



Pôle Grenoblois d'étude et de recherche  
pour la prévention des Risques Naturels



Programme de recherche 2009

Financé par le Conseil général de l'Isère

Rapport de synthèse

## Analyse du risque sismique de Grenoble: le cas d'une ville exposée à un aléa modéré

Coordinateur :

**DUNAND François**  
(GEOTER)  
**GUEGUEN Philippe**  
(LGIT)

*Juillet 2010*



GEOTER S.A.S.



## Analyse du risque sismique de Grenoble: le cas d'une ville exposée à un aléa modéré

F. Dunand

GEOTER

P. Guéguen

LGIT

### 1 Introduction

La France est un pays à sismicité modérée, caractérisée par une sismicité diffuse. Des tremblements de terre de magnitude supérieure à 5 se produisent parfois dans les zones les plus sismiques (Alpes à l'Est, Pyrénées au Sud-Ouest et Alsace au Nord-Est). On estime en moyenne grâce à un modèle de sismicité de type Gutenberg-Richter que l'on peut s'attendre à un séisme de magnitude supérieure à 5 tous les 30 ans, et supérieure à 6 tous les 300 ans. Un séisme contemporain s'est produit à Lambesc en 1909, d'une magnitude estimée à environ 6 et ayant provoqué une quarantaine de victimes. Parmi les zones les plus sismiques françaises, on compte les Alpes du Nord, ayant subi récemment des séismes modérés, provoquant parfois (Annecy, M<sub>L</sub> 4.8 15/07/1996) des dommages légers. Dans l'annexe nationale de l'EC8, l'accélération d'ancrage des spectres réglementaires vaut  $a_g=0.16g$  pour cette région.

Dans ce contexte de sismicité, Grenoble est une ville à fort enjeux économiques et sociétaux, avec la présence de nombreuses industries sensibles (chimiques, nucléaires), des entreprises à forts impact économiques sur la région et une population importante (environ 300 000 habitants). Cependant, les séismes étant rares, on est face à une faible implication des collectivités publiques et des pouvoirs publics pour la réduction du risque sismique: les périodes de retour sont faibles et il est nécessaire d'apporter de la connaissance auprès des responsables politiques locaux.

Depuis 25 ans, de nombreuses études ont été menées afin d'approfondir la connaissance du risque sismique sur la région. Elles portaient sur:

- l'observation de la sismicité des Alpes et de la région Grenobloise par la mise en place d'un réseau de surveillance sismologique (Guyoton et al., 1990; Thouvenot et al., 2003).
- la définition de zones sismotectoniques homogènes définies lors du zonage sismique de la France (Martin et al., 2002), ajustée en fonction des différentes études menées par GEOTER sur le territoire français depuis 2002.
- l'observation, l'analyse et la reconnaissance dans la ville des zones ayant des effets de site importants (Péquegnat et al. 2008)
- la caractérisation du milieu urbain et l'estimation de la vulnérabilité physique des constructions (Guéguen et al., 2007)
- l'étude des comportements humains et la vulnérabilité sociale de Grenoble (Guéguen et al., 2009).

Une interrogation en matière de décision par les pouvoirs publics de Grenoble, gestionnaire d'un grand nombre de bâtiments recevant du public, n'est pas uniquement de connaître l'aléa sismique probable de la région, la variabilité de l'aléa sismique due aux effets de site ou la vulnérabilité globale de la ville, mais plutôt de connaître le niveau de risque sismique sur la ville. Afin de faciliter et d'orienter dans la meilleure direction leur prise de décision, il est donc nécessaire de représenter le niveau de risque auquel la ville et les populations sont exposées. Cet exercice est rendu d'autant plus difficile du fait du niveau de sismicité modérée de la région.

Pour cette raison, appliquée à une région à sismicité modérée comme la ville de Grenoble, nous proposons une analyse du risque sismique, selon une démarche probabiliste, incluant l'aléa régional, local et la vulnérabilité du bâti. Cette démarche est celle élaborée par GEOTER dans le cadre de ses analyses du risque sismique dans d'autres régions. Son applicabilité à Grenoble présente l'intérêt de s'appuyer sur une connaissance acquise depuis de nombreuses années lors de projets antérieurs, Grenoble étant choisi pour l'applicabilité de la méthode. Cette dernière repose sur une approche d'évaluation probabiliste et de qualification du risque. Elle se décline selon les étapes suivantes qui seront détaillées dans la suite du document :

- Une évaluation probabiliste de l'aléa conduisant à une courbe d'aléa (probabilité de dépasser chacun des niveaux d'aléa) en intégrant les effets de site locaux ;
- Une évaluation de la vulnérabilité des bâtiments conduisant à des fonctions de vulnérabilité (niveau de dommage en fonction de l'aléa) avec la prise en compte d'une variabilité par une fonction de répartition de dommages ;
- Un calcul probabiliste du risque par convolution de l'aléa, de la vulnérabilité et des enjeux ;

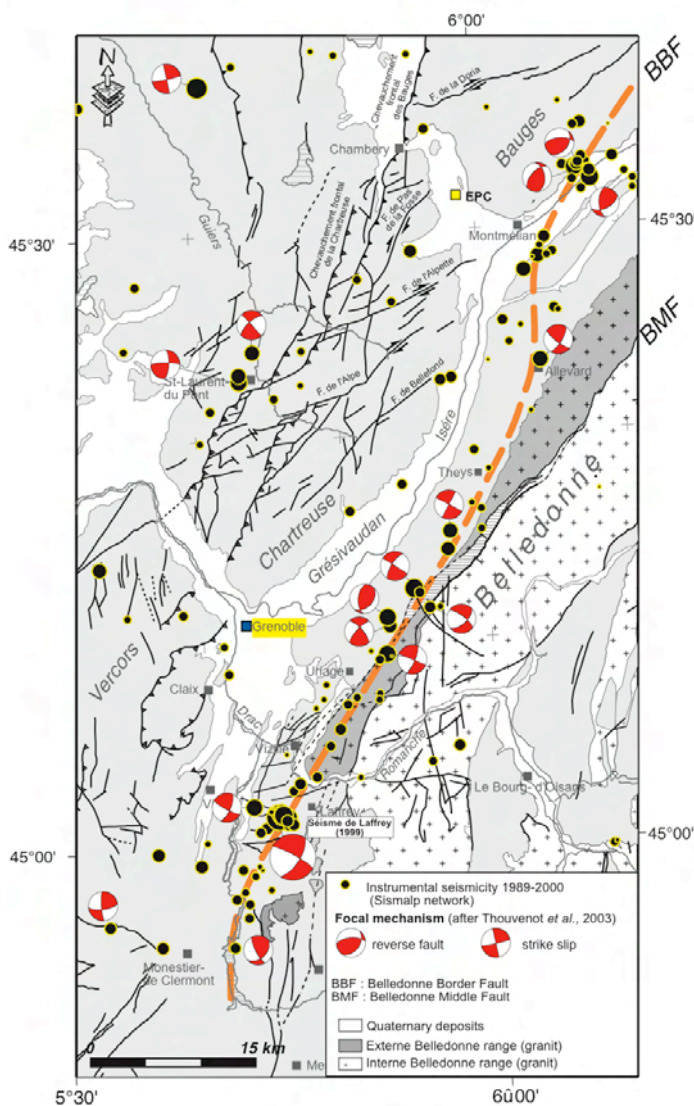
Un des objectifs est également de montrer le niveau de risque sismique par rapport à d'autres et d'introduire la notion d'acceptabilité du risque. Cette notion, actuellement intégrée dans la prise en compte du risque sismique en Suisse, est bien adaptée à un pays de sismicité modérée et sera discuter dans une dernière partie.

## 2 Evaluation de l'aléa sismique

### 2.1 Aléa régional

Grenoble est situé au Nord des Alpes, en bordure externe du massif alpin. On y recense une sismicité

active intense, la région ayant subit des séismes historiques importants (Thouvenot et al., 2003). A partir des données historiques et instrumentales, on distingue (1) des zones actives dont la sismicité témoignent de l'activité des fronts Alpains avec d'Est en Ouest l'arc interne du Piémontais, puis celui du Briançonnais qui se continue jusqu'au Valais et les Alpes externes depuis le Nord du Vercors jusqu'au Chablais suisse, (2) des zones à sismicité modérée qui comprennent le Jura, le bassin molassique suisse, les massifs subalpins méridionaux, la Provence, le Bas Dauphiné et l'Ouest du Massif Central, et enfin des zones très peu sismiques avec la Bourgogne, la Bresse, le Diois, les massifs cristallins externes des Alpes et le Languedoc.



**Figure 1:** Carte de localisation de Grenoble et séismes principaux détectés par Sismalp (d'après Thouvenot et al., 2003).

Parmi cette sismicité (Fig. 1), une faille active a été détectée par le réseau régional Sismalp ([sismalp.obs.ujf-grenoble.fr](http://sismalp.obs.ujf-grenoble.fr)): la faille bordière de Belledonne située le long du massif de Belledonne et orientée NE-SO. Cette faille est à l'origine d'une activité sismique très proche de Grenoble, avec des magnitudes atteignant 3 et plus, ressentie localement par la population et ayant parfois occasionnés des désordres. Les mécanismes au foyer indiquent des mouvements décrochants dextres à des profondeurs moyennes de l'ordre de 7 km témoignant de l'échelle crustale de ce système. C'est aussi sur cette alignment que les séismes importants se sont produits, tels que le séisme historique de 1962 (Corrençon  $M_L=5.3$ ), de Faverges en 1980 ( $M_L=4.7$ ) et du Grand Bornand de 1994 ( $M_L=5.1$ ).

Autour de Grenoble, les données historiques sont issues de Levret et al. (1994, 1996) qui recensent une cinquantaine d'événements historiques

localisés et dont les caractéristiques de magnitude et de profondeur sont recalculées. Les autres séismes historiques sont extraits de la base de données SISFRANCE (<http://www.sisfrance.net/>). Ils sont connus uniquement par leurs paramètres qualitatifs macrosismiques jusqu'à l'année 1961. Seuls les séismes de bonne qualité (bonne localisation) sont utilisés. Pour ces séismes, les profondeurs considérées correspondent aux profondeurs moyennes des zones sources auxquelles ils sont rattachés telles qu'elles ont été définies lors de l'élaboration du zonage probabiliste de la France (Martin *et al.*, 2002).

A proximité immédiate, les séismes ont produit des intensités inférieures à V, à l'exception (1) du séisme du Grésivaudan du 07/01/1851 (V-VI à Grenoble), avec un épicentre localisé à environ cinq kilomètres au Nord-Ouest du site, (2) du séisme de Corrençon du 25/04/1962 (NO de Grenoble à environ 20 km) d'intensité épacentrale de VII-VIII et de profondeur 10 km (Levret *et al.*, 1996) et (3) du séisme de Voreppe du 12/01/1754, qui compte parmi les premiers séismes historiques rapporté pour avoir engendré des dommages dans les Alpes mais reste assez mal connu. Avec une intensité épacentrale VI-VII, l'épicentre de ce séisme est positionné à une vingtaine de kilomètres au NNW de Grenoble. Plus éloignés de Grenoble, des séismes se sont produits en particulier dans le massif cristallin de Belledonne, à plus de 30 km de Grenoble mais ayant atteint le 22/07/1881 une intensité épacentrale de  $I_0$ =VII. D'autres séismes plus éloignés mais de forte intensité ont été recensés pour cette étude, caractérisant le niveau de sismicité de la région des Alpes du Nord à laquelle Grenoble appartient. Parmi ces événements, on peut citer le séisme du Bugey (N de Grenoble) qui s'est produit le 19/02/1822 avec une intensité épacentrale de VII-VIII (70km de Grenoble), le séisme de Laragne du 19/05/1866 d'intensité VII-VIII qui s'est produit dans les Alpes provençales à 90 km au Sud de Grenoble. Le séisme d'intensité VIII dans le Piémont italien à 120 km à l'ESE du Grenoble (02/04/1808), le séisme de Chamonix du 29/04/1905 à 140 km du site et d'intensité épacentrale  $I_0$ =VII-VIII, le séisme de Lambesc de 1909 d'intensité épacentrale  $I_0$ =VIII-IX à 170 km du site et le séisme du Valais du 09/12/1755 ( $I_0$ =VIII-IX) et du 25/07/1855 ( $I_0$ =IX) figurent comme les séismes les plus forts de la zone des Alpes du Nord à laquelle Grenoble est rattachée. Le Tableau 1 donne la liste des événements historiques majeurs de la zone d'étude et d'intensité supérieure à V.

## 2.2 Aléa local

Une configuration locale particulière vient s'ajouter à la définition de l'aléa sismique de Grenoble: le bassin grenoblois. En effet, Grenoble est fondé sur un bassin sédimentaire en forme d'Y, ayant subi plusieurs périodes de remplissages (Nicoud *et al.*, 2001): glacio-lacustre avec des séries importantes d'argiles de plusieurs mètres d'épaisseur, puis fluviales créant des remplissages superficiels (quelques dizaines de mètres) de sédiments graveleux-sableux, très aléatoires dans la ville, et conséquence des cours d'eaux baignant la ville. Ce remplissage épais, confiné entre les massifs rocheux (raides) de Belledonne, du Vercors et de la Chartreuse, provoquent des amplifications considérables du mouvement sismique (e.g., Lebrun *et al.*, 2001; Péquegnat *et al.*, 2008). Le mouvement sismique est ainsi systématiquement amplifié dans une bande de fréquence allant de 0.3 Hz à 10 Hz. On observe également une variabilité du mouvement sismique, due aux derniers mètres du remplissage qui selon Lebrun *et al.* (2001) et Guéguen *et al.* (2007) produisent des amplifications plus hautes fréquences (3-10Hz). Cette bande de fréquence va avoir un effet sur les bâtiments grenoblois puisque la plupart ont leur fréquence de résonance dans cette gamme (Farsi et Bard, 2004; Michel *et al.*, 2010), situation où les dommages peuvent être amplifiés (e.g., Anderson *et al.*, 1986; Guéguen *et al.*, 1998). Le risque sismique doit tenir compte de la variabilité des effets de site dans le bassin grenoblois.

Parmi les études, des mesures basées sur l'utilisation du bruit de fond sismique (la méthode H/V bruit de fond) ont été menées sur la ville (Lebrun *et al.*, 2001; Guéguen *et al.*, 2007). Cette méthode ne donne que les fréquences de résonance des sites et elle permet de distinguer des zones ayant des amplifications variables, en particulier liées aux formations les plus superficielles (Guéguen *et al.*, 2000). On peut ainsi distinguer à l'Ouest et au Sud-Est des remplissages ayant des fréquences supérieures à 6 Hz, et correspondant à des remplissages graveleux, du centre de la ville où les fréquences sont de l'ordre de 1-5 Hz, correspondant à des remplissages très argileux (parfois présence de Tourbe) et qui génèrent, du fait d'un fort contraste d'impédance, des effets de site importants. On peut sur la base de cette méthode proposer un découpage très grossier de la ville, qui à l'échelle de notre étude nous permet d'introduire la variabilité des effets de site majeurs haute fréquence, pour lesquels il sera possible de moduler l'aléa régional.

Date	Localisation épacentrale	Intensité épacentrale	Intensité dans la commune
25 Avril 1963	VERCORS (MONTEYNARD)	VII	V
25 Avril 1962	VERCORS (CORRENCON-EN-VERCORS)	VII-VIII	VI-VII
30 Mai 1946	VALAIS (CHALAIS)	VII	V
25 Janvier 1946	VALAIS (CHALAIS)	VII-VIII	V
18 Juillet 1938	QUEYRAS (GUILLESTRE)	VI-VII	V
23 Février 1887	RIVIERA DI PONENTE (IMPERIA-BUSSANA)	IX	VI
27 Novembre 1884	QUEYRAS (GUILLESTRE)	VII	V
10 Décembre 1882	BELLEDONNE-PELVOUX	V	V
5 Août 1881	BELLEDONNE-PELVOUX	VI	V-VI
22 Juillet 1881	BELLEDONNE-PELVOUX	VII	V
25 Juillet 1855	VALAIS (VISP)	IX	V
3 Avril 1839	GRESIVAUDAN (DOMENE)	VI	V
19 Février 1822	BUGEY (BELLEY)	VII-VIII	V-VI
15 Octobre 1784	LAC DU BOURGET (AIX-LES-BAINS)	VI-VII	V
15 Août 1782	BELLEDONNE (URIAGE)	VI	V

**Tableau 1** : Intensités historiques supérieures à IV ressenties dans la commune de Grenoble.

## 2.3 Courbe d'aléa probabiliste.

L'intérêt de l'approche en intensité est de s'affranchir des conversions entre intensités et magnitudes que nécessite l'approche en accélération. D'autre part, la plupart des méthodes empiriques d'évaluation de la vulnérabilité sismique et des dommages sont données pour des intensités macrosismiques, comme cela a été le cas sur Grenoble. Cette approche en intensité est donc nécessaire, à défaut de modèle de vulnérabilité en accélération ou autres paramètres du mouvement du sol.

### 2.3.1 Données historiques

Deux types de données ont été utilisés dans cette étude: (1) les séismes historiques, définis par leur localisation et leur intensité épacentrale, avec l'indication des qualités associées (ces données sont nécessaires pour calculer les lois de distribution en intensité) ; et (2) une base de données en intensité macrosismique ponctuelle, qui sert de support à l'élaboration des lois d'atténuation régionale.

Le catalogue de sismicité est constitué de données de base décrites précédemment en adoptant les critères suivants:

- Intensité épacentrale  $\geq$  IV MSK
- Qualité de position  $\leq$  "D" (*i.e.* : "A" ou "B" ou "C" ou "D")
- Nombre d'observations  $>4$
- Intensité Observée Maximale  $\geq$ IV

L'analyse des données macrosismiques recensées dans les communes aboutit au constat que l'information est parfois parcellaire. On observe par exemple, que pour Grenoble, 51 observations macrosismiques sont renseignées, alors que pour la ville voisine de Fontaine, située à moins de trois kilomètres au nord-ouest de Grenoble, seulement 10 données macrosismiques sont signalées. Ceci indique que toute l'information macrosismique n'est pas forcément renseignée en dehors des grandes villes. Seules les données dans Grenoble, la plus grosse ville de la région, sont sélectionnées ici pour s'assurer d'une information sur les intensités observées la plus complète possible.

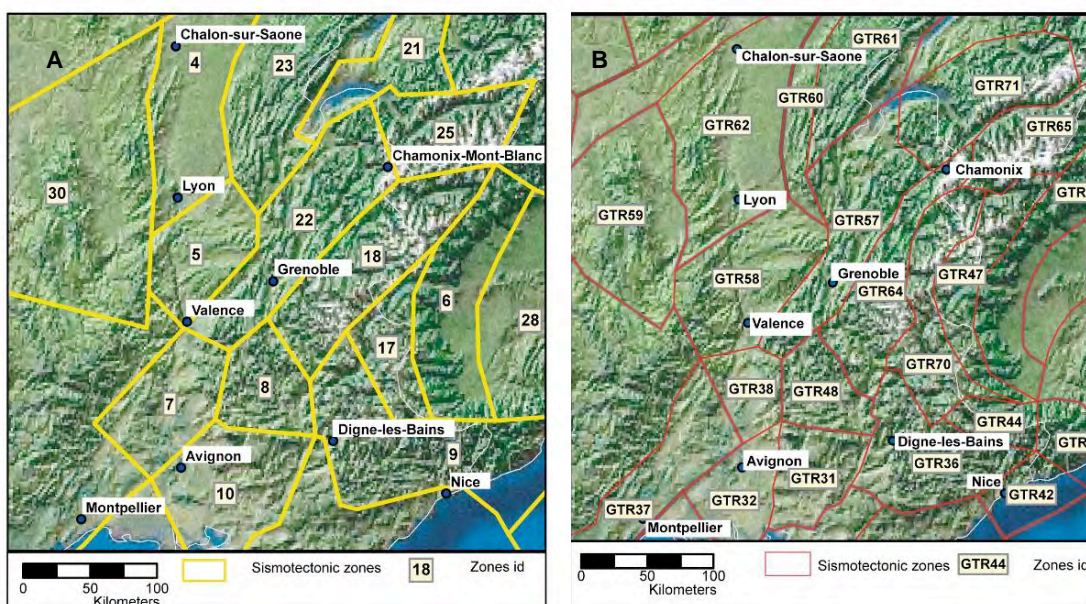
### 2.3.2 Zonage sismotectonique

L'exploitation des données géologiques, structurales, néotectoniques et sismologiques permet d'établir des liens entre l'activité sismique, les mécanismes de la déformation actuelle et leur expression au niveau

de certaines structures tectoniques. L'analyse sismotectonique identifie les zones de déformation récente et actuelle, associées au champ de contraintes régional et appréhende les mécanismes de déformation respectif des structures profondes. L'objectif est d'individualiser et de délimiter les différentes unités sismotectoniques, correspondant à des structures tectoniques (failles) ou à des ensembles géologiques et structuraux présentant des caractéristiques sismologiques homogènes (zones). Afin de prendre en compte les incertitudes épistémiques relatives aux zonages, deux modèles sismotectoniques alternatifs sont pris en compte, impliquant une modélisation différente de la distribution de l'activité sismique et des contours des zones.

