténuation du mouvement sismique, des effets de site topographique et lithologiques non pris en compte ou des variations ponctuelles de la vulnérabilité du bâti. L'échelle de restitution des résultats doit tenir compte de ces variations locales.

Ce travail s'appuie sur une classification macroscopique du parc bâti italien, de la même manière que ce type d'approche est fait en France (Riedel *et al.* 2014, Sedan *et al.* 2008), en Espagne (Roca *et al.* 2006) ou en Allemagne (Schwarz *et al.* 2015). Ce type de modèle de distribution ne peut pas prendre en compte des particularités locales ou ponctuelles et doit rester adapté au format de la donnée, celui des instituts de statistique respectifs. Malgré des simplifications dans les méthodes d'échantillonnage statistique, cette donnée est toujours la plus adaptée pour quantifier l'exposition du parc bâti à usage d'habitation au risque sismique. Comme dans d'autres domaines, il s'agit ici de trouver un équilibre entre la simplicité de calcul et exhaustivité de la donnée.

Nous concluons que pour ce type d'approche la plus grande influence sur le résultat final et l'étendue des dommages vient de l'agression sismique – en intensité – qui est donné en entrée. Lorsque l'intensité est proche de celle observée, les estimations des dommages qui s'en dérivent sont globalement bonnes. C'est fut le cas pour le centre historique de L'Aquila (intensité VIII-IX). Au contraire, certains modèles à partir des GMPE surestimaient l'agression sur certaines localités et conséquemment les dommages. Ce travail vient confirmer les conclusions de Crowley *et al.* (2008) : pour valider un modèle de dommages sur un événement passé se nécessiterait un réseau instrumental très dense en zone urbaine, au contraire l'incertitude sur l'agression sismique sera toujours très élevée.

Un autre élément doit être pris en compte par rapport à la donnée observée de l'endommagement au bâti. Dans ce travail nous avons essayé de travailler à partir des diagnostics d'habitabilité sur tout le territoire impacté. La correspondance entre les états d'endommagement selon l'EMS98 et les niveaux d'habitabilité données en

Italie n'est pas linéaire ou directe, surtout pour les états d'endommagement modérés. Rivas-Medina *et al.* (2014) avaient été confrontés plus ou moins au même problème. Nous pensons qu'à l'avenir, pour la construction des nouvelles fonctions de vulnérabilité empiriques, il faudrait partir sur la base d'inventaires des dégâts comme celui-ci de Tertulliani *et al.* (2010) en intégrant des données supplémentaires sur la typologie de chaque construction et rester assez vigilant vis-à-vis des diagnostics d'habitabilité, qui peuvent être biaisés par d'autres facteurs extérieurs.

7. Bibliographie

- Akkar, S. and Bommer, J. J. (2010), Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East, *Seismological Research Letters*, 81(2), 195-206. DOI: 10.1785/gssrl.81.2.195.
- Bernardini, A., Giovinazzi, S., Lagomarsino, S. and Parodi, S. (2007), Vulnerabilità e previsione di danno a scala territoriale secondo una metodologia macrosismica coerente con la scala EMS-98, *Proceedings of the XII conference ANIDIS*, Pisa (Italy), 10-14 June.
- Cauzzi, C. and Faccioli, E. (2008), Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records, *Journal of Seismology*, 12(4), 453-475. DOI: 10.1007/s10950-008-9098-y.
- Chianello, G.M., Raschi, R., Rebuffat, M. and Papa, F. (2009), Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica (AeDES). Dipartimento della Protezione Civile.
- Comité Européen de Normalisation (CEN) (2005), Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance—part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Standard NF EN 1998-1.
- Commune di L'Aquila (2014), Assessorato alla Ricostruzione e Pianificazione: Settore pianificazione e ripianificazione del territorio, S.I.T. on-line, online GIS: <http://laquila.geoportal.it/websit/default.aspx?Utente=laquila>.
- Council of Europe (1998), European macroseismic scale 1998 (EMS-98), Grünthal G (ed.), vol. 15, Centre Européen du Géodynamique et de Séismologie: Luxembourg.
- Crowley, H., Stafford, P. J. and Bommer, J. J. (2008), Can earthquake loss models be validated using field observations? *Journal of Earthquake Engineering*, 12(7), 1078–1104. DOI: 10.1080/13632460802212923.
- Delavaud, E., Cotton, F., Akkar, S., Scherbaum, F., Danciu, L., Beauval, C., Drouet, S., Douglas, J., Basili, R., Sandikkaya, M.A., Segou, M., Faccioli, E. and Theodoulidis, N. (2012), Toward a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe, *Journal of Seismology*, 16(3), 451-473. DOI: 10.1007/s10950-012-9281-z
- Di Capua, G., Peppoloni, S., Amanti, M., Cipolloni, C., Conte, G., Avola, D., Del Buono, A., Borgomeo, E., Negri Arnoldi, C., and Scriveri, S. (2011), Il Progetto SEE -GeoForm: uno strumento per la consultazione di dati geologici e di pericolosità sismica riferiti all'intero territorio nazionale, *Proceedings of the XIV conference ANIDIS*, Bari (Italy), 18-22 September.
- Dipartimento della Protezione Civile (2009). Ordinanza 3753/2009. Eventi sismici provincia dell'Aquila, 6 Aprile 2009. DICOMAC. FUNZIONE 1- Tecnica di Valutazione e censimento danni. Rapporto attività di sopralluogo effettuate al: 15/06/2009.
- Douglas, J. (2007), Inferred ground motions on Guadeloupe during the 2004 Les Saintes earthquake, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5(3), 363-376. DOI 10.1007/s10518-007-9037-2.
- Douglas, J., Monfort Climent, D., Negulescu, C., Roullé, A. et Sedan, O. (2015). Limits on the potential accuracy of earthquake risk evaluations using the L'Aquila (Italy) earthquake as an example. *Annals of geophysics*, 58, 2, 2015, S0214; doi:10.4401/ag-6651
- Faenza, L. and Michellini, A. (2010), Regression analysis of MCS intensity and ground motion parameters in Italy and its application in ShakeMap, *Geophysical Journal International*, 180(3), 1138-1152. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04467.x.