Tout d'abord, le zonage générale de la France est issu de l'étude MEDD 2002 (Martin *et al.*, 2002), fondée sur une simplification du modèle de base français en 52 zones et réalisé pour l'étude probabiliste de l'aléa sismique de la France (Fig. 2A). La définition des zones est le résultat le plus consensuel possible, en accordant une importance aux données géologiques et à l'histoire tectonique, dans un contexte sismotectonique stable. Des zones à contexte sismotectonique similaire ont été regroupées pour permettre un ajustement des lois de distribution, plus délicat à partir des épacentres macrosismiques, en raison du plus faible nombre d'événements. L'un des objectifs, lors de l'élaboration de ce zonage, a été de caractériser la distribution de l'activité sismique au cours du temps, et de prévoir la distribution de l'activité future à partir des enseignements tirés des événements historiques, dans des zones présentant une homogénéité de la distribution de l'activité. De ce fait, et compte tenu de la difficulté d'associer la majorité des épacentres à des failles ou systèmes de failles bien identifiés, le modèle est constitué de zones assez vastes. A la différence de certains autres modèles sismotectoniques, aucune faille sismogène n'est considérée comme zone source. On pourra se reporter à Martin *et al.* (2002) pour une description détaillée du zonage et de la méthodologie.

Un deuxième zonage (Fig. 2B), nommé GEOTER (Martin *et al.*, 2008), et ajusté à des études plus récentes sur la région des Alpes du Nord, a permis de préciser les contours de certaines zones. Ce modèle correspond à une interprétation des données les plus récentes recueillies sur la connaissance des mécanismes de déformations sismotectoniques de la plate-forme ouest-européenne. La synthèse de ces différents modèles sismotectoniques régionaux a été réalisée dans l'objectif de disposer de zones représentatives de la distribution de l'activité sismique, tout en considérant les grandes entités sismotectoniques caractéristiques de la croûte. Elle est également basée sur l'analyse et l'intégration des données et études les plus récentes (programmes de recherche européens, travaux de thèse, publications internationales...) concernant la structuration de la croûte (état statique), la dynamique récente et actuelle des déformations sismotectoniques, en tenant compte de l'évolution des méthodes et techniques d'analyse actuelles. Parmi les projets européens, on peut citer PALEOIS « Evaluation of the potential for large earthquakes in regions of present-day low seismic activity in Europe », SAFE (« Slow Active Faults in Europe »), GEOFRANCE 3D, ENTEC (Environmental Tectonics, The Northern Alpin Foreland Natural Laboratory). La tectonique et la sismotectonique se sont appuyés sur la publication de la



**Figure 2:** Zonage de la région grenobloise, issu (A) du zonage de la France (Martin *et al.*, 2002), et (B) adapté par GEOTER sur la base d'analyses sismotectoniques régionales (Martin *et al.*, 2008).

carte sismotectonique de la France métropolitaine dans son cadre géologique et géophysique (Grellet et al., 1993), et la publication de l'inventaire des indices de rupture affectant le Quaternaire en relation avec les grandes structures connues en France métropolitaine et dans les régions limitrophes (Baize et al., 2002). Les zones délimitent principalement des unités géologiques considérées comme homogènes du point de vue du champ de contraintes actuel, de l'expression de la déformation récente, et délimitées pour la plupart par des accidents tectoniques importants correspondant le plus souvent aux zones les plus mobiles.

Le Tableau 2 fourni les valeurs des données d'entrée considérées pour le calcul probabiliste du zonage GEOTER. Pour chaque zone sont indiquées la date et l'intensité des séismes historiques les plus forts issus de la base SISFRANCE (<http://www.sisfrance.net/>) et les paramètres sources (Intensité  $I_0$ , intensité macrosismique minimale et maximale, profondeur correspondant à l'intensité minimale et maximale). Pour la zone de Grenoble, sont considérés des séismes d'intensité épiscopale entre 5 et 8 pour des profondeurs entre 3 et 15 km.

Zone sismotectonique		Séismes historiques majeurs			Paramètres sources		
Id	Nom	Date	Intensité $I_0$	Fiabilité Loc./Int.	Int. Min.	Int. Max	H Min/Max
GTR31	Panneau de couverture provençal	11-06-1909	8.5	A/A	5.0	9.0	3-16
GTR32	Alpilles, Crau, Camargue	18-11-1769	7.0	D/B	5.0	7.5	3-16
GTR36	Nappes de Digne-Castellane	20-07-1564 18-01-1618 15-02-1644 12-12-1855	8.0	D/C D/C C/C C/B	5.0	8.5	5-15
GTR37	Languedoc	28-06-1950	6.5	A/K	5.0	7.0	5-15
GTR38	Tricastin	23-01-1773 19-07-1873 08-08-1873	7.5	C/A A/A A/B	5.0	8.0	3-10
GTR42	Arc de Nice	29-12-1854	7.5	B/C	5.0	8.0	5-15
GTR43	Ligurie Sud	23-02-1887	9.0	C/K	5.0	9.5	5-15
GTR44	Argentera	07-04-1966	6.5	A/A	5.0	7.0	5-15
GTR45	Ligurie Nord	30-05-1905	6.0	B/B	5.0	6.5	5-15
GTR46	Plaine du Pau	25-05-1901	6.0	B/B	5.0	6.5	5-15
GTR47	Domaine interne Alpes	12-09-1785	7.5	D/C	5.0	8.0	5-15
GTR48	Diois Baronnies	19-05-1866	7.5	C/K	5.0	8.0	3-8
GTR49	Sud Massif Central	18-10-1833	7.0	D/B	5.0	7.5	5-15
GTR57	Zone externe alpine septentrionale	19-02-1822 25-04-1962	7.5	B/B A/A	5.0	8.0	3-15
GTR58	Cisaillement Nord-Est Bassin Bas-Dauphiné	18-02-1889	6.5	D/B	5.0	7.0	5-15
GTR59	Limagne - Forez	29-06-1477	7.5	C/B	5.0	8.0	5-15
GTR60	Zone de failles sub-méridiennes du Jura externe	09-09-1879	6.0	D/B	5.0	6.5	3-15
GTR61	Bassins permio-carbonifère du Jura central	17-08-1846 21-06-1971	7.0	D/B A/A	5.0	7.5	3-15
GTR62	Bassins permio-carbonifère de la Bresse et du Nord-Est Massif Central	24-06-1878	6.0	B/B	5.0	6.5	5-15
GTR63	Bassin molassique Suisse	27-01-1881	7.0	D/C	5.0	7.5	3-8
GTR64	Massifs externes de l'Oisan, de Belledonne et du Mont-Blanc	11-03-1817 22-07-1881 13-08-1905 25-04-1963	7.0	D/A C/B C/B A/A	5.0	7.5	5-15
GTR65	Valais	25-07-1855	9.0	B/A	5.0	9.5	5-15
GTR70	Nappes externes (Briançonnais, Vanoise)	05-04-1959	7.5	B/B	5.0	8.0	5-15
GTR71	Chablais Préalpes romandes	29-04-1905	7.5	B/B	5.0	8.0	3-8

**Tableau 2:** Paramètres des zones sismiques pris en compte pour l'évaluation probabiliste sur la zone de Grenoble avec le zonage adapté par GEOTER (Martin et al., 2008).

### 2.3.3 Modèle de sismicité

Le calcul des paramètres sismiques des lois de distribution tient compte des périodes d'exhaustivité. Celles-ci sont définies à l'aide de deux méthodes. La première est celle de Stepp (Stepp, 1972). La seconde correspond à une analyse des histogrammes qui représentent le nombre de séismes par fenêtre temporelle pour chaque rang d'intensité. Cet ensemble d'histogrammes a été généré à l'aide du logiciel GEOSIS, développé par GEOTER (Secanell *et al.* 2002). Les périodes d'exhaustivité retenues pour la région de Grenoble pour chaque intensité sont : 1920 (IV-V), 1880 (V-VI), 1830 (VI-VII), 1800 (VII-VIII), 1500 (VIII IX) et 1300 (IX-X).

Dans les régions les moins sismiques, où cette définition n'est pas possible, la complétude des catalogues pose problème pour constituer le modèle de sismicité. Dans la région alpine, la définition des périodes de complétude est toujours possible sauf pour les intensités VIII et IX, en raison du faible nombre de séismes. Pour ces niveaux d'intensités, les périodes obtenues avec le catalogue complet à l'échelle de la France sont adoptées, et contenues dans la base SISFRANCE. Pour l'intensité IX, la date de 1300 est arbitraire. Elle a été adoptée pour tenir compte, dans les ajustements, de l'occurrence du séisme de Bâle/Mulhouse (zone du nord des Alpes).

Pour le calcul des périodes de complétude, les intensités non entières (demi-degré d'intensité) sont comptabilisées dans l'échelon d'intensité immédiatement inférieur. Ce choix est fait après le constat que le nombre d'intensités non entières est toujours nettement inférieur au nombre d'intensités entières (aussi bien inférieures que supérieures) ce qui ne permet pas d'en faire une analyse pertinente.

Le modèle adopté pour définir la distribution de la sismicité est un modèle poissonien de type Gutenberg-Richter donnant le taux d'occurrence annuel pour chaque magnitude. Le calcul des paramètres d'ajustement des courbes de Gutenberg-Richter repose sur la méthode du maximum de vraisemblance de Weichert (1980). Cette méthode est particulièrement adaptée pour tenir compte de périodes d'exhaustivité variables par gamme de magnitude et pour quantifier les incertitudes associées aux paramètres ajustés. Pour la plupart des zones, les échantillons de sismicité sont suffisants pour calculer les paramètres sismiques des zones. Dans le cas contraire, plusieurs zones sont regroupées pour permettre l'ajustement. La pente calculée est alors fixée pour les zones regroupées, tandis que le taux d'activité est partagé proportionnellement à la surface des zones.

Pour le calcul statistique des paramètres sismiques de la loi de Gutenberg-Richter  $a$  et  $b$ , des intervalles d'intensité de 0.5 unité sont utilisés. Pour chaque zone source, et pour chaque calcul des paramètres de la loi de distribution de la sismicité, sont utilisées les périodes de complétude de Grenoble correspondant à la grande zone géographique à laquelle la zone sismique était rattachée, c'est-à-dire dans notre cas les Alpes.

L'intensité minimale considérée pour calculer les ajustements est initialement de  $I_{min}=IV$ . L'ajustement des lois de distribution à partir de ce seuil permet d'intégrer l'échantillon de sismicité le plus large possible et ainsi de pallier à la taille réduite des zones sources ou au manque de données. Quand les ajustements obtenus ne sont pas satisfaisants, d'autres valeurs d'intensité minimale sont utilisées ( $I_{min}=IV-V$ ,  $V$ ,  $V-VI$  ou  $VI$ ). Notons enfin que ces intensités minimales sont indépendantes des intensités minimales à partir desquelles sont opérées les calculs d'aléa sismique. Les valeurs des taux d'activité annuels de chaque zone source sont systématiquement ramenées à l'intensité minimale du calcul de l'aléa sismique.

De manière générale, dans chaque zone source de chaque zonage, une série d'ajustements est réalisée suivant différents pas d'intensité et différentes intensités minimales. Le meilleur ajustement est choisi en fonction des critères suivants :

- Calcul des paramètres  $a$  et  $b$  et des écarts types associés. Les ajustements aboutissant aux écarts types les plus faibles sont privilégiés.
- La pente de l'ajustement doit rester dans un intervalle compris entre 0.25 à 0.75.
- L'ajustement graphique entre la loi de distribution et les données de sismicité doit être satisfaisant.

Finalement, un contrôle de la cohérence des ajustements est réalisé pour vérifier que les taux d'activité annuels par intervalle de magnitude cumulés sur l'ensemble des sources d'un zonage donné coïncident avec les taux issus du catalogue de la zone d'étude.



### 2.3.4 Modèle empirique de prédiction des intensités macrosismiques

Suivant l'analyse des cartes macrosismiques disponibles dans la base SISFRANCE, un modèle d'atténuation sur la région Alpes a été considéré. A partir des épicentres et des données macrosismiques, on définit la décroissance  $I_0 - I$  en fonction de la distance entre le point d'observation et l'épicentre.

Arroucau et al. (2006) ont défini une loi d'atténuation globale pour l'ensemble de la France, à partir de l'exploitation des données ponctuelles de la base SISFRANCE (échantillon de 1 000 données ponctuelles). Pour la région Alpes, les épicentres et les données macrosismiques sont sélectionnés suivant ces critères :

- IEPC (Intensité épicentrale)  $\geq$  IV MSK
- QPOS (qualité de position)  $\leq$  "D" (c'est à dire "A" ou "B" ou "C" ou "D")
- Nb\_OBS (nombre d'observations)  $>$  4
- Max\_IOBS (Intensité Observée Maximale)  $\geq$  IV

En considérant l'ensemble des données, l'échantillon de calcul comporte un nombre supérieur de faibles intensités, et un risque de biaiser la loi d'atténuation en raison d'un poids plus fort accordé aux faibles intensités. L'ajustement du modèle aux données a été fait par la méthode des moindres carrés. Plusieurs tests de sensibilité ont été réalisés (Martin et al., 2008), non détaillés ici, mais permettant de vérifier l'ajustement des modèles. Parmi les tests, on constate que le modèle s'ajuste bien aux données macrosismiques produites par les fortes intensités épicentrales (VII, VIII et IX) et moins aux plus faibles. L'atténuation avec la distance montre également une prédiction plus forte des intensités macrosismiques à courtes distances qu'à longues distances, ce qui peut traduire un effet d'échelle entre petits et gros séismes identique à celui observé sur les magnitudes.

Les tests de sensibilité réalisés ont conduit à proposer le modèle suivant pour la région Alpes:

$$I_0 - I = -0.3209 - 0.019R_{epi} + 1.6938 \log_{10}(R_{epi}) \quad (1)$$

avec  $\sigma=0.91$

$$\Delta I = I_0 - I = 3.4 * \log_{10} \left( \frac{\sqrt{R_{epi}^2 + 11.72^2}}{11.72} \right)^1 + 3.4 * 10^{-5} * \log_{10}(e) * (\sqrt{R_{epi}^2 + 11.72^2} - 11.72) \quad (2)$$

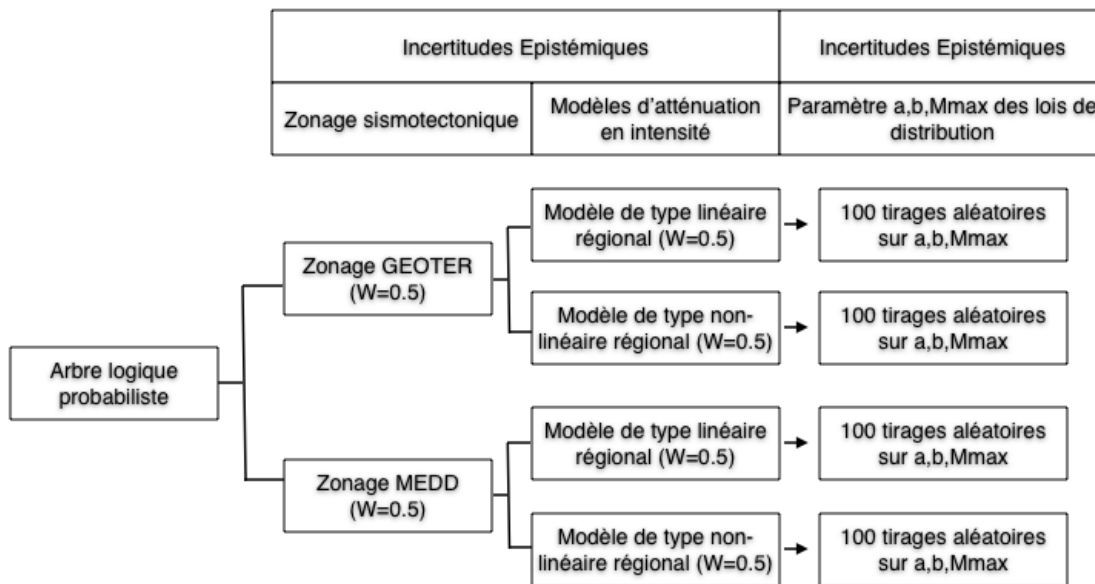
avec  $\sigma=1.04$

### 2.3.5 Calcul probabiliste

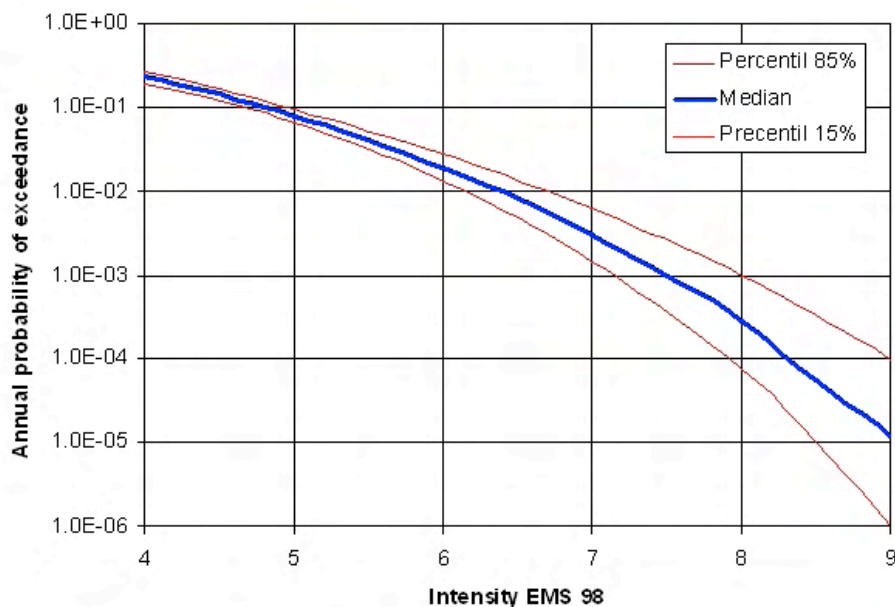
Le calcul probabiliste de l'aléa sismique est opéré en suivant les branches d'un arbre logique de décision, comme proposé par Bommer et al. (2005) afin d'évaluer les incertitudes. L'ensemble des branches de l'arbre logique de la Figure 3 est testé, pour chacune des 100 combinaisons de paramètres aléatoires, en chaque point de la grille. Au total, 400 simulations sont réalisées donnant lieu à chaque fois à un calcul d'aléa. Chaque calcul consiste à déterminer la probabilité annuelle de dépassement d'une série d'intensités et résulte en une courbe d'aléa.

En tenant compte des pondérations relatives aux branches de l'arbre logique, un traitement statistique permet d'exprimer les résultats et leur dispersion sous la forme de 3 courbes d'aléa associées aux valeurs médianes et percentiles 15% et 85% des distributions de probabilité annuelle.

L'exploitation des courbes d'aléa en chaque point de la grille, permet de définir les intensités associées aux périodes de retour d'intérêt en interpolant les valeurs sur les courbes d'aléa en intensité. De la même façon les résultats et leur dispersion, sont exprimés par les valeurs statistiques médianes, et celles des percentiles 15% et 85%. On constate ainsi sur la Figure 4 que les périodes de retour des séismes produisant une intensité macrosismique de VI (apparition des dommages) est de l'ordre de  $10^{-2}$ , et de  $10^{-5}$  pour une intensité VIII, des valeurs assez comparables à celles proposées par des modèles en magnitude.



**Figure 3** : Arbre logique pour l'évaluation probabiliste de l'aléa utilisé pour tenir compte et évaluer les incertitudes.



**Figure 4** : Courbe d'aléa de Grenoble : probabilité annuelle de dépassement des intensités.

### 2.3.6 Intégration des effets de site dans l'évaluation probabiliste

Afin de tenir compte même grossièrement des effets de site variables sur Grenoble, plusieurs solutions sont possibles.

**Solution 1: modulation des intensités en fonction de la nature des terrains**

Quelques auteurs proposent des incréments d'intensité en fonction de la nature des terrains. par exemple Medvedev (1962) s'appuie sur l'échelle d'intensité MSK pour attribuer des incréments en fonction des sols, tandis que Astroza and Monje (1991) utilise l'échelle IMM. Les valeurs d'incréments sont données dans le Tableau 3.

<i>Medvedev 1962</i>	$\Delta I$ (MSK)
Granite	0
Marne, calcaire, grès	0.2-1.3
Gypse, Marbre	0.6-1.4
Alluvions (graviers et blocs)	1-1.6
Sable	1.2-1.8
Argile	1.2-2.1
Remplissage incontrôlé	2.3-3
Sol saturé (graviers, sables, argiles)	1.7-2.8
Remplissage incontrôlé et saturé	3.3-3.9

<i>Astroza and Monje 1991</i>	$\Delta I$ (MM)
Granite	0
Cendre volcanique	1.5-2.5
Graviers	0.5-1.0
Alluvions	1.0-2.0
Dépôts lacustres	2.5

**Tableau 3:** Corrélations entre la géologie et l'incrément d'intensité (d'après Medvedev, 1962 - gauche, et Astroza and Monje, 1991 - droite)

### **Solution 2: modulation du facteur d'amplification en fonction de la nature des terrains**

Plusieurs auteurs proposent des coefficients d'amplification spectrale (ASHA), tenant compte des conditions des sols. Ces coefficients sont des coefficients relatifs par rapport à un mouvement du sol de référence et une gamme de fréquence qui ne sont pas les mêmes selon les auteurs. Les propositions suivantes sont données pour information Tableau 4, selon une situation proche de celle de Grenoble.

<i>Borchert and Gibbs 1976</i>	AHSA
Vase, tourbe	11.2
Alluvions	3.9
Santa Clara formation	2.7
Great Valley formation	2.3
Franciscan formation	1.6
Granite	1.0

<i>Shima (1978)</i>	AHSA
Tourbe	1.6
Sol végétal	1.4
Argile	1.3
Limons	1.0
Sables	0.9

**Tableau 4:** Corrélations entre la géologie et l'amplification spectrale relative pour le mouvement horizontal (AHSA) (A gauche: pour le bassin de San Francisco, dans une gamme de fréquence de 0.5-2.5 Hz, et par rapport à du Granite, d'après Borchert and Gibbs, 1976 - A droite: pour des sols japonais dans la bande de fréquence 0.1-10 Hz par rapport à des limons, d'après Shima, 1978).

Il existe une relation empirique entre l'AHSA et l'intensité MM donné par Astroza and Monje (1991), de la forme :

$$\Delta I = 0.214 + 2.12 \log(\text{AHSA}) \quad (3)$$

### **Solution 3: en fonction de la classification des sols selon EC8**

Une troisième solution consiste à appliquer la classification des sols selon l'EC8 sur la ville de Grenoble. Le microzonage de la vallée de Grenoble n'est pas formellement disponible mais il est possible de distinguer deux grandes familles de formations sédimentaires à l'aide de la méthode HVSRN (Tadenuma, 2004; Guéguen et al., 2007): les sédiments du Drac à l'Ouest de la ville, composés plutôt de sable,

graviers et galets, et les sédiments de l'Isère à l'Est composés de sable fin et d'argile. Les limites entre Drac et Isère ne sont pas formellement définies. Cependant, à l'échelle de cette étude, nous proposons de définir les limites en fonction des mesures de bruit de fond réalisées dans la ville. En particulier, on montre (Fig. 5a) que des fréquences hautes (au-delà de 1 Hz) sont amplifiées sur les rapports H/V bruit de fond, amplifications dues aux derniers mètres de la colonne de sol.

On peut distinguer ainsi des amplifications comprises entre 1 et 5 Hz à l'Est et au delà de 5 Hz à l'Ouest. Puisque le zonage qui nous intéresse est celui du bâti, nous allons affecter les formations du Drac aux zones bâties situées à l'Ouest de la limite arbitraire représentée par un trait noir sur la Figure 5. Une deuxième zone, située à l'Est possède les mêmes valeurs de fréquence et sera donc caractérisée avec le même incrément d'intensité.

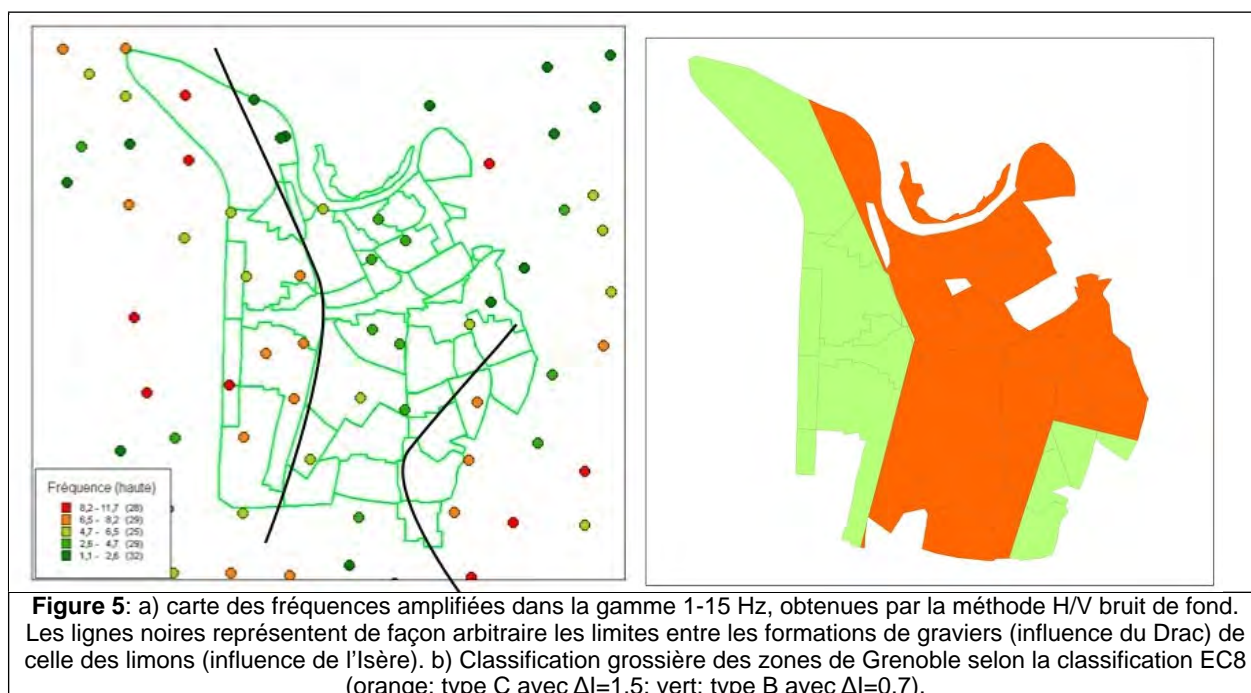
### **Solution adoptée.**

Afin de tenir compte de la variabilité des effets de site dans Grenoble, nous proposons de procéder de la manière suivante:

1. A l'aide des mesures H/V bruit de fond, on repère les zones urbaines sur lesquelles les formations de surface sont plutôt composées de sable et gravier (zone 1) et celles qui sont composées de limons et argiles (zone 2). On distinguera ainsi (Fig. 5b) les sols de type B (sables et graviers) des sols de types C (limons et argiles). Les coefficients de majoration des intensités macrosismiques sont extraites de Astroza et Monje (1991), en choisissant des valeurs moyennes. On constate cependant que ces valeurs moyennes sont proches de celles des autres méthodes. Dans l'arbre logique, il serait possible d'introduire là encore une source d'incertitude en prenant plusieurs solutions pour tenir compte des effets de site. A ce stade de l'étude, et parce que le zonage sismique n'est pas précis ni finalisé, il ne nous a pas semblé nécessaire de détailler la prise en compte des effets de site.

2. Pour la zone 1, l'aléa calculé au rocher, et exprimé en intensité macrosismique, sera majoré par un incrément d'intensité de 0.7.

3. Pour la zone 2, l'aléa calculé sera majoré par un incrément de 1.5.



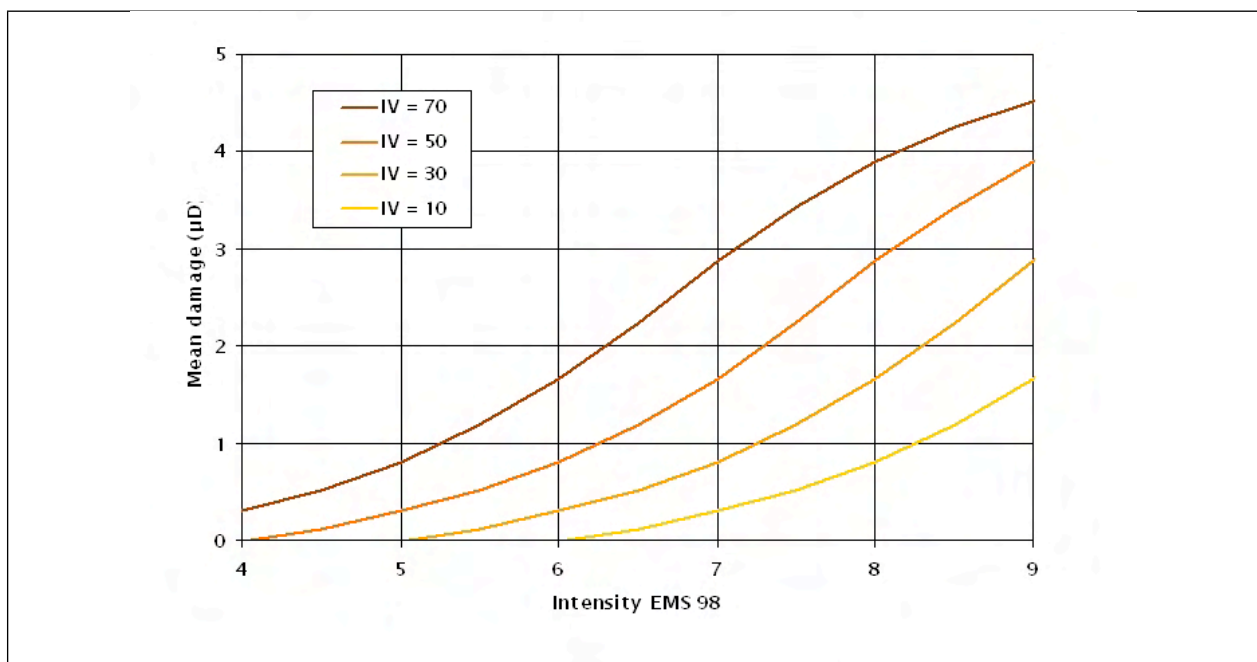
### 3 Evaluation de la vulnérabilité sismique

L'évaluation la plus pertinente de la vulnérabilité d'un bâtiment consiste à caractériser complètement la structure. Nécessaire pour une étude spécifique, cette solution est inapplicable pour l'inventaire d'un grand nombre de bâtiments. En effet, elle nécessite des informations détaillées sur la structure (matériaux de construction, organisation structurale, conception et design...), des moyens de simulations considérables (méthodes numériques, analytiques, nonlinéaires...) et donc des ressources humaines compétentes en dynamique des structures, ce qui dans le cas d'une analyse à grande échelle est difficilement envisageable.

Depuis plusieurs années, les régions du monde qui ont subi des dommages sismiques ont initié des méthodes d'analyse de la vulnérabilité à grande échelle. Directement issues des retours d'expérience, elles dépendent du nombre de bâtiments à analyser ainsi que du budget et du temps disponibles. Les premières méthodes se sont ainsi essentiellement développées aux Etats-Unis (ATC21, 1988 ; FEMA, 1997 ; Hazus, 1999), au Japon (Otani, 2000), en Turquie (e.g., Ergunay and Gulkan, 1991), au Canada (Ventura et al., 2005 ; Onur et al., 2005), en Italie (Benedetti and Petrini, 1986 ; GNDT, 1993, Seismocare, 1998 ; Faccioli et al., 1999 ; Dolce et al., 2003), mais aussi plus largement en Europe (D'ayala et al., 1997), en Belgique (Jongmans et Plumier, 2000), au Portugal (Oliveira, 2003), en Suisse (Steimen et al., 2004) ou en Espagne (Roca et al., 2006). Récemment, un projet européen (RiskUE, 2003; Spence and Lebrun, 2006) s'est focalisé sur la vulnérabilité de 7 grandes villes européennes et un consensus a été atteint pour la définition d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité. Une étude bibliographique portant sur ces méthodes a été menée par le groupe de travail de l'AFPS « Vulnérabilité sismique du bâti existant – Approche d'ensemble » (Combescure et al., 2005) en vue d'une application en France. Des similitudes apparaissent entre les méthodes :

- toutes admettent différents niveaux d'investigation selon la qualité de l'estimation;
- elles graduent les dommages et classent les constructions suivant une typologie pré-définie;
- elles se basent sur la recherche d'indicateurs structuraux qui modulent la vulnérabilité, collectés en auscultant visuellement le bâtiment d'étude.

Au moment de leur application, elles suivent un cheminement identique : établir une échelle de dommage, définir une typologie structurale et sa distribution dans la ville, calculer un indice de vulnérabilité et estimer un dommage pour un niveau d'agression. En général, sur la base d'observations post-sismiques, les indicateurs de vulnérabilité sont reliés de façon statistique aux dommages, grâce à un indice (ou score) de vulnérabilité  $IV_i$  et une pondération  $W_i$ , pour établir des courbes d'endommagement (ou de vulnérabilité), qui estiment le niveau de dommage probable (Fig. 6).



**Figure 6** : Courbes de vulnérabilité pour différents indices de vulnérabilité, représentée en dommage moyen pour une intensité macrosismique.

### 3.1 Le bâti Grenoblois

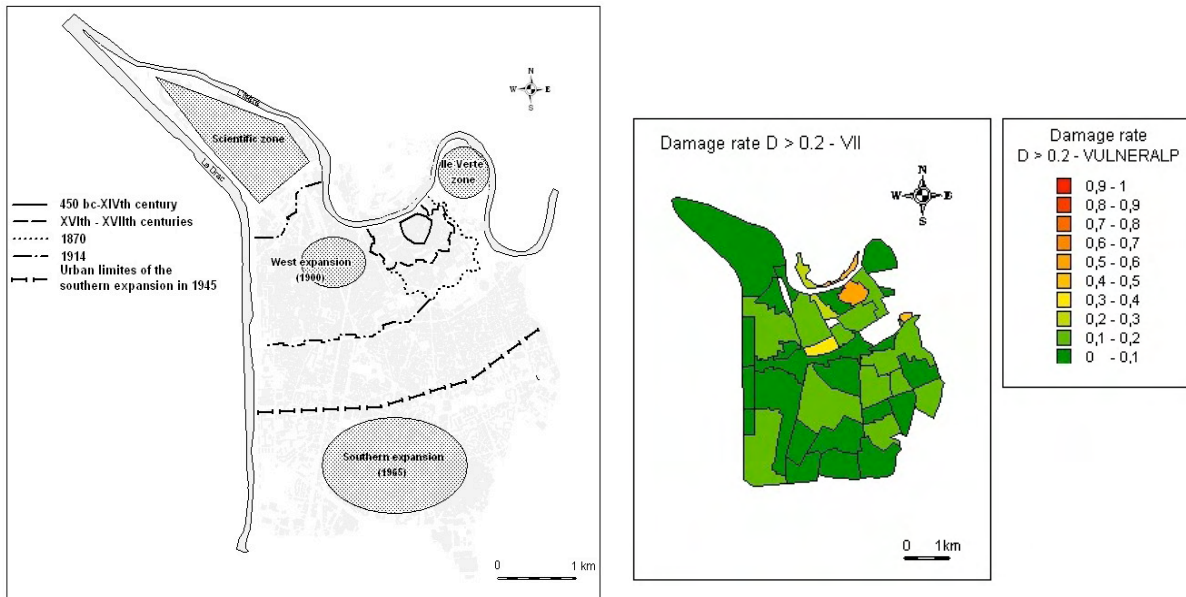
Vers 450 avant JC, l'installation d'un campement d'Allobroges fixe Grenoble sur un dépôt sédimentaire abrité des inondations de l'Isère et du Drac. Dès lors, située aux confins du Dauphiné, proche de la Savoie, de l'Italie et de la Suisse, Grenoble devient une ville stratégique d'un point de vue militaire et commercial (Parent, 1985) dont le peuplement va contrôler l'urbanisation (Fig. 7a). On distingue les phases suivantes :

- **XVI-XVII siècles** : débordant l'enceinte romaine, Grenoble reconstruit les fortifications en deux phases, en 1590 et 1673. La peur des inondations violentes du Drac décourage l'installation en dehors des remparts et les servitudes militaires (casernes, arsenal, enceintes...) limitent le développement de la ville.
- **XVII-XIX** : Jusqu'en 1850, la population de Grenoble n'évolue pas beaucoup (27000 habitants en 1840).
- **1850-1870** : la population augmente (40000 habitants en 1870) et de nouvelles menaces militaires nécessitent la transformation des remparts, élargis vers le Sud.
- **1870-1914** : l'industrialisation peuple l'ouest de la ville à proximité des entreprises (quartier Berriat). En 1901, la moitié de la population de Grenoble y réside. Deux centres urbains coexistent, séparés par des remparts. La municipalité décide alors de détruire les remparts et de créer une nouvelle enceinte ouest pour englober les deux noyaux urbains.
- **1900** : les quartiers de l'expansion (Bajatière, La Capuche, l'Abbaye et le Grand Chatelet) se développent au Sud. Au Nord-Est, le quartier Ile-Verte se transforme aussi à cette époque. La proximité des cimenteries favorise l'usage des ciments comme liant et l'apparition des premières constructions en béton armé.
- **1918-1945** : entre les deux guerres, l'augmentation démographique exige la destruction des fortifications et l'expansion de la ville vers le Sud, avec en particulier les premiers logements sociaux. En 1945, les quartiers Sud totalisent 20000 habitants, soit autant que le centre historique de Grenoble. L'emploi du béton se généralise.
- **1945-1970** : une très forte poussée démographique commence, accompagnée vers 1950 d'un boom immobilier, avec près de 500 logements cette année là. Puis, en onze ans, (1954/1965), autant de logements sont construits qu'il en existait auparavant (47000), à un rythme croissant (1000 / an jusqu'en 1954, 3000/an jusqu'en 1962 et enfin 4500/an jusqu'en 1965). A partir de 1960, les ZUP (Zone à Urbaniser en Priorité) sont installées en groupements autonomes en périphérie au sud de la cité, principalement sur les communes voisines.
- **1970-2000** : en 1999, l'augmentation démographique atteint 397549 habitants sur les 27 communes de l'agglomération. Grenoble reste la ville centre avec ses 160000 habitants des années 60, mais le flux des populations devient plus important sur les communes situées autour. Durant cette période, apparaissent des nouveaux besoins et une nouvelle stratégie de développement de Grenoble, où les espaces libres se réduisent. La poussée démographique ayant été absorbée par les réalisations précédentes et par les communes périphériques, le souci des aménageurs est de mieux construire afin d'humaniser l'urbanisme, par exemple en rénovant les quartiers anciens. On note cependant le développement du polygone scientifique au Nord-Ouest.

Il est donc intéressant de distinguer un centre historique stable au XX<sup>ème</sup> siècle, des quartiers de l'expansion où l'urbanisation s'étale sur plusieurs décennies et des quartiers périphériques aménagés depuis 1950.

Un travail précédent (Guéguen et Vassail, 2003) identifie les types de construction et leur distribution sur Grenoble, selon les particularités locales et les évolutions nationales des constructeurs (les codes de dimensionnement en particulier). Il montre que :

- le centre est essentiellement constitué de maçonnerie de pierre (les carrières des montagnes voisines ayant fourni des pierres calcaires);



**Figure 7:** (a) Histoire de l'urbanisation de la ville de Grenoble depuis l'époque moyenâgeuse et (b) évaluation du dommage moyen  $D_1$  selon l'EMS98 ( $\mu D > 0.2$ ) pour une intensité  $I_{EMS98}$  de VII (d'après Guéguen et al., 2009)

- les quartiers périphériques sont essentiellement en béton armé, poteaux-poutres avant 1965 et murs voiles après 1970;
- les quartiers de l'expansion sont très hétérogènes, mélangeant des maisons individuelles et des logements collectifs, des constructions en béton et des constructions en maçonnerie, réalisées à des époques de construction différentes.

Ordinaire, cette variabilité est le point de blocage de toute étude de vulnérabilité sismique à échelle urbaine. En effet, la qualité sismique du bâti dépend de ses caractéristiques structurales qu'il faut représenter dans la ville. La distinction des constructions en maçonnerie et en béton armé est d'autant plus importante que, d'après les expériences passées, le comportement sismique de ces deux catégories est radicalement différent.

Tout au long de son histoire, Grenoble a été marqué par des vagues successives d'augmentation de sa population. Elles ont systématiquement impliquées des besoins en établissements publics, comme les écoles. La période la plus marquante après les années 60 voit ainsi 12 projets de nouvelles écoles se réaliser en 15 ans. L'expérience montre que les écoles sont les bâtiments publics qui en cas d'endommagement sismique peuvent avoir des conséquences importantes sur la société. En effet, si les écoles subissent les effets des séismes, l'éducation est interrompue, l'organisation sociale est perturbée et des établissements de replis ne sont plus disponibles. L'expérience de l'école de San Giuliano lors du séisme de Molise a tellement marqué l'attention de la société civile italienne qu'un programme de diagnostic sismique des bâtiments sensibles est programmé sur les 5 prochaines années. Par ailleurs, les écoles sont par leur conception même et leur fonction plus susceptible de subir des dommages irréversibles (Augenti et al., 2004). On note en effet quasi-systématiquement des asymétries dues à la présence de préaux ou de classes en enfilade le long d'un côté, deux critères à priori favorisant la vulnérabilité, pour des bâtiments en général construits avant l'application des règles parasismiques. Le retour d'expérience des séismes de Turquie (2001), Taiwan (2001), de Molise (2002) et d'Algérie (2003) ont montré la possible vulnérabilité des écoles et le traumatisme inhérent à l'effondrement de ces bâtiments.

### 3.2 La vulnérabilité du bâti Grenoblois selon VULNERALP

La méthode VULNERALP (Guéguen et al., 2007) a été développée sur Grenoble, une ville exposée à une sismicité modérée, imposant l'adaptation des méthodes issues des pays à forte sismicité. Une certaine similitude entre les constructions anciennes italiennes et françaises (en particulier en maçonnerie) permet

de s'inspirer entièrement de la méthode du GNDT (GNDT, 1993 ; Seismocare, 1998). Elle consiste à identifier les faiblesses probables des constructions vis-à-vis du séisme et à leur attribuer une note ou indice de vulnérabilité, calée sur des observations de dommage lors de séismes destructeurs italiens. Ces valeurs ont été utilisées dans la méthode VULNERALP puisque aucun retour d'expérience exhaustif n'est disponible en France. Cette méthode, certainement la plus validée en Europe, permet également la représentation des dommages, et leur équivalence avec le dommage moyen  $\mu D$  (Tab. 5). Suivant la méthode VULNERALP (Guéguen et al. 2007), à chaque indice de vulnérabilité  $IV$  est associée une courbe de vulnérabilité, qui permet de déterminer un dommage moyen ( $\mu D$ ) selon l'échelle de dommages EMS98 en fonction d'une intensité macrosismique donnée ( $I_{EMS}$ ):

$$\mu D = 0.5 + 0.45 \arctan(0.55(I_{EMS} - 10.2 + 0.05IV)) \quad (4)$$

Les typologies des constructions utilisées dans VULNERALP sont identiques à celles détaillées dans l'EMS98. Le niveau 1.0 de VULNERALP, validé sur la ville de Nice (Guéguen et al., 2007), est donc établi sur la base de 6 critères structuraux que sont :

- le matériau de construction,
- l'irrégularité en élévation,
- l'irrégularité en plan,
- la forme du toit,
- son époque de construction,
- la nature de la fondation au sens du GNDT.

Les critères utilisés pour l'évaluation sont élémentaires : ils ne nécessitent pas d'entrer dans les bâtiments et les pré-requis sont limités. En revanche, ce type d'évaluation suppose une bonne connaissance du milieu urbain afin de distinguer en particulier les époques et les matériaux de construction. Cette stratégie permet alors de relier la vulnérabilité à un niveau de dommage compatible avec celui de l'EMS98. Des matrices sont ensuite proposées, avec l'intervalle des valeurs probables [ $IV$ -; $IV$ +] extraites des critères et des valeurs du GNDT. Une fois la méthode définie, il reste à collecter des informations sur les bâtiments et leur distribution sur la zone d'étude.







La simplicité de la méthode développée nous a incité à questionner la population au moyen d'une enquête simple. Contrairement à la pratique en matière d'analyse de vulnérabilité physique, l'outil enquête est d'usage courant en sciences sociales et il sert très fréquemment à l'évaluation de la vulnérabilité sociale. Le questionnaire reprenait ainsi les critères structuraux nécessaires à l'estimation de l'indice de vulnérabilité ( $IV$ ). Il était binaire (réponse oui ou non) et didactique. Il a été complété par des questions portant sur la connaissance et la représentation du risque sismique par la population grenobloise. Plusieurs tests de validité de cette enquête ont été réalisés, le principale étant de comparer les résultats par quartier à des enquêtes in-situ menées par des experts. Les conclusions (Gueguen et al., 2007) montrent une bonne estimation des enquêtes, quelques soient les types de constructions et la localisation. Dans les quartiers où un manque de données était significatif, des évaluations in-situ d'experts ont été menées afin d'avoir une représentation complète de la ville.

Globalement, on observe sur la Figure 7 que les secteurs les plus anciens dans le centre ville sont les plus vulnérables et seraient les plus endommagés, contrairement aux secteurs périphériques, majoritairement constitués de constructions en béton armé.

### 3.3 Description des dommages

Les niveaux de dommages décrivent l'état d'endommagement des bâtiments après un séisme. L'échelle de dommage utilisée : European Macroseismic Scale (EMS-98) (Grunthal and Levret, 2001), caractérise l'état de dommage sur une échelle discrète de 5 niveaux ( $D_k$ ;  $k=0,1,2,3,4,5$ ) (Tab. 5).



Niveau de dommage	Description du dommage	Etat de dommage	
 5 (D5)	Dégâts structuraux très importants	Destruction	Important
 4 (D4)	Dégâts structuraux importants Dégâts non structuraux très importants	Destruction partielle	
 3 (D3)	Dégâts structuraux modérés Dégâts non structuraux importants	Sévère	
 2 (D2)	Dégâts structuraux légers Dégâts non structuraux modérés	Modéré	
 1 (D1)	Aucuns dégâts structuraux Dégâts non structuraux légers	Mineur	
 0 (D0)	Pas de dommages	Aucun	

**Tableau 5** : Qualification des niveaux de dommage pour les bâtiments en béton armé (EMS-98) (d'après Grunthal et Levret, 2001)

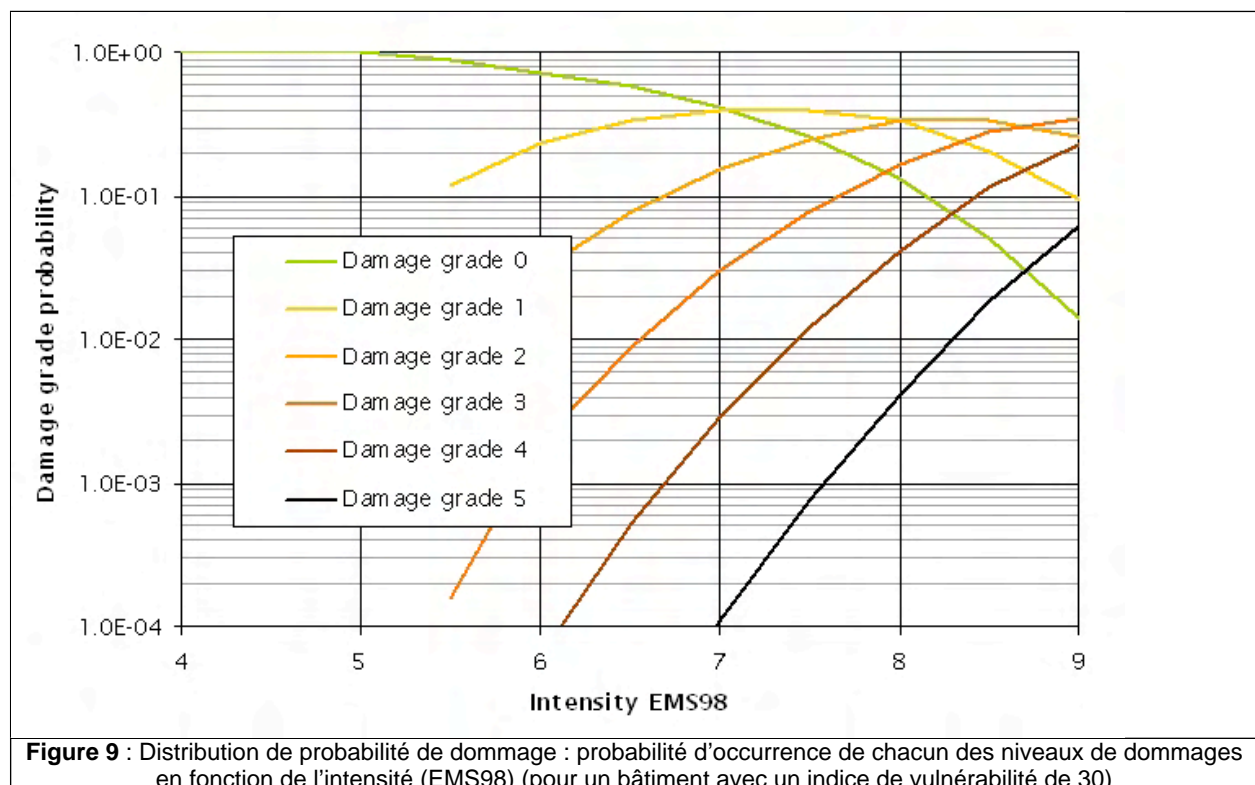
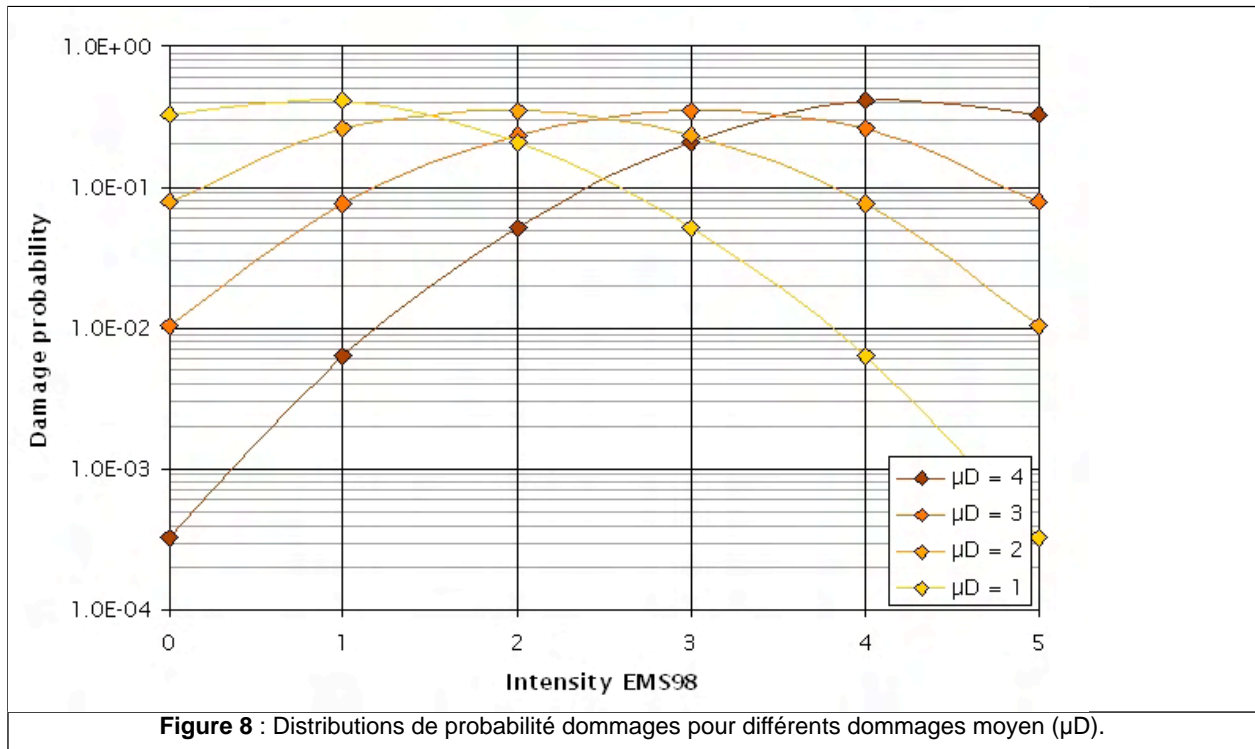
Les courbes de vulnérabilité conduisent à caractériser un dommage moyen ( $\mu_D$ ) qui représente la moyenne des dommages pour des bâtiments de même indice de vulnérabilité soumis à une intensité donnée. Afin de tenir compte de la variabilité des niveaux de dommage, on considère une distribution de dommages autour du dommage moyen  $\mu_D$ .

Des auteurs ont montré que cette distribution peut être évaluée par une distribution binomiale (Milutinovic, 2003, Lagomarsino and Giovinazzi, 2006) (Eq. 5), ajustée aux retours d'expérience de séismes majeurs italiens:

$$P(Dk) = \frac{5!}{k!(5-k)!} \times \left(\frac{i_D}{5}\right)^k \times \left(1 - \frac{i_D}{5}\right)^{5-k} \quad 0 \leq \mu_D \leq 5 \text{ et } k = 1, 2, 3, 4, 5. \quad (5)$$

Il est donc possible pour chaque niveau de dommage moyen de l'équation 4 ( $\mu_D = 1, 2, 3$  ou  $4$ ) de connaître la répartition des probabilité d'observer chaque niveau de dommage selon l'EMS98 (D1, D2, D3, D4 et D5) Elle conduit, à la répartition dans chacun des niveaux de dommages pour un ensemble de bâtiments homogènes, ou à la probabilité d'observer chacun des niveaux de dommages pour un bâtiment en particulier (Fig. 8). Par exemple (Fig. 8) un dommage moyen ( $\mu_D$ ) de 2 (un indice de vulnérabilité de 66 avec une intensité de 6.5) conduit à une probabilité de 26% de dommage de niveau D1, de 34% de dommage de niveau D2, de 23% de dommage de niveau D3 et de 17 % des autres niveaux de dommage.

A partir des équations 3 et 4, les courbes de vulnérabilité et les distributions de dommage sont combinées pour obtenir des courbes de distributions de probabilités de dommage. On obtient ainsi la probabilité d'atteindre chaque niveau de dommage (Do, D1, D2, D3, D4 et D5) pour différentes intensités et un indice de vulnérabilité donné (Fig. 9). Ainsi, pour un indice de vulnérabilité donné, ces courbes permettent de connaître la distribution de probabilité dans chacun des niveaux de dommages en fonction de l'intensité macrosismique. Il est donc possible d'évaluer selon une démarche probabiliste cohérente le dommage pour un aléa donné. A ce stade, l'aléa n'intervient pas dans l'évaluation de la probabilité du risque car la probabilité de l'aléa n'a pas encore été introduite.



### 3.4 Définition des enjeux bâtiment et population

Contrairement à l'aléa et à la vulnérabilité, peu d'informations sont disponibles sur l'impact des dommages sur la population. Cependant, l'exercice prévu à l'origine de ce projet, c'est-à-dire évaluer le risque sismique sur Grenoble, serait incomplet sans l'estimation de l'impact du séisme sur les populations.

Même si cette partie est à prendre avec précaution, quelques données sont disponibles dans la littérature, là encore établies sur la base d'expériences passées.

Les enjeux représentent l'ensemble des personnes et des biens (ayant une valeur monétaire ou non monétaire) exposés aux phénomènes sismiques. On distingue deux types d'enjeux dans notre étude :

- Les occupants : permettant de juger de l'impact sur les vies humaines ;
- Le bâtiment : permettant de juger l'impact sur le bâtiment ;

### 3.4.1. Probabilité de mortalité

Les conséquences du séisme sur les occupants sont jugées suivant la probabilité de mortalité d'un occupant du bâtiment. L'évaluation du nombre de victimes est un exercice délicat car le retour d'expérience montre que ce nombre peut varier significativement. Des auteurs ont tout de même remarqué que l'effondrement des bâtiments (niveau de dommage D5 selon l'EMS98) est la principale cause des décès (75 à 95% des décès, d'après Coburn and Spence, 2002).

Les analyses post-sismiques permettent de dégager des tendances sur les conséquences humaines. La méthode utilisée (Coburn and Spence, 2002) est basée sur l'équation suivante et conduit à un taux de mortalité (MR) en cas d'effondrement (i.e. dommage D5)

$$M_R = M_2 * M_3 * (M_4 + M_5 * (1 - M_4)) \quad (6)$$

Avec :

- M2 le taux d'occupation du bâtiment au moment du séisme (0.5).
- M3 le taux d'occupant coincés par l'effondrement (0.6).
- M4 le taux de mortalité durant l'effondrement (0.4).
- M5 le taux de mortalité après l'effondrement (0.7).

Les taux sont des taux moyens adoptés pour le projet et proposés dans Coburn and Spence (2002). Le taux de mortalité final est MR=0.25 pour chacun des occupants des bâtiments affectés d'un dommage D5. MR représente la probabilité individuelle de mortalité si des dommages de type D5 se produisent. Afin de prendre en compte la variabilité de ce taux, il est considéré une erreur forfaitaire de +-10%.

En notant P(D5) la probabilité d'un bâtiment d'être affecté d'un dommage de niveau D5, la probabilité de mortalité individuelle PM d'un occupant du bâtiment si un séisme se produit est :

$$PM = P(D5) \times MR \quad (7)$$

### 3.4.1. Probabilité de dommages

L'enjeu bâtiment est considéré comme le niveau de dommage atteint en cas de séisme. On considère Eq. 7 la probabilité P(D >= D2) de dépasser ou d'égaliser le niveau de dommage D2, ce qui correspond à la probabilité d'observer un dommage au moins léger :

$$P(D \geq D2) = P(D2) + P(D3) + P(D4) + P(D5) \quad (8)$$

D'autres critères pourraient être considérés, comme par exemple la probabilité d'observer au moins un effondrement total (niveau de dommage D5).

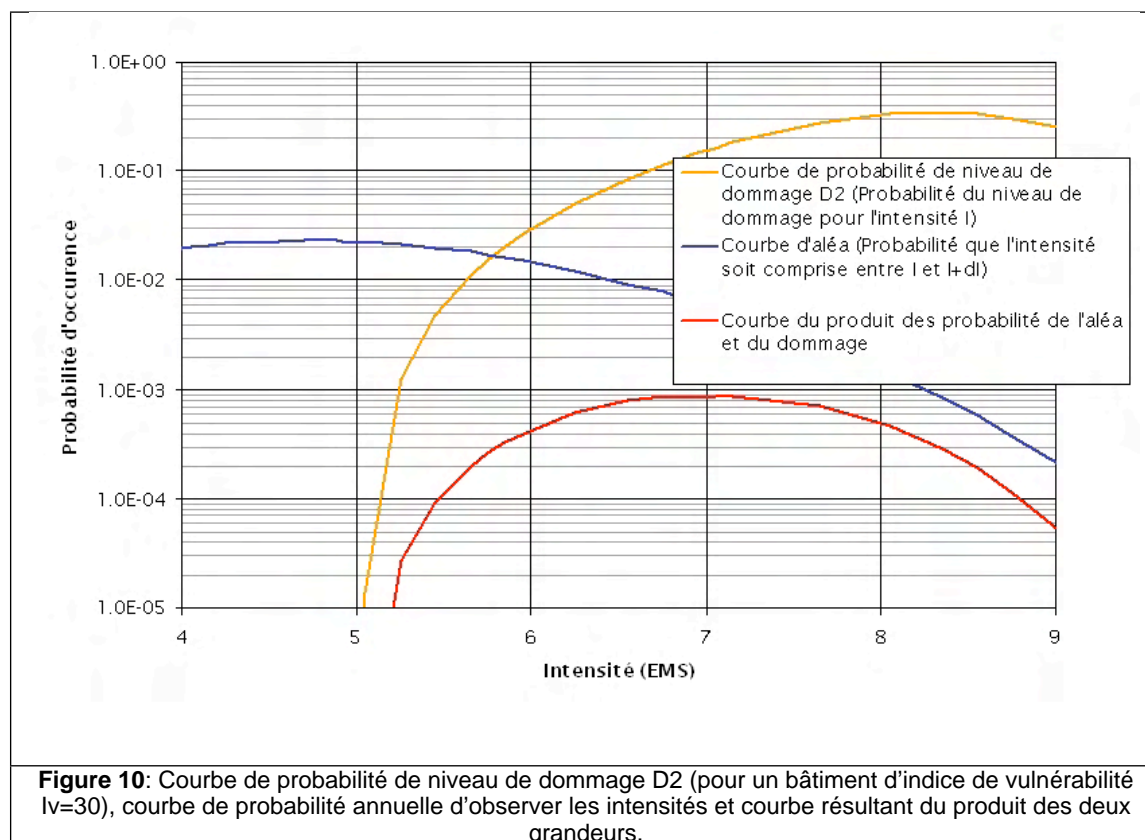
## 4 Evaluation du risque

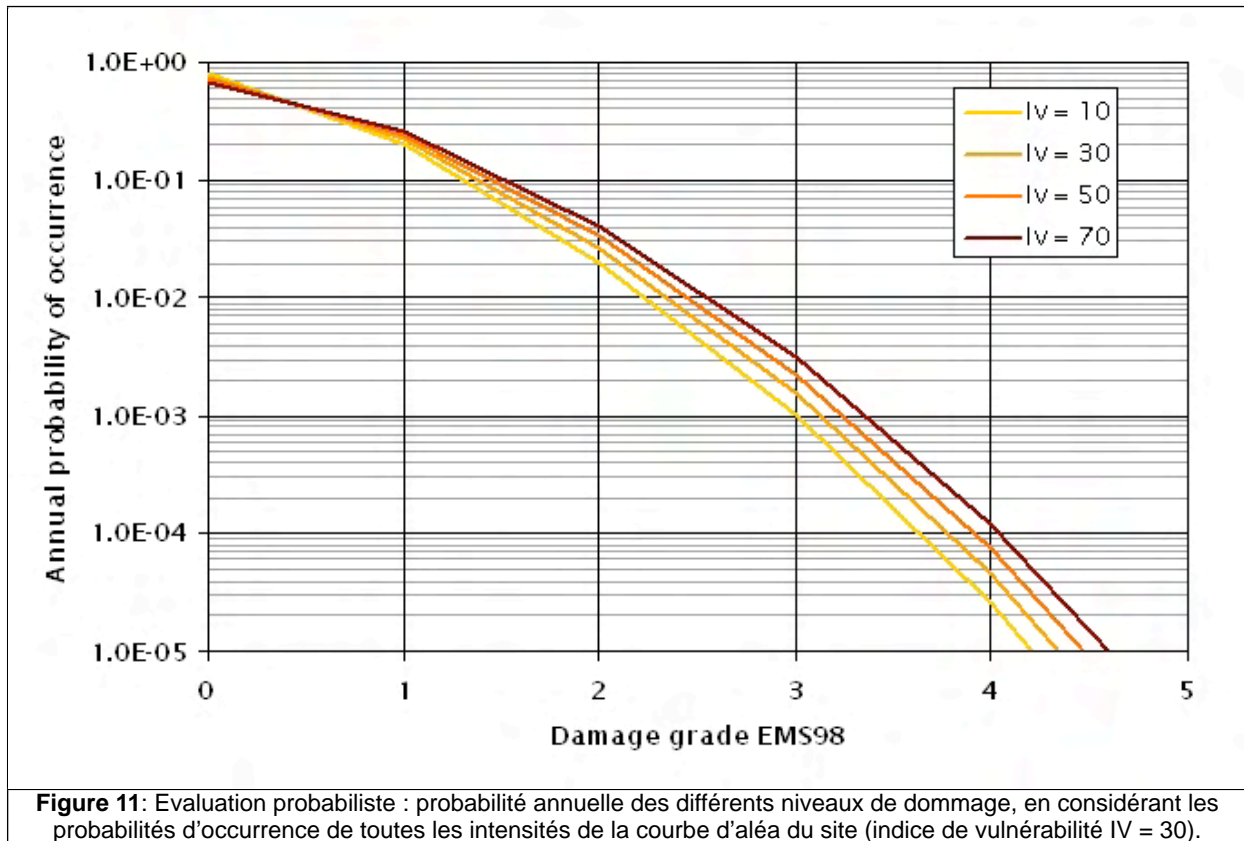
Le risque est évalué en développant une approche probabiliste complète en convoluant les courbes d'aléa, de vulnérabilité et des enjeux. Cette approche permet d'évaluer le risque réel en tenant compte des probabilités d'occurrence de toutes les intensités (des petites aux grandes) et permet de qualifier le risque suivant différents seuils d'acceptabilité, objectif de ce projet. Cette notion d'acceptabilité du risque a été proposée par les Suisses (OFEG, 2005) afin de proposer des renforcements et des réhabilitations du bâti existant selon un niveau de risque acceptable. Cette démarche, dans un pays à sismicité modérée, présente l'avantage d'engager des rénovations sans vouloir atteindre à tout prix le niveau de conformité aux règles parasismiques équivalent à des constructions neuves.

Ainsi, le risque est évalué en deux étapes :

- Evaluation des probabilités d'observer chacun des niveaux de dommage à partir le l'aléa et de la vulnérabilité ;
- Evaluation du risque pour les différents enjeux considérés (i.e., mortalité individuelle et dommage).

Le calcul du risque probabiliste est basé sur la convolution de la courbe d'aléa et de la courbe de dommage. Dans l'approche probabiliste, le processus considère pour toutes les intensités l'ensemble des combinaisons possibles des probabilités d'intensité et des probabilités de dommage (Fig. 10). Ainsi, chaque niveau de dommage est qualifié d'une probabilité dépendant de la vulnérabilité du bâtiment et de la courbe d'aléa du site (Fig. 10). La courbe rouge est le produit de la probabilité d'aléa avec la probabilité de dommage. Dans l'exemple donné ici, l'aire sous la courbe est équivalente à la probabilité annuelle d'observer du dommage D2. Pour chaque niveau de dommage (D0 à D5) et pour chaque indice de vulnérabilité IV, on peut calculer cette probabilité annuelle, telle que représentée Figure 11.





Les incertitudes peuvent être considérées aux différentes étapes du processus de calcul :

- Aléa : Pour le calcul de l'aléa sismique de façon probabiliste, il est utilisé un arbre logique qui conduit à différentes courbes dont il est calculé la valeur médiane, percentile 15 et percentile 85.
- Vulnérabilité : La méthode d'analyse de la vulnérabilité VULNERALP propose des valeurs maximales et minimales aux indices de vulnérabilité pour tenir compte de la variabilité épistémique de l'estimation, due à l'attribution d'un modèle de comportement type pour chaque bâtiment (Spence et al., 2003). La variabilité moyenne observée sur les indices de vulnérabilité de l'étude est de +40 et -20 pour des indices moyens de 25.

Ces différentes incertitudes sont cumulées au cours du processus de calcul du risque en combinant les différentes valeurs entre elles : 3 valeurs d'aléa (percentile 15%, médiane et percentile 85%) et 3 valeurs de vulnérabilité (indices minimum, moyen et maximum).

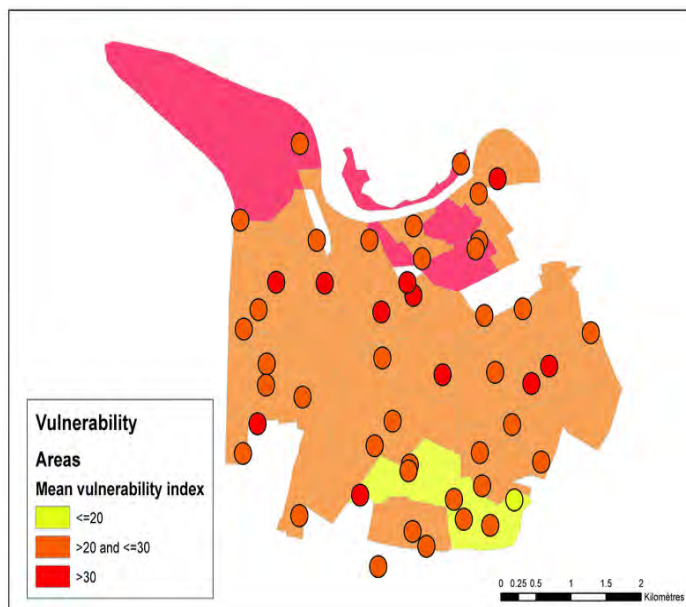
## 5 Discussion sur Grenoble

### 5.1 Résultats

Les Figures 13 à 21 représentent différentes représentations du risque sismique sur Grenoble, en fonction de la période d'observation et pour différentes conséquences. L'étude de risque est menée sur l'agglomération grenobloise de 2 façons différentes en se basant sur les données de vulnérabilité existantes :

- Au niveau de l'agglomération en considérant un indice de vulnérabilité moyen par quartier de typologie homogène (37 quartiers).
- Au niveau des écoles en considérant un indice de vulnérabilité par école (73 écoles).

La Figure 12 représente la vulnérabilité des différents quartiers et des différentes écoles. L'aléa régional est considéré comme identique pour toute la zone d'étude. L'aléa local est pris en compte au droit de chaque quartier et de chaque école suivant leur position respective, en intégrant les effets de site. Lorsque des quartiers se trouvent à cheval sur différentes zones d'aléa local, la variabilité est prise en compte en subdivisant les quartiers.



**Figure 12** : Classification de la vulnérabilité des différentes zones et des différentes écoles.

Les calculs de risque sont menés sur 3 périodes de probabilité :

- 1 an : correspondant aux périodes de probabilité usuelles de présentation des risques (routier, industriels, ...) ;
- 50 ans : correspondant à une durée de vie d'un bâtiment ;
- 475 ans correspondant à la période de retour des mouvements sismiques utilisés dans les codes parasismiques.

Les calculs sont menés 9 fois pour chaque période de probabilité afin de considérer tous les couples possibles d'aléa (médiane, percentiles 15% et 85%) et de vulnérabilité (valeurs moyenne, minimum et maximum).

L'enjeu humain est représenté par la probabilité individuelle de mortalité sur la période considérée. L'enjeu des bâtiments est considéré par la probabilité de dépasser les niveaux de dommage D2 et D5 sur la période considérée :

- Le niveau de dommage D2 correspond à une perte d'opérabilité du bâtiment ;
- Le niveau de dommage D5 correspond à un effondrement du bâtiment.

Sur chaque planche, la valeur médiane de l'aléa et des dommages est représentée au centre de la planche, les valeurs maximales et minimales sont représentées aux coins haut-droite et bas-gauche respectivement.

On observe systématique une plus grande variabilité des valeurs possibles liées à l'estimation de la vulnérabilité et des dommages qu'à celle de l'aléa. Ceci est une conséquence directe de l'estimation de la vulnérabilité au moyen d'une méthode sommaire (VULNERALP, Guéguen et al., 2007). Cette méthode a une incertitude importante mais elle a l'intérêt de pouvoir donner une première représentation de la vulnérabilité à l'échelle d'une ville, en particulier dans un contexte de sismicité modérée. Cependant, il ne faut pas oublier que comme l'ont mentionné Spence et al. (2003) la plus grosse part de l'incertitude dans l'estimation des dommages est d'origine épistémique, du fait de la nécessité de classer chaque construction selon un modèle de comportement générique, alors même que peu d'informations sont disponibles. Ces incertitudes pourraient également être réduites en modifiant la façon de les propager

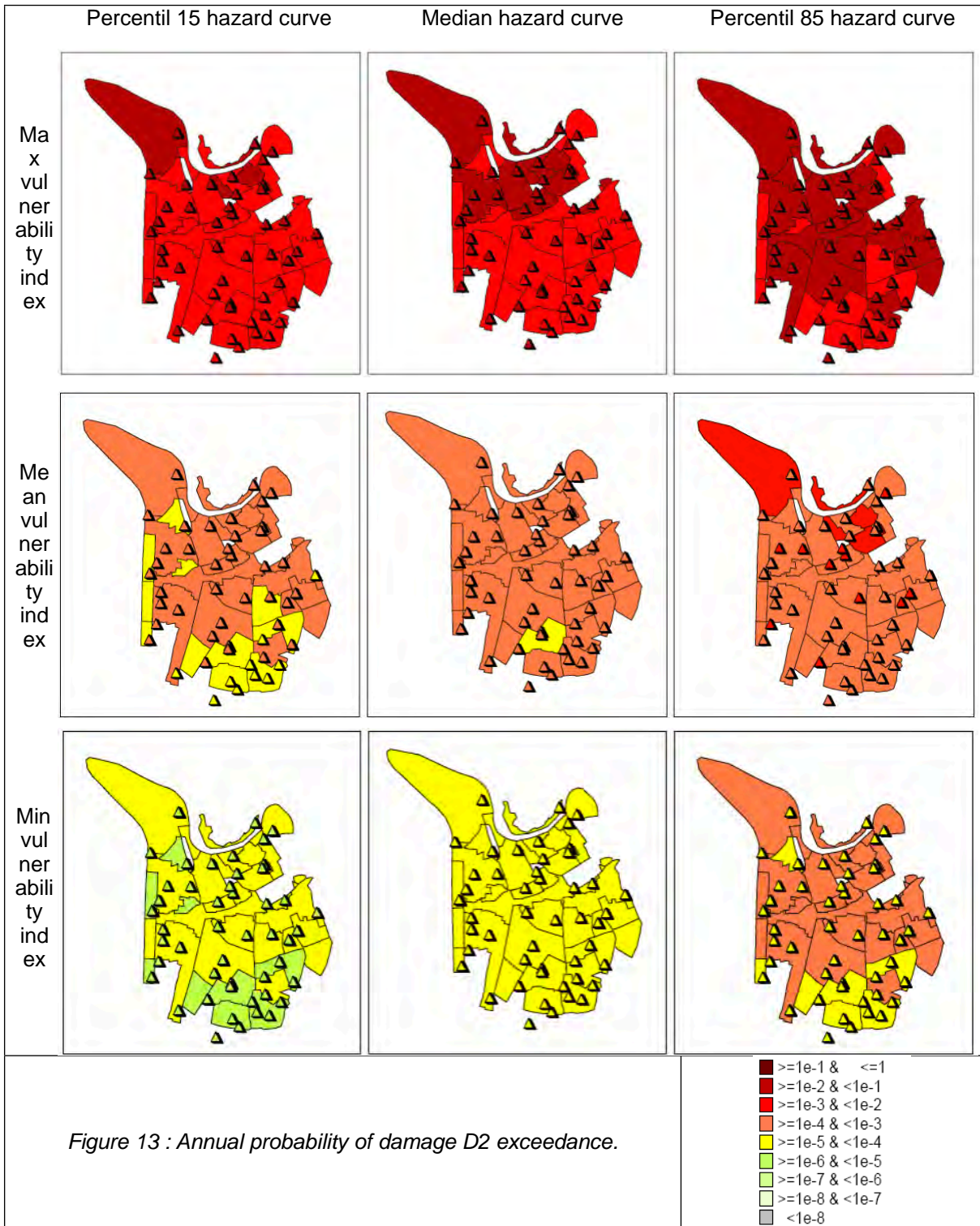
dans l'estimation du risque. En effet, cette façon de calculer les incertitudes en les cumulant conduit à les maximiser sur le résultat final. Pour un calcul probabiliste complet, il peut être envisagé un arbre logique dont les différentes branches correspondent à un tirage aléatoire des différentes valeurs des étapes du calcul, propageant au mieux les incertitudes de l'aléa et de la vulnérabilité.

On constate que la probabilité médiane de dépasser le dommage D2 (la structure est au moins endommagée) est de l'ordre de  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  par an et de  $10^{-2}$ - $10^{-1}$  par 50 ans. Sur 475, qui est la période de retour prise en compte dans la définition réglementaire de l'aléa, la valeur atteint  $10^{-1}$  à 1 dans les quartiers les plus vulnérables (en centre ville). Cela traduit finalement le peu de résistance sismique des constructions en maçonnerie ancienne du quartier historique de la ville.

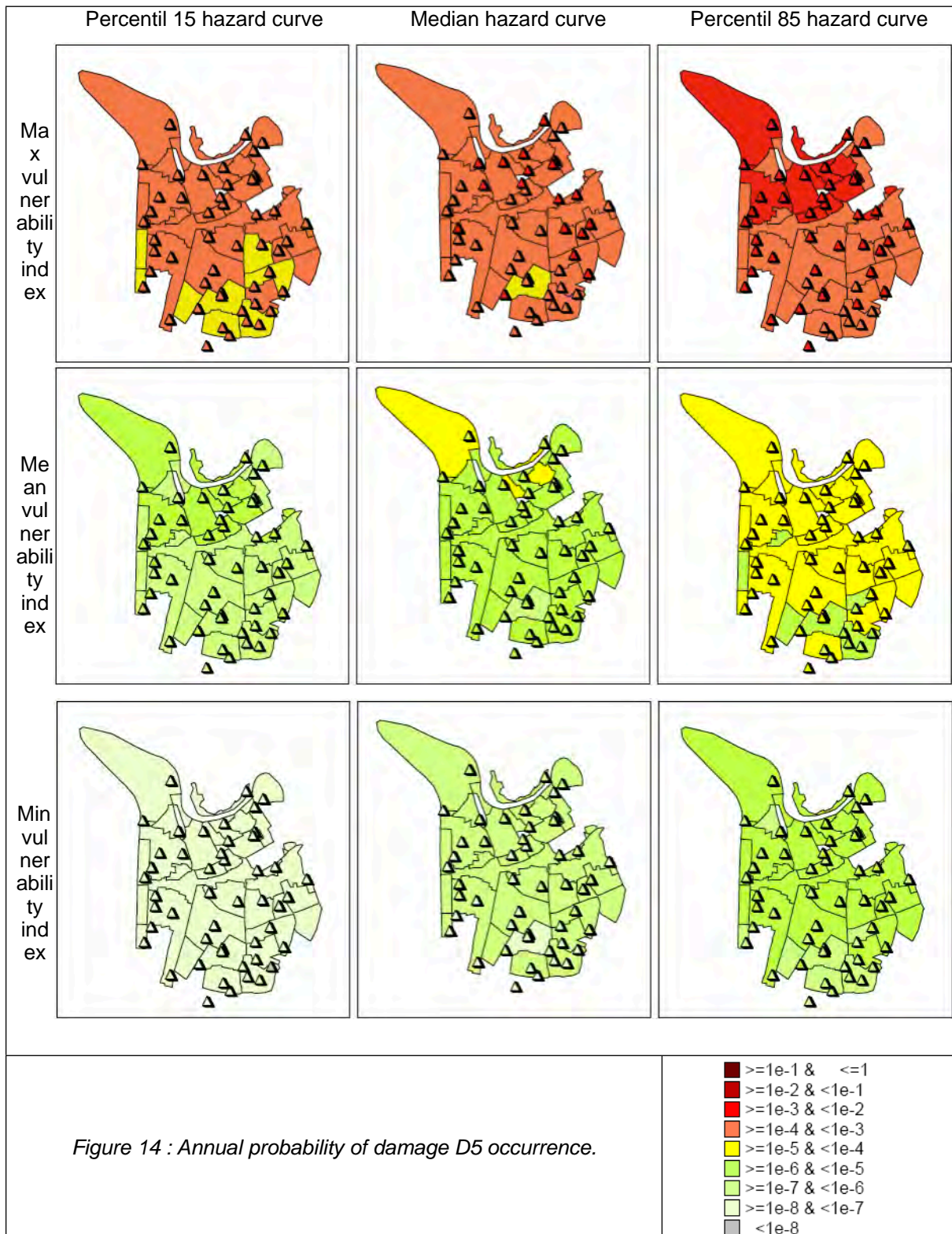
La probabilité d'effondrement des bâtiments par an, par 50 ans ou par 475 ans sont  $10^{-6}$ - $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  et  $10^{-3}$ - $10^{-2}$ , respectivement. Quelques variations à l'intérieure de la ville sont observées, distinguant ainsi les quartiers à priori les plus vulnérables. Ce résultat montre aussi que le risque d'effondrement sur la ville sur 50 ans est moins élevé que le risque d'observer au moins des dommages. Dans un contexte de sismicité modérée, cette observation est intéressante car elle permet de relativiser l'importance du risque sismique, tandis que les dommages au moins légers peuvent avoir des conséquences économiques directes (nécessité de renforcer ou de réhabiliter). L'effondrement total des bâtiments (dommage D5) permet également de comparer le risque sismique à des risques de natures diverses, par évaluation de la probabilité individuelle de décès (Cf § 5.2 à 5.4).

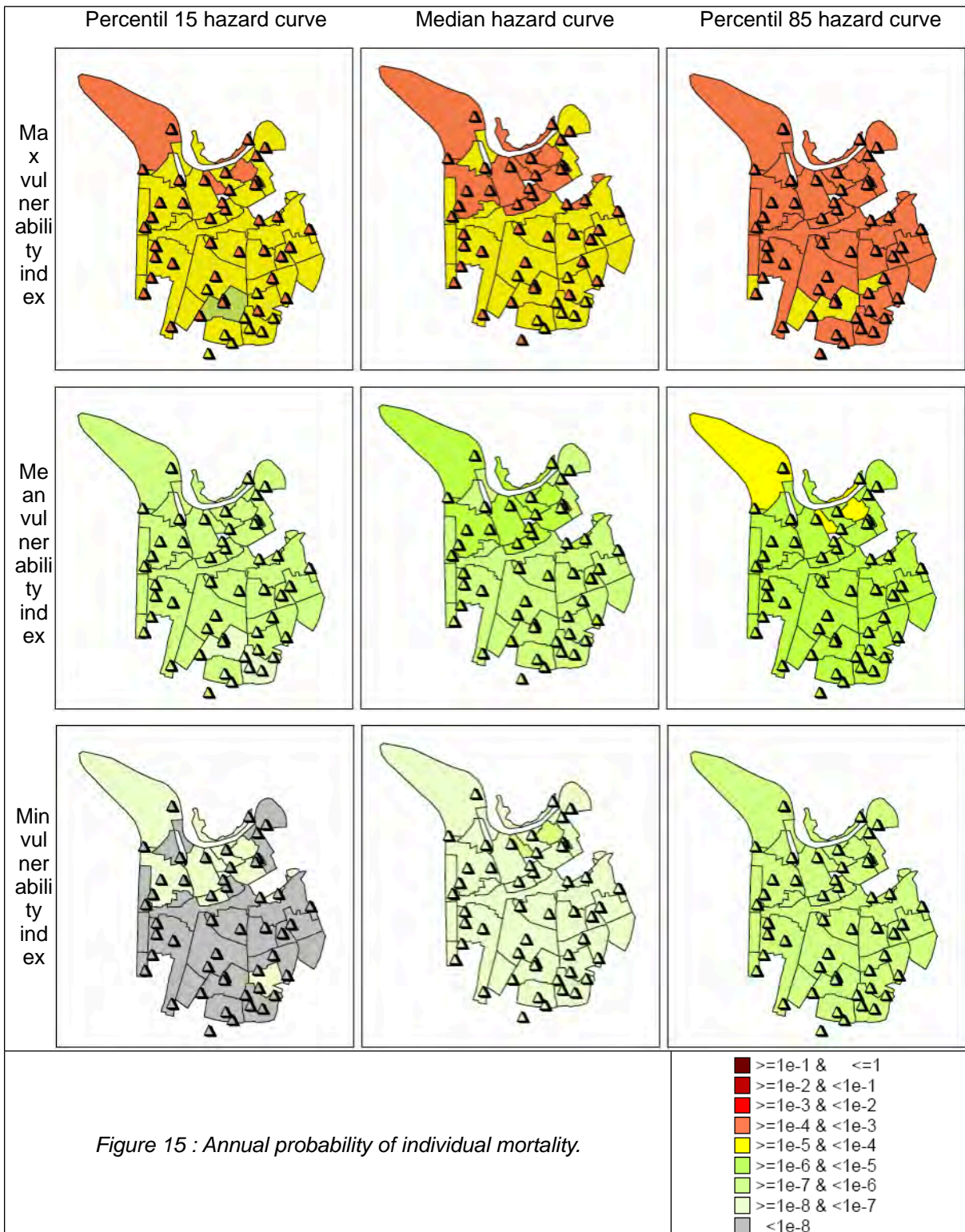
Sur les Figures 13 à 19, les triangles représentent la positions des écoles de la ville dont la vulnérabilité avait été évaluée dans le cadre du projet Sismo-DT, selon la même méthode VULNERALP que pour le bâti courant (Guéguen et al., 2007, 2009). Même si cette méthode empirique sommaire ne peut être significative pour un bâtiment seul, elle permet cependant de hiérarchiser parmi un groupe de bâtiments (ici les écoles) ceux qui a priori présentent les plus mauvaises caractéristiques vis-à-vis de leur tenue au séisme. On constate une grande homogénéité des probabilités médianes de D2 et de D5 entre les écoles et les quartiers, quelque soit les périodes de retour considérées. Cette observation traduit finalement la conséquence de l'urbanisation de la ville au cours des âges. En effet, comme l'ont montré Guéguen et al. (2009), l'urbanisation s'est accompagnée d'une augmentation de la population, nécessitant la construction en parallèle des établissements scolaires voulus par la municipalité depuis longtemps. Ainsi, les écoles ont les mêmes caractéristiques constructives et donc la même vulnérabilité que les quartiers auxquels elles appartiennent.

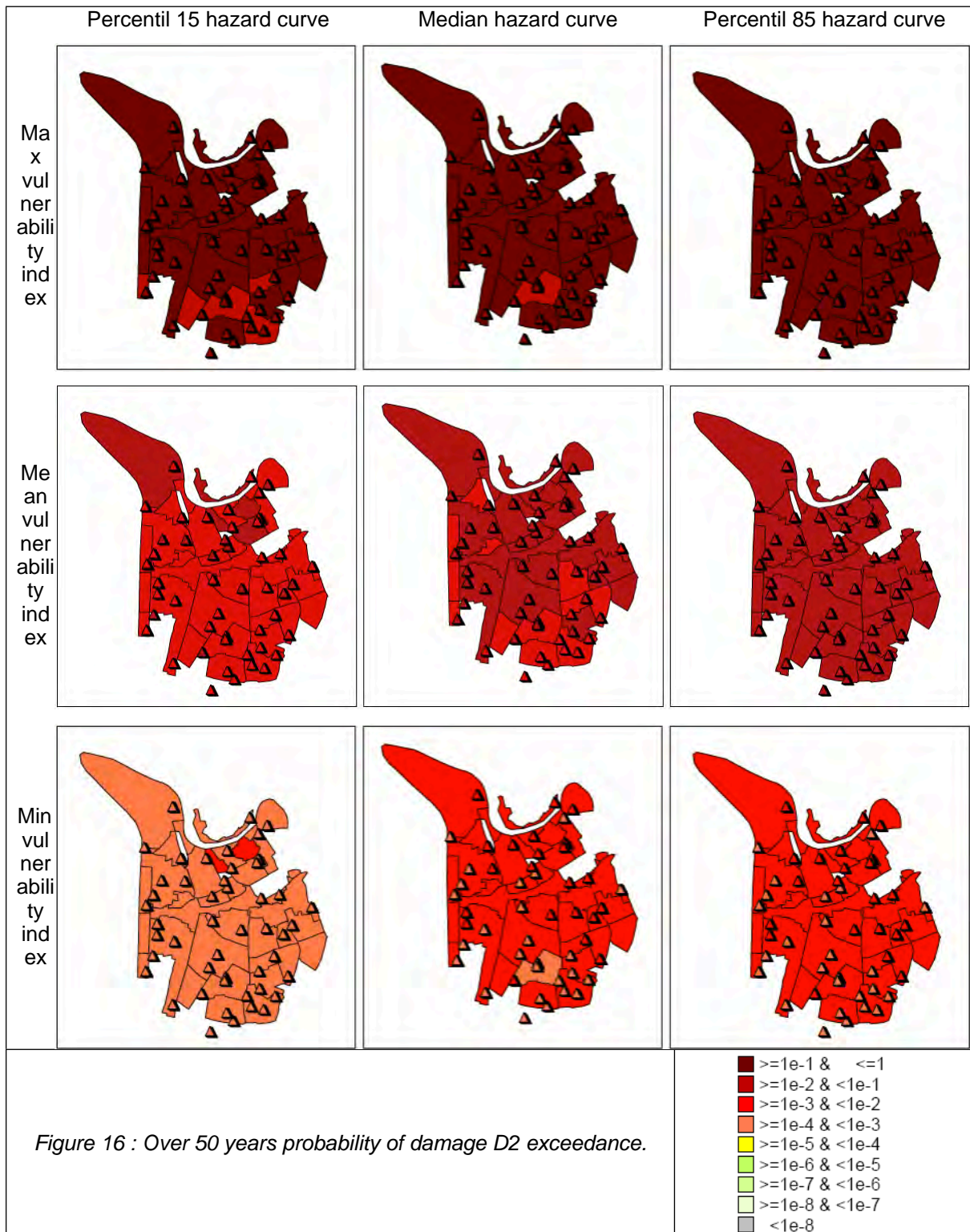
**Figures 13-21:** Probabilité annuelle, à 50 ans et 500 ans d'avoir des dommages au moins légers D2, l'effondrement des constructions (D5) et des pertes en vie humaines. Sur chaque figure sont représentées les valeurs médianes +/- correspondant à la définition de l'aléa (de gauche à droite) et à la vulnérabilité (de bas en haut). Les triangles représentent la localisation des écoles de Grenoble, évaluées de la même façon que le reste du bâti courant.

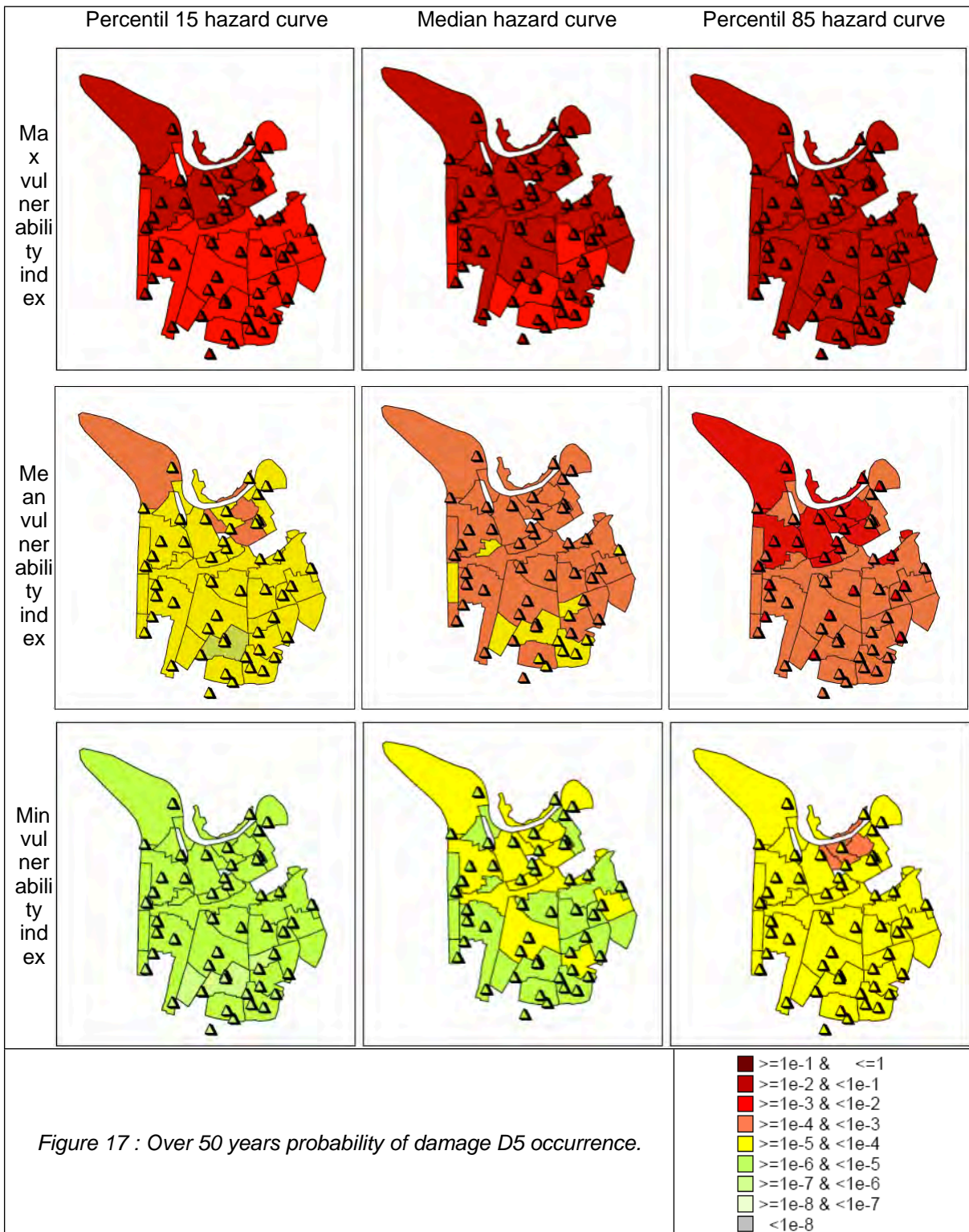


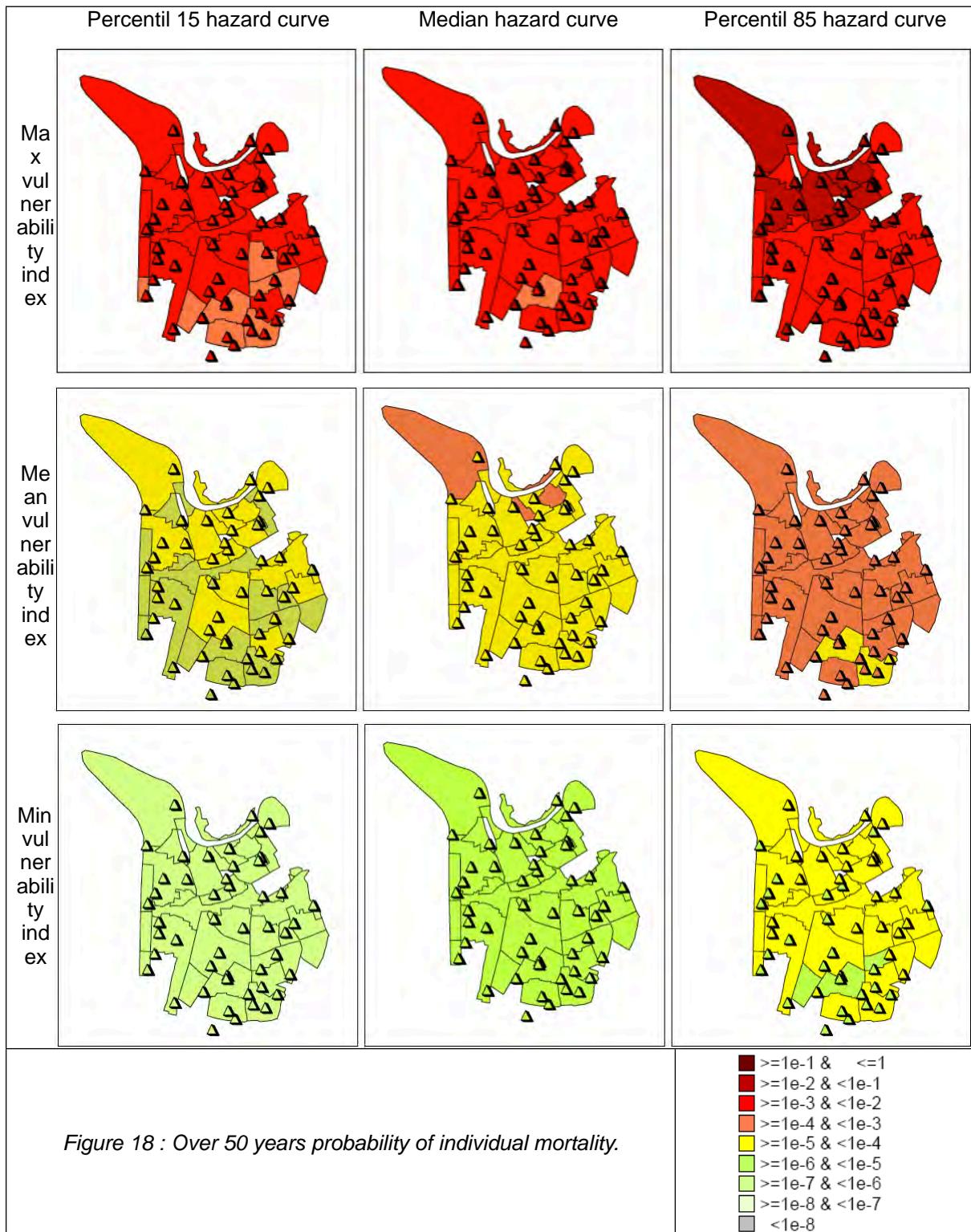


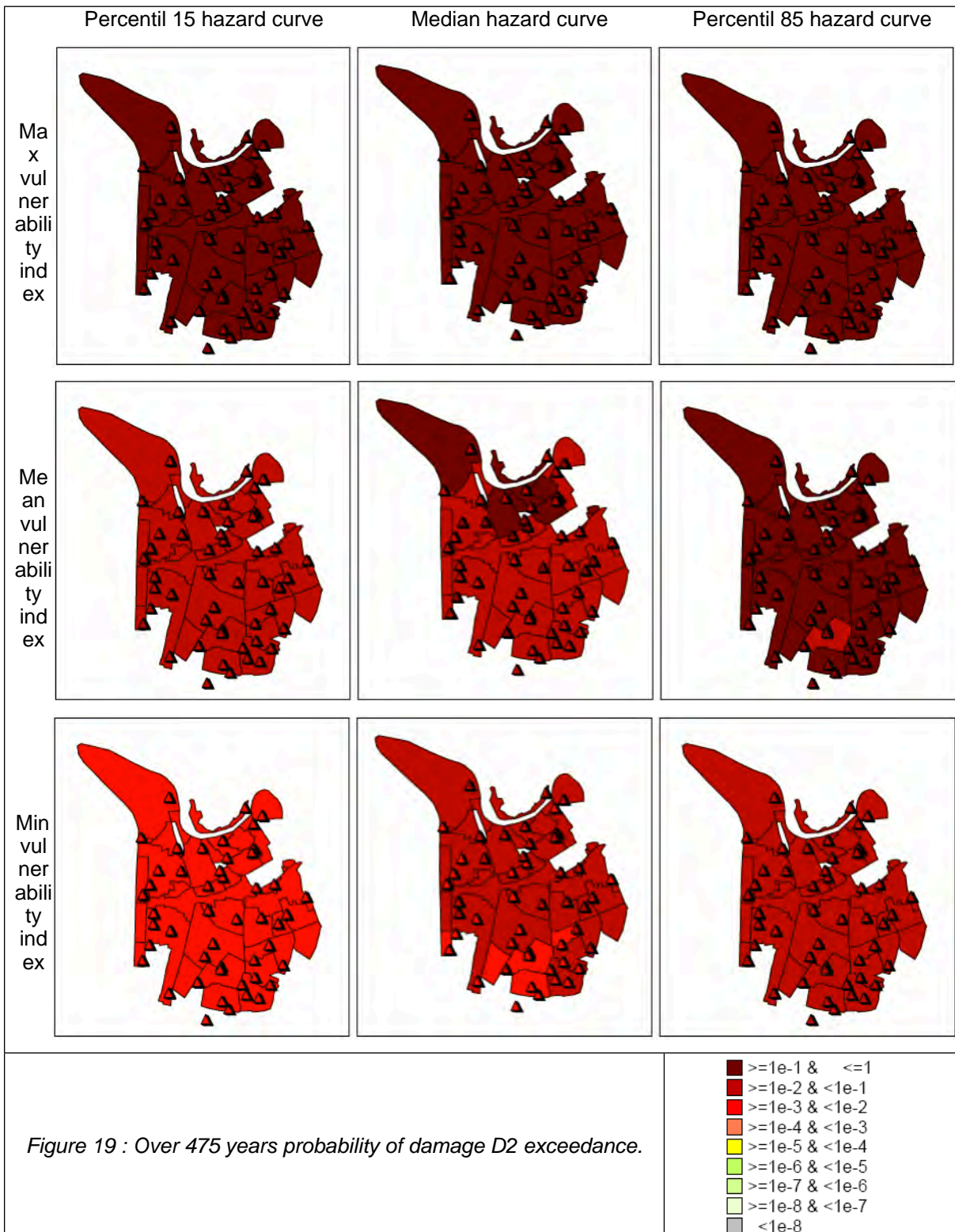


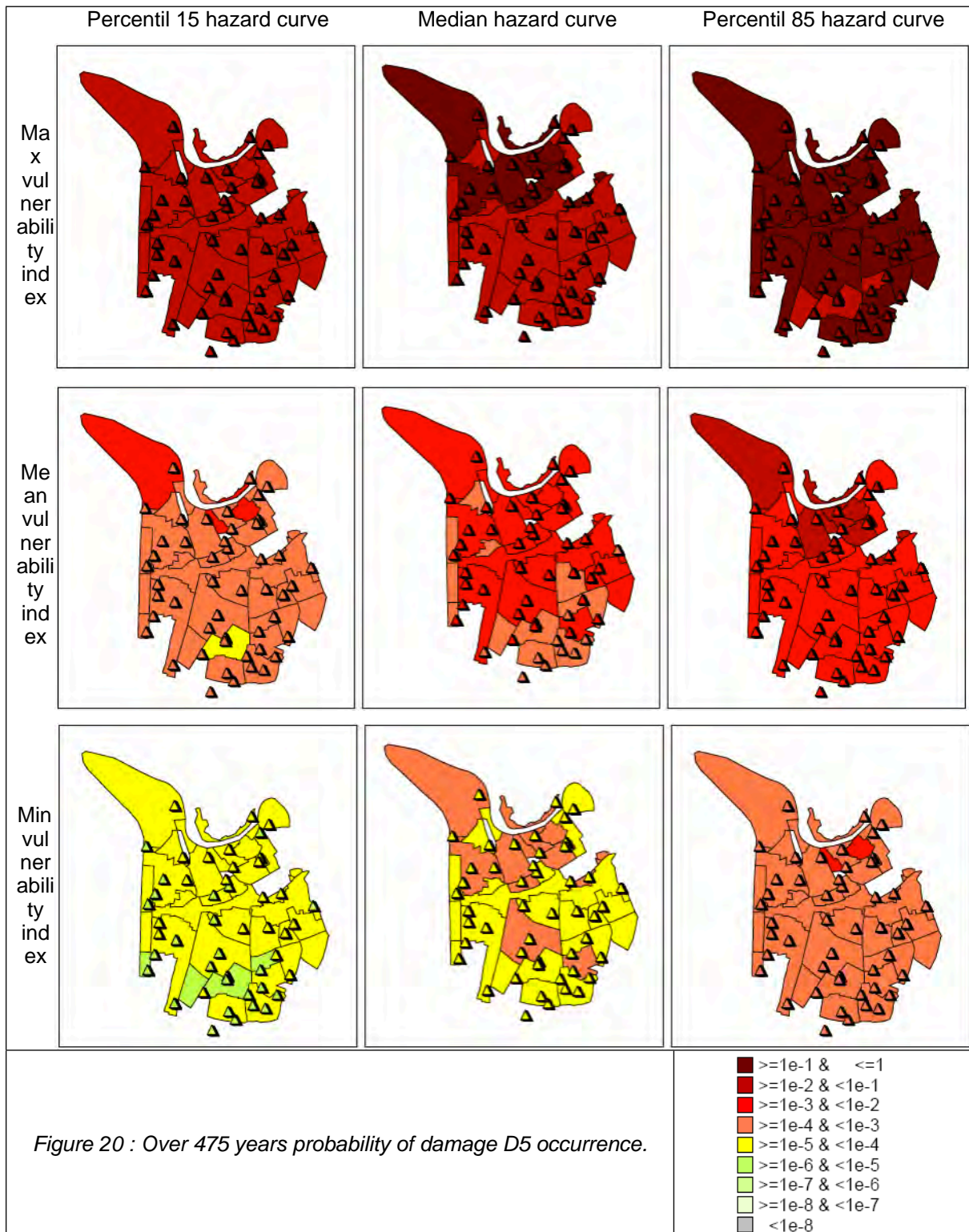


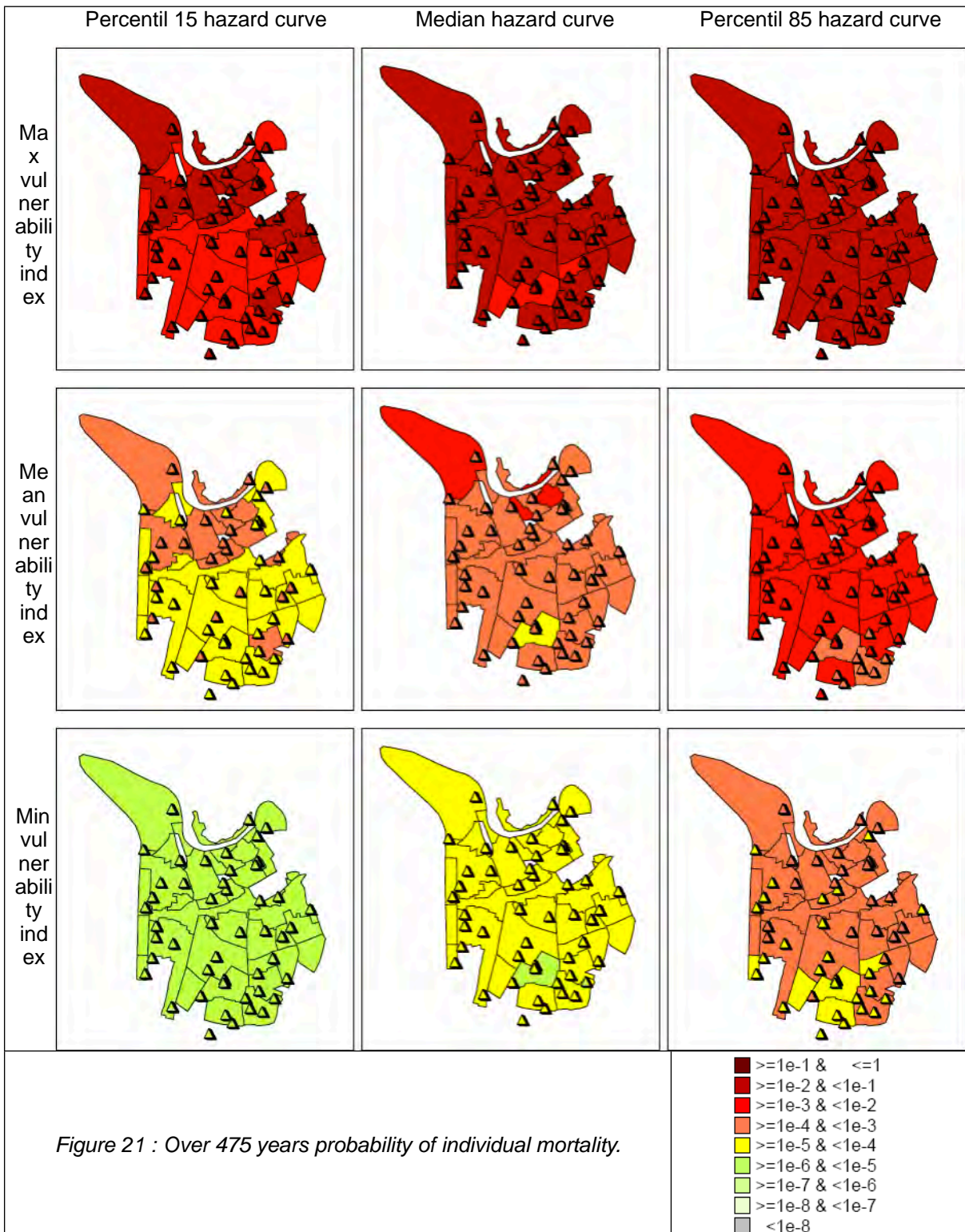














## 5.2 Niveaux de risque et acceptabilité

Afin de replacer le risque sismique évalué sur l'agglomération grenobloise dans un contexte local, les taux de mortalité produits par d'autres types de risques sont analysés et comparés à celui du risque sismique.

### 5.2.1. Mortalité toutes causes confondues

Le recensement par l'INSEE pour l'année 2008 en France permet d'évaluer le taux de mortalité par classes d'âge (Figure 22). Pour un taux annuel moyen de  $8 \times 10^{-3}$ , ce taux varie suivant l'âge de la personne (sic.) : de  $4 \times 10^{-4}$  pour les moins de 20 ans à  $4 \times 10^{-2}$  pour les plus de 65 ans. Ce risque peut être considéré comme « naturel » car il est incontournable.

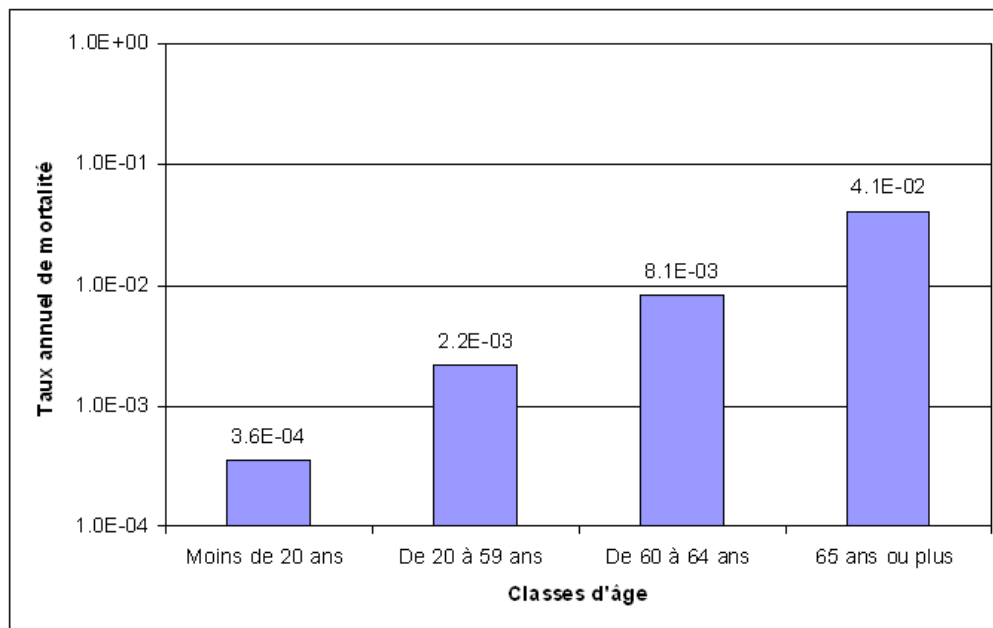


Figure 22 : Taux annuel de mortalité de l'année 2008 par classes d'âge en France (INSEE).

### 5.2.2. Mortalité induite par les catastrophes

La base de données « Emergency Events Database » (EM-DAT) maintenue par le « Collaborating Centre for Research on the Epidemiology of Disasters » (CRED) répertorie et renseigne les événements catastrophiques naturels et technologiques dans le monde. Une analyse à l'échelle de la France métropolitaine permet d'extraire les événements survenus lors de la période 1900-2010 (Tab. 6). A partir de l'hypothèse d'une population française moyenne de l'ordre de 50 millions durant le siècle dernier, les taux annuels moyens de mortalité déduits montrent des valeurs inférieures à  $4 \times 10^{-6}$ .

L'activité sismique en France métropolitaine au cours du siècle dernier montre un taux de mortalité de  $1 \times 10^{-8}$ . La valeur nationale est à considérer avec précaution car une période de retour de l'ordre du siècle n'est pas suffisante pour qualifier des phénomènes qui sont destructeurs à grande période de retour (475 ans de période de retour pour l'aspect réglementaire). De plus c'est une valeur moyenne sur l'ensemble du territoire qui présente un aléa sismique très variable. Dans Grenoble, on évalue ainsi un taux moyen de l'ordre de  $10^{-5}$ - $10^{-7}$  selon les quartiers, basé sur une observation plus grande et intégrant des spécificités d'aléa et de vulnérabilité locales.

Type d'événement	Nombre d'événements	Nombre de victimes	Taux de mortalité annuel moyen sur les 110 ans d'observation pour une population moyenne de 50 millions d'habitants
Température extrême	12	20941	3.8E-06
Accident de transport	49	3499	6.4E-07
Accidents divers	22	1502	2.7E-07
Accident industriel	14	1221	2.2E-07
Tempête	49	418	7.6E-08
Inondation	38	225	4.1E-08
Mouvement de terrain humide	6	114	2.1E-08
Incendie de forêt	12	112	2.0E-08
Mouvements de terrain sec	3	64	1.2E-08
Séisme + Tsunami	2	57	1.0E-08
Epidémie	2	21	3.8E-09

**Tableau 6** : dénombrement des catastrophes et des victimes par type d'événement durant la période 1900-2010 (mise à jour 22/06/2010) pour la France métropolitaine d'après la base de données EM-DAT : « Emergency Events Database » maintenue par le "Collaborating Centre for Research on the Epidemiology of Disasters" (CRED).

### 5.2.3. Mortalité induite par la route

Le nombre de tués sur la route en 2008 était de 4 443 d'après le Ministère de l'écologie, pour une population au 1<sup>er</sup> janvier 2009 de 64 321 374, selon l'INSEE. Différentes analyses peuvent être menées sur ce risque en fonction des classes d'âge, du temps passé sur la route, etc... Cependant, ces chiffres montrent une valeur moyenne du taux de mortalité annuel de l'ordre de  $7 \times 10^{-5}$ , proche des valeurs moyennes pour le séisme dans Grenoble.

Le risque routier est un exemple de risque individuel qui est « accepté » par l'ensemble de la population, dans le sens où sa connaissance n'empêche pas les individus de prendre ce risque. Cependant, la perception de ce risque est suffisamment élevée pour que les pouvoirs publics agissent pour sa réduction et engage un arsenal de décrets et de lois pour la prévention, le contrôle et la répression afin de réduire (ou contenir) ce risque de mortalité.

### 5.2.4. Niveaux d'acceptabilité du risque

#### 5.2.4.1. Caractère du risque

Une synthèse des niveaux de risques attachés à différentes sources de danger réalisée par Breysse (2009) permet de relativiser les différents taux de mortalité entre eux (Fig. 23). Cette comparaison met en évidence deux types de risques :

- Le risque volontaire : le risque que prend volontairement un individu dans l'objectif d'obtenir un certain bénéfice (pratique du parachute ou de l'hélicoptère). Pour ce type de risque, le niveau d'acceptabilité peut être élevé du fait de son caractère volontaire et peut même dépasser le risque toutes causes confondues.
- Le risque involontaire : le risque imposé à la population ou la société et qui n'est pas choisi librement par la population soumise au risque (exposition au séisme ou à l'incendie). Pour ce type de risque, le niveau d'acceptabilité est faible du fait de son caractère subit.

Ainsi, la comparaison des risques nécessite au préalable l'appréciation de leur caractère volontaire ou involontaire.

	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>
liés aux ouvrages	rupture 0.1	incendies 4				
catastrophes naturelles	tornado 0.4 foudre 0.5	séismes 2				
accidents divers			noyades 30 chutes 90	route 150 à 300	hélicoptère 5000	
accidents du travail			industries chimiques 85	industries de construction 1 30-150 mines 750	pétrole offshore 1650	
pratiques à risque					tabagisme 1000 à 3600	
sports			spéléologie 45 chasse 70	ski de randonnée 150 plongée 420	varappe en rocher 1500 à 2000 parachute 1900	
toutes causes confondues				à l'âge de 30 ans 600-1000		ensemble de la population 12000

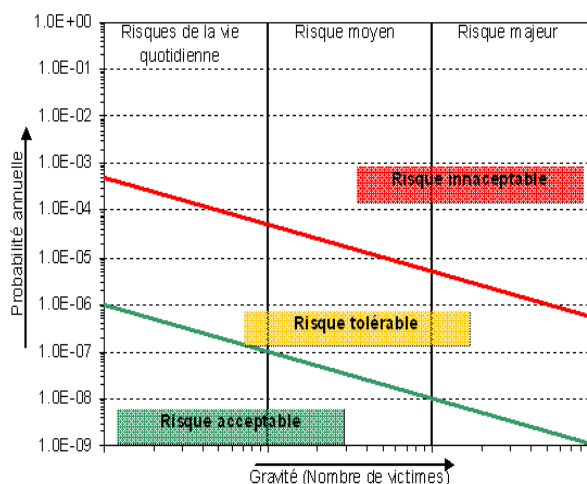
**Figure 23** : Taux de mortalité annuelle attachés à différentes sources de danger. Valeurs du tableau exprimées en 10<sup>-6</sup>/an. D'après Breysse 2009.

#### 5.2.4.2. L'approche ALARP pour quantifier l'acceptabilité

Certaines industries concernées par le risque (nucléaire, chimie) ont été amenées à définir des niveaux d'acceptabilité du risque suivant l'approche ALARP (As Low As Reasonably Practicable) qui se base sur la représentation de la gravité des conséquences suivant leur probabilité (courbes F-N ou de Farmer). Cette représentation permet de définir 3 domaines en fonction du niveau d'acceptabilité de risque (Fig. 24):

- Un domaine 1 où le risque est jugé inacceptable en raison d'une fréquence trop élevée ou de conséquences trop importantes. Dans ce domaine, des actions immédiates doivent être menées pour réduire le risque ;
- Un domaine 3 où le risque n'est plus perçu et est jugé acceptable ;
- Un domaine 2 intermédiaire dit ALARP dans lequel le risque est jugé tolérable. Dans ce domaine, des actions peuvent être entreprises en fonction des gains qu'elles procurent et de leurs coûts.

Cette approche permet de positionner les différents risques sur une même échelle et ainsi de les relativiser. Cependant, les limites d'acceptabilité du risque sont difficiles à fixer, puisqu'elles diffèrent suivant le caractère de risque (volontaire-involontaire).



**Figure 24:** Approche ALARP (As Low As Reasonably Practicable) qui se base sur la représentation de la gravité des conséquences suivant leur probabilité.

D'une manière générale, il n'existe pas de réglementation française spécifique pour traiter du niveau d'acceptabilité des risques. On note tout de même que dans le domaine de la construction, l'approche EUROCODES repose sur une notion de fiabilité en fixant des niveaux de dommages limites pour des sollicitations de probabilités données.

L'approche suisse de vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants (OFEG 2005) prend en compte la notion de risque suivant le principe ALARP pour apprécier la nécessité de renforcer les bâtiments vis-à-vis du séisme. Par une analyse à 3 niveaux de précision croissante, cette approche permet, d'une part d'identifier les bâtiments nécessitant des actions de diminution du risque et d'autre part de prioriser les actions à mener.

### 5.3 Comparaison du risque sismique aux autres risques sur Grenoble

Concernant le risque de mortalité individuelle dû au séisme sur Grenoble, l'exercice en soit ne se veut ni alarmiste, ni encourageant un catastrophisme inutile. Il a été mené afin de permettre une représentation du risque encouru par un individu grenoblois par rapport à des risques auxquels il est exposé quotidiennement ou occasionnellement. Par exemple, la probabilité individuelle annuelle de décéder du fait de l'effondrement total d'une structure lors d'un séisme est de l'ordre de  $10^{-7}$ - $10^{-6}$  (valeur médiane) dans les quartiers périphériques de Grenoble et de  $10^{-6}$ - $10^{-5}$  dans le centre historique de Grenoble. Ce taux est faible puisque la probabilité annuelle de dommage D5 est faible.

Ce taux annuel de mortalité est à comparer à la probabilité annuelle moyenne de décéder d'une personne âgée de 40 ans en France ( $10^{-3}$ ) toutes causes confondues. Ce taux ne tient pas compte de certaines situations, selon que la personne fume ou non, a des antécédents génétiques .... On note cependant une différence de 3 ordres de grandeur qui montre que le séisme n'est pas un risque qui conditionne la mortalité toutes causes confondues.

La mortalité annuelle par accident de la route montre un taux de  $7.10^{-5}$  qui est proche du taux de  $10^{-6}$ - $10^{-5}$  observé dans le centre ville de Grenoble pour le séisme. Ainsi, le risque sismique atteint le même niveau que le risque pris par les automobilistes mais qui n'est cependant pas suffisant pour empêcher ces derniers de continuer à circuler en voiture. Ce risque peut être considéré comme tolérable car il est accepté mais des actions politiques importantes visant à sa réduction sont engagées, ce qui n'est pas forcément le cas pour le risque sismique.

En comparant à d'autres phénomènes proches des risques naturels et industriels, il ressort que le taux de mortalité produit par le séisme est du même ordre de grandeur que celui provenant des températures extrêmes ( $10^{-6}$ ), des accidents de transport ou industriels  $10^{-7}$  (Tab. 6 et Fig. 26). Cependant il reste plus élevé que les différentes catastrophes naturelles ( $10^{-8}$ ) telles que les inondations, tempêtes ou

mouvements de terrains, ce qui replace le séisme parmi l'un des plus importants phénomènes naturels contre lesquels se protéger.

Sur une période de 50 ans, le taux de mortalité individuelle passe à  $10^{-4}$ - $10^{-5}$ . A 475 ans, soit la période de retour réglementaire dans les codes parasismiques qui ont comme objectif la sauvegarde des vies humaines, le taux de mortalité individuelle atteint  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  en centre ville, atteignant par endroits  $10^{-3}$ - $10^{-2}$ , soit un risque plus important. Ce taux traduit la mauvaise qualité du bâti existant.

Il est intéressant de constater que tandis que de nombreuses actions sont mises en places pour réduire les accidents de la route ou les décès lors de canicules, les taux de mortalité de ces risques sont équivalents à celui du séisme.

## 6 Conclusion

De plus en plus, les études d'aléa et de vulnérabilité sismiques ne suffisent plus aux collectivités locales et régionales: l'évaluation du risque sismique est de plus en plus demandée et il convient alors de trouver une démarche cohérente entre l'évaluation de l'aléa régional, la prise en compte des effets de site, la caractérisation des structures et enfin la représentation des effets du séisme sur les populations.

Cette étude, même incomplète, permet de pointer du doigt certaines imperfections et certaines étapes qu'il conviendrait d'améliorer. Dans un premier temps, l'étude de l'aléa régional, bénéficiant des avancées obtenues depuis le démarrage de la révision du zonage sismique de la France, est certainement celle qui est la plus aboutie. Cependant, la relation entre intensité et mouvement du sol n'est pas encore bien contrôlée et maîtrisée même si des initiatives ont été lancées à ce sujet. Cette relation doit être complétée par la prise en compte des effets de site qui pourrait largement être améliorée si l'aléa était défini en paramètres spectraux et pas en intensité. A ce moment là, la difficulté se reporte à l'étape mouvement du sol/prédiction des dommages puisque la majorité des méthodes adaptées à l'échelle d'une ville sont exprimées en probabilité de dommage pour une intensité macrosismique.

Nous sommes ainsi confrontés à deux choix possibles: améliorer les méthodes en intensité ou proposer des études en paramètres spectraux. Cette deuxième solution a été envisagée en intégrant des paramètres physiques dans l'estimation de la vulnérabilité des structures (Michel, 2007) mais la route est longue avant d'avoir une méthode standard reproductible. Cependant, en passant par une évaluation physique et non empirique, on réduira les incertitudes liées à la définition du modèle de comportement de chaque classe de construction (Spence et al., 2003), on assurera le lien entre aléa régional et effets de site et on bénéficiera des zonages réglementaires nationaux, ce qui nous conduira à proposer une démarche homogène du début à la fin du processus.

Dans le cas de Grenoble, on constate que le risque sismique est modéré en terme de probabilité annuelle d'apparition de dommages, d'effondrement et de perte. Ces résultats sont certes incomplets: il faudrait introduire la notion de risque collectif de décès, représentant ainsi l'aspect collectif des pertes lors d'un tremblement de terre (un bâtiment peut s'écrouler sur plusieurs habitants) le risque liée à la route n'étant qu'un risque individuel. Il conviendrait aussi de regarder la mobilité des personnes au cours de la journée, en particulier pour les établissements scolaires concernés par cette étude puisque l'occupation des locaux varie dans la semaine: le risque n'est donc plus le même dans la journée, la semaine ou le week-end.

Grâce à cette représentation, aux autorités de prendre les mesures qui s'imposent afin de traiter le bâti existant, en fonction de choix stratégiques et économiquement viables. La notion de risque acceptable apparaît et la notion économique doit venir compléter cette étude. En effet, selon que la bâtiment a une valeur économique importante ou pas, selon la politique d'entretien et d'investissement de la ville pour les bâtiments (Boudis et al., 2010), le risque sera plus ou moins réduit et donc plus ou moins acceptable. On pourrait alors imaginer que cette démarche permette de proposer aux collectivités locales ou aux propriétaires de bâtiments des simulations sur l'évolution du risque sismique en fonction des actions qu'ils mènent.

## 7 Références

Anderson J. G. , Bodin P., Brune J. N., Prince J., Singh S. K., Quaas R., Onate M. (1986) Strong ground motion from the Michoacan, Mexico, earthquake, *Science*, 233(4768):1043-1049

- Arracoucau P., Mocquet A., Vacher P. (2006). Atténuation de l'intensité macrosismique pour la France métropolitaine : importance de l'intensité épiscopale C.R. Geoscience, 338: 596-605.
- Astorza M. and Monje J. 1991. Regional seismic zonation in Central Chile, Proc. 4th Int. Conf. Seismic Zonation, EERI editor, 25-29 August, Stanford, California, 487-494.
- ATC 21 (1988) Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: a handbook. Applied Technology Council, Redwood City, California
- Augenti, N. and Cosenza, E. and Dolce, M. and Manfredi, G. and Masi, A. and Samela, L. Performance of school buildings during the 2002 Molise, Italy, earthquake Earthquake Spectra20, 257-270 2004
- Baize S., Cushing M., Lemeille F., Granier T., Grellet B., Carbon D., Combes Ph., Hibsich C. (2002). Inventaire des indices de rupture affectant le quaternaire - En relation avec les grandes structures connues en France métropolitaine et dans les régions limitrophes. IRSN, Mémoires de la société géologique de France, n°175, p.142.
- Benedetti D, Petrini V (1984) On seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure. L'Industria delle Costruzioni 18:66-78
- Bommer J. J. Scherbaum F., Bungum H., Cotton F., Sabetta F., Abrahamson N. A. (2005) On the use of logic trees for ground-motion prediction equations in seismic-hazard analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, 95(2):377-389. DOI: 10.1785/0120040073
- Borcherdt R.D. and Gibbs J.F. 1976. Effects of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake. Bull. Seic. Soc. Am. 66, 467-500.
- Boudis M., Saillard Y., Guéguen P., Davoine P.-A. 2010. Modèle d'aide à la décision pour la prévention parasismique urbaine: une approche multi-agents de la vulnérabilité du bâti, Revue Internationale de Géomatique, sous presse.
- Breyse D. (2009) Maîtrise des risques en Génie Civil: Volume III, Sécurité des constructions et réglementation. Eds. Hermès-Lavoisier, Paris, 270 pages, ISBN2-7462-2443-7
- Coburn A., Spence R. (2002) Earthquake Protection. Edition John Wiley & Sons, 420 pages.
- Combes D, Guéguen P, Lebrun B (2005) Vulnérabilité sismique du bâti existant: approche d'ensemble. Cahier technique, AFPS (Ed) 25:121
- CRED, WHO Collaborating Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (2003), Emergency Events Database - EM-DAT, <http://www.em-dat.net>
- Dolce M, Masi A, Marino M, Vona M. (2003) Earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) including site effects. Bull Earthquake Eng 1:115-140
- Ergunay O, Gulkan P (1991) Seismic risk reduction and disaster management: national report of Turkey. In: Proceedings of workshop on seismic risk reduction and disaster management, Roma, Italy, November.
- Faccioli E, Pessina V, Calvi GM, Borzi B (1999) A study on damage scenarios for residential buildings in Catania City. J Seismol 3(3):327-343
- Farsi M., Bard P.-Y. (2004) Estimation des périodes propres de bâtiments et vulnérabilité du bâti existant dans l'agglomération de Grenoble, Revue française de génie civil, 8(2-3):149-179
- FEMA 178 (1997) NEHRP handbook for the seismic evaluation of existing buildings. Federal Emergency Management Agency
- GNDT (1993) Rischio sismico di edifici pubblici — Parte I: aspetti metodologici. Centro Servizi Quasco, Bologna.
- Grellet B., Combes P., Granier T., Philip H. (1993). Sismotectonique de la France métropolitaine dans son cadre géologique et géophysique avec atlas de 23 cartes au 1/4 000 000<sup>ème</sup> et 1 carte au 1/1 000 000<sup>ème</sup>. Mémoire Société Géologique de France, n° 164, Vol. 1, 76 p.

- Grunthal G., Levret A. (2001). L'échelle macrosismique européenne. Conseil de l'Europe - Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 19.
- Guéguen, P., J.-L. Chatelain, B. Guillier, H. Yepes and J. Egred. 1998. Site effect and damage distribution in Pujili (Ecuador) after the 28 March 1996 earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17, 329-334.
- Guéguen, P., J.-L. Chatelain, B. Guillier and H. Yepes. 2000. An indication of the soil topmost layer response in Quito(Ecuador) using H/V spectral ratio, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, 127-133.
- Guéguen P., Michel C., Lecorre L. (2007) A simplified approach for vulnerability assessment in moderate-to-low seismic hazard regions: application to Grenoble (France), *Bull Earthq. Engng.*, 4(3):467-490.
- Guéguen P., Cornou C., Garambois S. and Banton J. 2007. On the limitation of the H/V spectral ratio using seismic noise as an exploration tool: application to the grenoble valley, a small apex ratio basin. *Pure and Applied Geophysics*, 164(1):1-20, doi:10.1007/s00024-006-0151-x.
- Guéguen, P. Lutoff C., Davoine, P. A., Taliercio G., Cotton F. et Cartier S. (2009) Analyse de la vulnérabilité sismique dans un pays à sismicité modérée : le cas de Grenoble. Risques naturels et environnement. Becerra S., Peltier A. Editeur, Risques et environnement: recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés, Paris: L'Harmattan, 575 pages, 285-301.
- Guyoton F., Fréchet J., Thouvenot F. (1990) La crise sismique de janvier 1989 en haute-Ubaye (Alpes-de-haute-Provence, France): étude fine de la sismicité par le nouveau réseau SISMALP, *Comptes rendus de l'Académie des sciences, Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre*, 311(8): 985-991.
- HAZUS (1997) Earthquake loss estimation methodology. Hazus technical manuals. National Institute of Building Science, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington
- Jongmans D, Plumier A (2000) Etude Pilote du risque sismique sur une partie de la ville de Liège, rapport interne, Université de Liège, Faculté des sciences appliquées (in French).
- Lagomarsino S., Giovinazzi S. (2006) Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4: 415-443.
- Lebrun, B., D. Hatzfeld, and P.-Y. Bard (2001). A site effect study in urban area: experimental results in Grenoble (France), *Pure and Applied Geophysics* 158, 2543-2557.
- Levret A., Backe J.C., Cushing M. (1994) Atlas of macroseismic maps for French earthquakes with their principal characteristics. *Natural Hazards*, 10:19-46.
- Levret A.M., Cushing M., Peyridieu G. (1996). Recherche des caractéristiques des séismes en France. Atlas de 140 cartes macro-séismiques, edited by IPSN, Fontenay-aux-Roses, France, 2 vols.
- Martin C., Combes C., Secanell R., Lignon G., Carbon D., Fioravanti A., Grellet B. (2002) Révision du zonage sismique de la France. Etude probabiliste, Rapport GEOTER GTR/MATE/0701-150, 417 pages.
- Martin C., Secanell R., Viallet E., Humbert N. (2008). Consistency of PSHA Models in Acceleration and Intensity by Confrontation of Predictive Models to Available Observations in France. CSNI Workshop on "Recent Findings and Developments in PSHA Methodologies and Applications". Lyon Congress Centre. Lyon - France, 7-9 April 2008.
- Medvedev J. 1962. Engineering Seismology. Academia Nauk Press, Moscow, 260 pages.
- Michel C., Guéguen P., Lestuzzi P., Bard P.-Y. (2010) Comparison between seismic vulnerability models and experimental dynamic properties of French buildings, *Bull. Earthq. Engng*, in press
- Milutinovic Z., Trendafiloski R. (2003) An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns, *Projet européen Risk-UE*.
- Nicoud, G., G. Royer, J.-C. Corbin, F. Lemeille, and A. Paillet (2002), Glacial erosion and infilling of the Isère Valley during the recent Quaternary, *Géologie de la France* 4, 39-49.

- OFEG (2005). Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants : Concept et directive pour l'étape 1 (2ème édition), Directives de l'OFEG (Office Fédéral des Eaux et de la Géologie).
- Oliveira CS (2003) Seismic vulnerability of historical constructions: a contribution. Bull Earthq. Eng 1(1): 37–82.
- Onur T, Ventura CE, Liam Finn WD (2005) Regional seismic risk in British Columbia – damage and loss distribution in Victoria and Vancouver. Can J Civ Eng 32:361–371
- Otani S (2000) Seismic vulnerability assessment methods for buildings in Japan. Earthquake Eng Eng Seismol 2(2):47–56
- Parent J-F (1982) Grenoble, deux siècles d'urbanisme. Presse Universitaire de Grenoble, 187 pp
- Péquegnat C., Guéguen P., Hatzfeld D. and Langlais M. 2008. The French Accelerometric Network (RAP) and National Data Centre (RAP-NDC). SRL, 79(1): 79-89.
- RiskUE (2003) An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns, Projet Européen, EVK4-CT-2000–00014
- Roca A, Goula X, Susagna T, Chávez J, González M, Reinoso E (2006) A simplified method for vulnerability assessment of dwelling buildings and estimation of the damage scenarios in Catalonia (Spain). Bull Earthquake Eng 4(2):141–158.
- Martin C., Secanell R., Viallet E., Humbert N. (2008). Consistency of PSHA Models in Acceleration and Intensity by Confrontation of Predictive Models to Available Observations in France. CSNI Workshop on "Recent Findings and Developments in PSHA Methodologies and Applications". Lyon Congress Centre. Lyon - France, 7-9 April 2008.
- Seismocare (1998) Seismocare Computed Aided Reduction of Seismic Risk with application to existing cities, town planning and construction - Directions to fill in the vulnerability form GNDT levels 1 and 2. European project Environment and Climate, 1994–1998, ENV4-CT97–0588
- Shima E. 1978. Seismic microzoning map of Tokyo, in Proc. 2nd Int. Conf. on Seismic Zonation, I, 519-530.
- Spence R, Lebrun B (ed) (2006) Earthquake scenarios for European cities – the risk-UE project. Bull Earthquake Eng 4(4): special issue.
- Spence R., Bommer J., Del Re D., Bird J., Aydinoglu N., Tabuchi S. (2003) Comparing loss estimation with observed damage: a study of the 1999 Kocaeli earthquake in Turkey, Bulletin of Earthquake Engineering, 1:83-113
- Steimen S, Faeh D, Giardini D, Bertogg M, Tschudi S (2004) Reliability of building inventories in seismic prone regions. Bull. of Earthquake Engi. 2(3):361–388
- Stepp J.C. 1972. Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard, Proc. Microzonation Conf., Seattle, WA, p. 897–909.
- Thouvenot F., Fréchet J., Jenatton L., Gamond J.-F. (2003) The Belledonne Border Fault: identification of an active seismic strike-slip fault in the Western Alps. Geophysical Journal International 2003, 155:174–192.
- Ventura CE, Liam Finn WD, Onur T, Blanquera A, Rezai M (2005) Regional seismic risk in British Columbia – classification of buildings and development of damage probability functions. Can J. Civ Eng 32:372–387.
- Weichert D.H. (1980). Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observational periods for different magnitudes. Bulletin of the Seismological Society of America, 70: 1337-1346.