- Galli, P., Camassi, R., Azzaro, R., Bernardini, F., Castenetto, S., Molin, D., Peronace, E., Rossi, A., Vecchi, M. and Tertulliani, A. (2009), Il terremoto aquilano del 6 aprile 2009: rilievo macrosismico, effetti di superficie ed implicazioni sismotettoniche. *Il Quaternario*, 22, 235-246.
- Gruppo di Lavoro MS (2008), Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica - Conferenza delle Regioni e delle Province autonome - Dipartimento della protezione civile, Roma, 3 volumes and DVD.
- Gruppo di Lavoro MS-AQ (2010), Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana. Regione Abruzzo – Dipartimento della Protezione Civile, L'Aquila, 3 volumes and CD-ROM, http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/microzonazione_aquilano.wp.
- Istituto Nazionale Geofisica e Vulcanologia, INGV (2009), ShakeMap, Event 2206496920, <http://shakemap.rm.ingv.it/shake/2206496920/products.html>.
- Istituto nazionale di statistica, ISTAT (2001), Basi territoriali e variabili censuarie, <http://www.istat.it/it/archivio/104317>.
- Lagomarsino, S. and Giovinazzi, S. (2006), Macro seismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4), 415-443.
- Locati, M., Camassi, R. and Stucchi, M. (eds.) (2011), DBMI11, the 2011 version of the Italian Macro seismic Database. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>, DOI: 10.6092/INGV.IT-DBMI11.
- Michellini, A., Faenza, L., Lauciani, V. and Malagnini, L. (2008), ShakeMap implementation in Italy, *Seismological Research Letters*, 79, 689-698. DOI: 10.1785/gssrl.79.5.689.
- Mouroux, P. and Le Brun, B. (2006), Presentation of RISK-UE project, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4), 323-339. DOI: 10.1007/s10518-006-9020-3.
- Rivas-Medina, A., Martinez-Cuevas, S., Quiros, L. E., Gaspar-Escribano, J. M. and Staller, A. (2014), Models for reproducing the damage scenario of the Lorca earthquake, *Bulletin of Earthquake Engineering*, in press 12(5), 2075-2093. DOI: 10.1007/s10518-014-9593-1.
- Roca, A., Goula, X., Susagna, T., Chavez, J., Gonzalez, M. et Reinoso E. (2006). A simplified method for vulnerability assessment of dwelling buildings and estimation of damage scenarios in Catalonia, Spain. *Bulletin of earthquake engineering* 4:141-158.
- Rossetto, T., Peiris, N., Alarcon, J., So, E., Sargeant, S., Sword-Daniels, V., Libberton, C., Verrucci, E., Del Re, D. and Free, M. (2009), The L'Aquila (Italy) Earthquake of 6th April 2009, A preliminary field report by EEFIT, 54p.
- Sabetta, F. (2011), Abruzzo earthquake of April 2009: seismic sequence, ground motion attenuation, simulation scenario and losses, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 52(3), 427-442.
- Sedan, O., Terrier, M., Negulescu, C., Winter, T., Roullé, A., Douglas, J., Rohmer, J., Bes-de-Berc, S., De Martin, F., Arnal, C., Dewez, T. and Fontaine, M. (2008), Scénario départemental de risque sismique – Méthodologie et processus de réalisation, BRGM/RP-55415-FR. 459 p., 96 fig., 45 tabl., 25 ann.
- Sedan, O., Negulescu, C., Terrier, M., Roullé, A., Winter, T. and Bertil, D. (2013), Armageddon — A tool for seismic risk assessment illustrated with applications, *Journal of Earthquake Engineering*, 17(2), 253-281. DOI: 10.1080/13632469.2012.726604.
- Schwarz, J., Beinersdorf, S., Kaufmann C. and Langhammer, T. (2015). Damage scenarios for Central Europe – historical earthquakes as basis for calibrating prognosis tools. *Proceedings of SECED 2015 Conference*, Cambridge.
- Tertulliani, A., Arcoraci, L., Berardi, M., Bernardini, F., Camassi, R., Castellano, C., Del Mese, S., Ercolani, E., Graziani, L., Leschiutta, I., Rossi, A. and Vecchi, M. (2010), An application of EMS98 in a medium-sized city: The case of L'Aquila (Central Italy) after the April 6, 2009 Mw 6.3 earthquake, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(1), 67–80, DOI: 10.1007/s10518-010-9188-4.
- Zuccaro, G., Cacace, F. and De Gregorio, D. (2012), Buildings inventory for seismic vulnerability assessment on the basis of census data at national and regional scale. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa.