

Pré-diagnostic de microzonage sismique et scénario de dommages de niveau 0 pour la commune du Puy-en-Velay (Haute-Loire)

Rapport final

BRGM/RP-60516-FR

Décembre 2011

Etude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 10RISG54

J. Rey, C. Poncelet, S. Auclair, D. Monfort, E. Vanoudheusden

Vérificateur :

Nom : M. BELVAUX

Date : 13/12/2011

Signature :



Approbateur :

Nom : P. ROCHER

Date : 23/12/2011

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008



Mots clés : Aléa sismique, microzonage, effets de site, vulnérabilité, scénario de dommages de niveau 0, Le Puy-en-Velay, Haute-Loire, Auvergne

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Rey J., Poncelet C., Auclair S., Monfort D., Vanoudheusden E. (2011) - Pré-diagnostic de microzonage sismique et scénario de dommages de niveau 0 pour la commune du Puy-en-Velay (Haute-Loire). Rapport final BRGM/RP-60516-FR. 91 p., 40 fig., 4 tab., 9 ann.

Synthèse

Un séisme d'intensité notable (VI) a été recensé dans le secteur de la ville du Puy-en-Velay au XVIII^{ème} siècle et une sismicité instrumentale diffuse, composée d'événements de magnitudes assez faibles (inférieures à 3), est recensée dans le voisinage immédiat de la ville. De plus, la commune du Puy-en-Velay est classée en zone de sismicité faible (zone 2) dans la nouvelle réglementation parasismique applicable depuis le 1^{er} mai 2011.

De ce fait, la Direction Régionale de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Auvergne a demandé au BRGM une étude de pré-diagnostic de microzonage sismique, suivi d'un scénario de dommages de niveau 0, pour la commune du Puy-en-Velay.

Un pré-diagnostic de microzonage sismique consiste à définir la pertinence d'un microzonage sismique de niveau A, B ou C sur une zone et de définir les items nécessitant une analyse approfondie. Dans un premier temps, dans le cadre de ce prédiagnostic, les différents aléas étudiés sont le niveau d'aléa sismique défini régionalement mais aussi l'aléa sismique local : les effets de site lithologiques et topographiques, les mouvements de terrain et enfin les potentialités de liquéfaction.

Ensuite, des études de vulnérabilité des bâtiments de catégorie d'importance II, III et IV, selon l'EN1998-1 (Eurocode 8) ont été menées. Pour ce qui concerne les bâtiments de catégorie d'importance II (bâti courant), des données informatives sur ces types d'ouvrage sont compilées à l'échelle des îlots IRIS de l'INSEE. Un zonage qualitatif de la présomption de vulnérabilité du bâti au risque sismique, élaboré en utilisant les classes de vulnérabilité définies dans l'échelle macrosismique EMS98, est proposé pour le Puy-en-Velay grâce aux données récoltées ainsi qu'à une rapide visite de terrain. Concernant les bâtiments de catégories d'importance III et IV, à l'issue d'une étude préliminaire à partir de la liste des Etablissements Recevant du Public (ERP) de la commune, les bâtiments susceptibles d'appartenir à ces catégories sont identifiés et dans la mesure du possible cartographiés.

Une approche plus quantitative permet enfin de mieux calibrer l'étude potentielle de microzonage sismique en combinant les informations existantes sur la répartition géographique des zones supposées à fort aléa et sur la distribution géographique de la zone urbanisée actuelle.

Un bilan de la pertinence d'un microzonage sismique pour la commune du Puy-en-Velay est synthétisé dans un tableau pour les différents aléas évoqués ci-dessus (voir Annexe 9).

Il ressort de ce pré-diagnostic que l'aléa régional et l'aléa local semblent globalement bien caractérisés. Un éventuel microzonage sismique concernerait uniquement quelques items liés à des phénomènes directs (effets de site lithologiques et topographiques) et induits (mouvements de terrain). D'autre part, une première analyse indique que la vulnérabilité du bâti est plus élevée au niveau du centre-ville historique du Puy-en-Velay, mais les moyens mis en œuvre ne permettent pas de se prononcer sur la nécessité de prendre en compte la vulnérabilité des bâtiments de catégorie d'importance II.

Au final, un microzonage sismique n'est ainsi préconisé pour aucun des items traités à l'échelle de la commune.

La réalisation d'un scénario de dommages de niveau 0 consiste à valoriser les résultats issus de ce pré-diagnostic de microzonage. Il permet d'évaluer de manière très globale le comportement des bâtiments lors d'une sollicitation sismique.

Il ressort de ce scénario que peu de dégâts seraient observables sur la commune du Puy-en-Velay. Par ailleurs, ils se localiseraient principalement au niveau du centre-ville, zone où coïncident géographiquement une zone à effet de site lithologique et une forte concentration de bâtiments anciens plus vulnérables.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Pré-diagnostic de microzonage sismique pour la commune du Puy-en-Velay	13
2.1. GEOGRAPHIE ET DEMOGRAPHIE DE LA COMMUNE DU PUY-EN-VELAY	13
2.2. ALEA SISMIQUE REGIONAL.....	15
2.2.1. Mouvements sismiques réglementaires pour la commune du Puy-en-Velay.....	15
2.2.2. Etude de la sismicité instrumentale et historique dans la région du Puy-en-Velay	15
2.2.3. Eléments permettant de préciser le niveau d'aléa sismique régional.....	19
2.2.4. Etude préliminaire des failles actives dans la région du Puy-en-Velay	19
2.3. ALEA SISMIQUE LOCAL	21
2.3.1. Effets de site lithologiques.....	21
2.3.2. Effets de site topographiques	25
2.3.3. Mouvements de terrain.....	27
2.3.4. Potentialité de liquéfaction.....	32
2.4. VULNERABILITE DU BATI.....	33
2.4.1. Bâti courant (catégorie d'importance II).....	33
2.4.2. Vulnérabilité des habitats collectifs et individuels.....	35
2.4.3. Répartition des classes de vulnérabilité sur la commune du Puy-en-Velay	40
2.4.4. Bâti de catégorie d'importance III et IV.....	42
3. Pertinence d'un microzonage sismique dans l'optique de l'élaboration d'un PPR pour la commune du Puy-en-Velay	45
3.1. ALEA SISMIQUE REGIONAL.....	45
3.2. ALEA SISMIQUE LOCAL	45
3.3. VULNERABILITE DU BATI.....	46
3.4. CONCLUSION	47
4. Scénario de dommages de niveau 0 pour la commune du Puy-en-Velay	49
4.1. METHODOLOGIE.....	49
4.2. PARAMETRES UTILISES POUR LE SCENARIO.....	50

4.3. VULNERABILITE PHYSIQUE DES OUVRAGES	51
4.3.1. Classes de vulnérabilité EMS98	51
4.3.2. Echelle de dommages.....	53
4.4. NIVEAU DE PRECISION DES SIMULATIONS REALISEES DANS LE CADRE DE CETTE ETUDE	54
4.5. RESULTATS	54
4.6. DOMMAGES REELS GENERES PAR UN SEISME MODERE.....	59
5. Conclusions.....	61
6. Bibliographie	63

Liste des Figures

Figure 1 - Localisation de la commune du Puy-en-Velay	13
Figure 2 - Carte géologique simplifiée du département de la Haute-Loire (source : BRGM)	14
Figure 3 - Sismicité historique de la Haute-Loire (source : SisFrance - BRGM/EDF/IRSN)	17
Figure 4 - Sismicité instrumentale de la Haute-Loire pour la période 1962 - avril 2011 (source : catalogue BCSF).....	18
Figure 5 - Failles principales dans le voisinage de la commune du Puy-en-Velay.....	20
Figure 6 - Représentation de quelques mécanismes au foyer de la région Auvergne (source : OPGC)	21
Figure 7 - Carte géologique harmonisée de la commune du Puy-en-Velay (source : BRGM ; fond topographique au 1/25 000 ©IGN).....	23
Figure 8 - Localisation des sondages BSS sur la carte géologique dans la commune du Puy-en-Velay.....	24
Figure 9 - Carte de susceptibilité aux effets de site lithologiques sur la commune du Puy-en-Velay.....	25
Figure 10 - Zones d'amplification topographique pour la commune du Puy-en-Velay (fond scan25 et MNT au pas de 50 m - IGN).....	26
Figure 11 - Dykes surplombant la commune du Puy-en-Velay (photo BRGM).....	27
Figure 12 - Extrait de la BDCAVITE pour la commune du Puy-en-Velay	28
Figure 13 - Extrait de la BDMVT pour la commune du Puy-en-Velay	29
Figure 14 - Carte de susceptibilité aux mouvements de terrain sur la commune du Puy-en-Velay	31
Figure 15 - Carte de susceptibilité à la liquéfaction sur la commune du Puy-en-Velay	33
Figure 16 - Découpage de la commune du Puy-en-Velay par IRIS (source : © INSEE 1999).....	34
Figure 17 - Points d'observation (ronds verts) durant la visite de terrain et limites des différents IRIS (en rouge ; fond : orthophotographie ©IGN).....	35
Figure 18 - Maisons en maçonnerie ancienne dans le centre-ville du Puy-en-Velay (photos BRGM) :	36
Figure 19 - Bâtiments d'habitat collectif avec des murs porteurs en pierres (photos BRGM) :	37
Figure 20 - Bâtiments d'habitat collectif dans le centre-ville du Puy-en-Velay (photos BRGM) :	37
Figure 21 - Bâtiments de type HLM : le bâtiment à droite présente une transparence du RDC (photos BRGM)	38
Figure 22 - Bâtiments d'habitat collectif dans le centre-ville du Puy-en-Velay (photos BRGM) :	38
Figure 23 - Exemples de maisons individuelles construites en maçonnerie porteuse datant de la période 1950-1980 (photos BRGM).....	39

Figure 24 - Lotissements de construction récente (photos BRGM)	39
Figure 25 - Répartition des bâtiments en classe de vulnérabilité B sur la commune du Puy-en-Velay	41
Figure 26 - Répartition des bâtiments en classe de vulnérabilité C sur la commune du Puy-en-Velay	42
Figure 27 - Localisation des principaux bâtiments de catégorie d'importance III et IV recensés sur la commune du Puy-en-Velay (fond de carte : ortophotographie).....	43
Figure 28 - Mouvements sismiques retenus dans le cadre du scénario établi dans la présente étude (intensités EMS98)	50
Figure 29 - Typologie des bâtiments et classes de vulnérabilité de l'échelle EMS98.....	52
Figure 30 - Classification des dégâts selon l'Echelle Macrosismique Européenne	53
Figure 31 - Pourcentage de bâtiments fortement endommagés	55
Figure 32 - Pourcentage de bâtiments en endommagement modéré.....	56
Figure 33 - Pourcentage de bâtiments en endommagement modéré par grille de 250 m.....	57
Figure 34 - Nombre de bâtiments en endommagement modéré par grille de 250 m	58
Figure 35 - Dégâts modérés occasionnés par le séisme de Lorca (Espagne, 11 mai 2011 ; photos BRGM).....	59
Figure 36 - Dégâts majeurs occasionnés par le séisme de Lorca (Espagne, 11 mai 2011 ; photos BRGM).....	59
Figure 37 - Fonctions d'appartenance des différents indices de vulnérabilité	65
Figure 38 - Classification des dégâts selon l'Echelle Macrosismique Européenne pour les structures en maçonnerie et en béton armé	67
Figure 39 - Zonage sismique réglementaire en vigueur depuis le 1 ^{er} mai 2011 en région Auvergne	69
Figure 40 - Carte des intensités pour des périodes de retour de 100 et 475 ans (© BRGM).....	83

Liste des Tableaux

Tableau 1 - Liste des séismes ressentis sur la commune du Puy-en-Velay avec une intensité observée associée supérieure ou égale à II-III MSK et dont l'épicentre est localisé à moins de 150 km de la commune (source : SisFrance 2008 - BRGM/EDF/IRSN).....	16
Tableau 2 - Matrice et définition des classes de susceptibilité aux mouvements de terrain.....	30
Tableau 3 - Liste des IRIS de la commune du Puy-en-Velay (source : © INSEE 1999).....	34
Tableau 4 - Répartition des différentes classes de vulnérabilité pour chaque IRIS de la commune du Puy-en-Velay	41

Liste des Annexes

Annexe 1 - Méthodes utilisées pour l'estimation de la vulnérabilité physique des ouvrages.....	65
Annexe 2 - Zonage sismique réglementaire	69
Annexe 3 - Cartes des isoséistes de séismes ressentis dans la région du Puy-en-Velay	71
Annexe 4 - Articles relatant des événements sismiques dans la région du Puy-en-Velay.....	75
Annexe 5 - Stations sismologiques à proximité du Puy-en-Velay	79
Annexe 6 - Résultats de l'analyse statistico-historique.....	81
Annexe 7 - Données INSEE pour commune du Puy-en-Velay.....	85
Annexe 8 - Etablissements Recevant du Public (ERP) dans commune du Puy-en-Velay.....	87
Annexe 9 - Tableau de conclusion sur le pré-diagnostic de microzonage sismique pour la commune du Puy-en-Velay	89

1. Introduction

Cette étude, effectuée pour la commune du Puy-en-Velay, a été réalisée par le BRGM à la demande de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Auvergne.

Le pré-diagnostic de microzonage sismique consiste, à partir d'une approche qualitative, à définir la pertinence d'un microzonage sismique de niveau A, B ou C sur la commune et de définir les aléas nécessitant une analyse approfondie. Les différents aléas étudiés sont les effets de site lithologiques, les effets de site topographiques, les mouvements de terrain et les potentialités de liquéfaction.

Une approche plus quantitative permet ensuite de mieux calibrer l'étude potentielle de microzonage sismique en combinant les informations existantes sur la répartition géographique des zones supposées à fort aléa avec la distribution géographique de la zone urbanisée actuelle. Enfin, afin d'appréhender sommairement la vulnérabilité des bâtiments de catégorie d'importance II, III et IV, selon l'EN1998-1 (Eurocode 8), quelques données informatives sur ces types d'ouvrage sont également rassemblées.

Ce rapport s'attache principalement à présenter les résultats obtenus pour la zone de la commune du Puy-en-Velay. Ainsi, la méthodologie suivie n'est pas développée dans le présent rapport. On trouvera dans le rapport BRGM référencé RP-57129-FR (Rey *et al.*, 2009) les généralités concernant les prédiagnostics de microzonages sismiques ainsi que la méthodologie qui a été suivie lors de ce travail.

Le scénario de dommages de niveau 0 permet de valoriser les résultats issus du pré-diagnostic et d'évaluer de manière très globale le comportement des bâtiments existants lors d'un séisme.

De même, la méthodologie suivie pour établir le scénario de dommages n'est pas développée complètement dans le présent rapport. On se reportera ainsi au rapport BRGM référencé RP-59153-FR (Rey *et al.*, 2010) concernant un scénario de dommages de niveau 0 pour la commune de Clermont-Ferrand (63) pour une explication détaillée de la méthodologie suivie.

2. Pré-diagnostic de microzonage sismique pour la commune du Puy-en-Velay

2.1. GEOGRAPHIE ET DEMOGRAPHIE DE LA COMMUNE DU PUY-EN-VELAY

Le Puy-en-Velay (code INSEE 43 157, Figure 1), préfecture du département de la Haute-Loire (43) située dans la région Auvergne, est également connue pour être classée ville d'art et d'histoire. Elle s'étend sur une superficie de 16,79 km² et se découpe en 5 cantons (Puy-en-Velay-Est, Ouest, Nord, Sud-Est, et Sud-Ouest). Cette commune se trouve à environ 59 km au Sud-Ouest de Saint-Etienne (42), la plus grande ville à proximité, et à 65 km à l'Est de Saint-Flour (15).

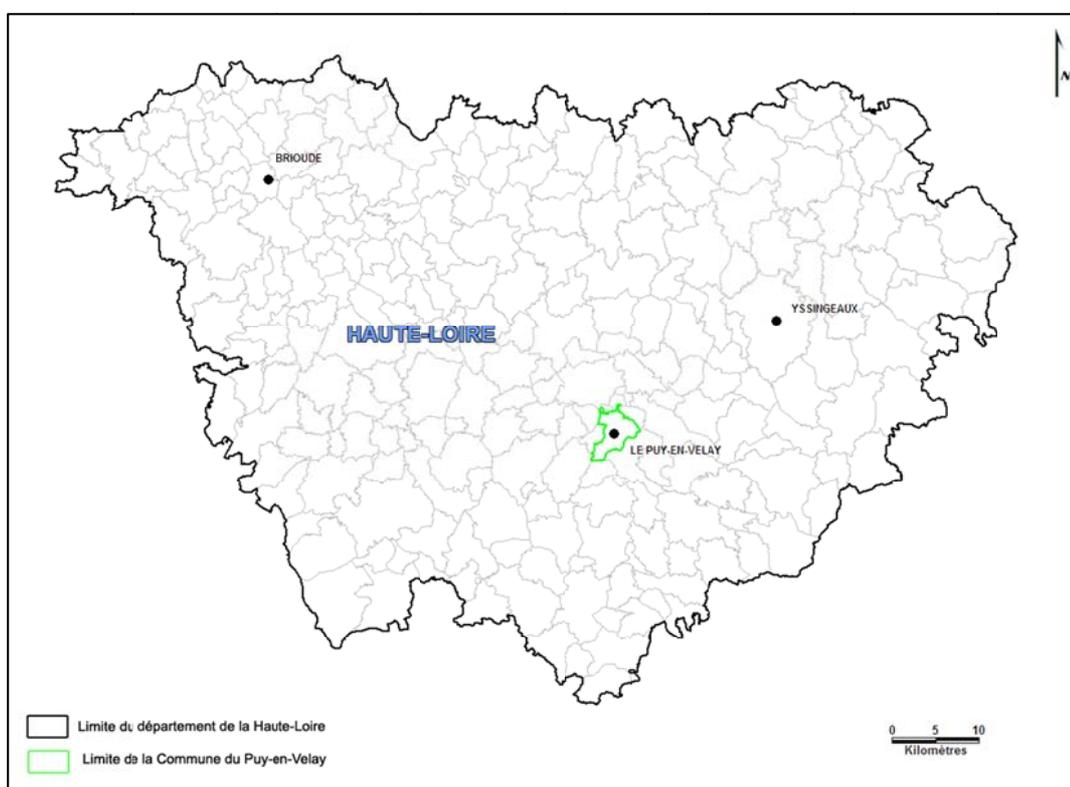
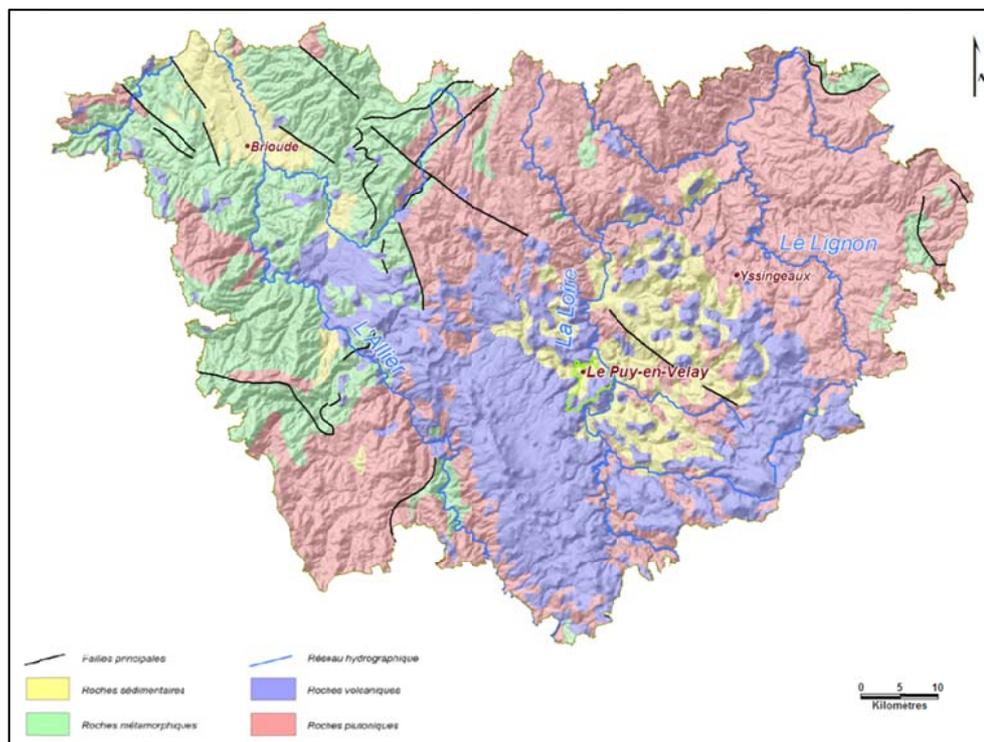


Figure 1 - Localisation de la commune du Puy-en-Velay

Le Puy-en-Velay se situe au Sud-Est du Massif-Central, à des altitudes qui sont comprises entre 600 et 880 m. Au niveau géologique (Figure 2), cette région repose indirectement sur du socle ancien (500 Ma) composé de roches métamorphiques et plutoniques (principalement du granite du Velay, de gneiss et de micaschistes), affectées par des failles d'orientation Nord-Ouest - Sud-Est. Ces unités constituent les vestiges de l'ancienne chaîne hercynienne. Certaines de ces failles, ainsi que d'autres plus récentes (dues à l'orogénèse alpine pendant l'ère tertiaire), délimitent des bassins où de vastes lacs ont pu

s'installer, et permettre un remplissage sédimentaire (surtout par des sables argileux). Ces sédiments proviennent essentiellement de l'érosion du vieux socle. Cette lithologie est visible dans toute la partie nord-ouest de la commune du Puy-en-Velay. Par ailleurs, des formations volcaniques recouvrent ce territoire, du Sud-Ouest au Nord-Est. Parmi celles-ci, la chaîne du Devès, située au Sud-Ouest, s'est formée essentiellement à partir de vastes coulées basaltiques mises en place lors d'éruptions fissurales.



La commune du Puy-en-Velay a recensé 18 879 habitants en 2008, soit une décroissance démographique de 7.9 % par rapport à l'année 1999.

Enfin, ce territoire concentre également un certain nombre d'enjeux importants à l'échelle régionale : hôpitaux, bâtiments scolaires et administratifs, centres de secours, cinémas, nombreux monuments très touristiques, ...

2.2. ALEA SISMIQUE REGIONAL

2.2.1. Mouvements sismiques réglementaires pour la commune du Puy-en-Velay

La commune du Puy-en-Velay était située, selon le zonage en vigueur jusqu'en 2011, en zone de sismicité 0 (sismicité négligeable mais non nulle d'après l'annexe de l'article R563-4 du Code de l'Environnement). Pour le bâti courant et selon la réglementation de 1991, aucune accélération réglementaire n'a été définie pour cette zone de sismicité (arrêté du 29 mai 1997).

Cependant, selon la nouvelle carte d'aléa sismique de la France, élaborée dans le cadre du Plan Séisme (2005-2010), la commune du Puy-en-Velay appartient à la zone d'aléa faible (Annexe 2). Cela correspond à une accélération de 0,7 à 1,1 m/s². Selon le nouveau zonage sismique de la France (décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010), les communes considérées sont classées en zone de sismicité 2 (« sismicité faible »). L'accélération de référence est de 0.7 m/s² pour le bâti dit « à risque normal » selon la réglementation en vigueur depuis le 1^{er} mai 2011 pour les bâtiments de catégorie d'importance II (arrêté du 22 octobre 2010).

2.2.2. Etude de la sismicité instrumentale et historique dans la région du Puy-en-Velay

A l'échelle de la France métropolitaine, l'activité sismique du département de la Haute-Loire est modérée. Grâce à la base de données française de sismicité historique SisFrance (BRGM/EDF/IRSN), les anciens séismes importants qui se sont manifestés aux alentours de la commune du Puy-en-Velay, ont pu être pris en compte (Figure 3). Parmi les plus destructeurs, et dans un rayon de 100 km autour de la commune du Puy-en-Velay, on compte 2 séismes d'intensité épiscopale VII MSK (ceux du 18 octobre 1833 et du 26 août 1892 ; Annexe 3) et 2 autres d'une intensité épiscopale VII-VIII MSK (ceux du 19 juillet 1973 et du 8 août 1873). Cela correspond à de fortes secousses amenant à des dégâts relativement importants (déplacements des meubles, chutes de cheminées, fissures ...). De plus, certains des séismes recensés ont été fortement ressentis dans la commune. Par exemple, ceux du 24 juin 1772 et du 2 février 1428 se sont produits à proximité immédiate du Puy-en-Velay (sans doute à moins d'un kilomètre) avec des intensités respectives de VI et VI-VII MSK (Tableau 1). A noter aussi que, dans ce même rayon de 100 km, 4 autres séismes d'intensité épiscopale supérieur à IV MSK (dégâts légers) se sont produits.

Par ailleurs, il existe certains témoignages qui précisent les effets de ces événements (secousses, chutes d'objets... ; voir Annexe 4).

Date	Intensité (MSK)		Distance épacentrale (Km)	Localisation de l'épicentre
	Epicentrale	Communale		
02/02/1428	VI-VII	VI-VII	1	Le Puy
24/06/1772	VI	VI	1	Le Puy
15/08/1570	V-VI	V-VI	1	Le Puy
16/09/1631	V-VI	V-VI	1	Le Puy
05/08/1868	V	V	1	Le Puy
26/08/1892	VI	IV	59	Massiac
03/10/1920	V	III-IV	53	Brioude
26/08/1892	VII	III-IV	73	Issoire
08/08/1873	VII-VIII	III-IV	95	Châteauneuf-du-Rhône
24/06/1878	VI	III-IV	119	Anse
17/01/1924	V-VI	III	47	Langogne
19/07/1873	III	III	1	Le Puy
25/03/1957	IV-V	III	117	Randan

Tableau 1 - Liste des séismes ressentis sur la commune du Puy-en-Velay avec une intensité observée associée supérieure ou égale à II-III MSK et dont l'épicentre est localisé à moins de 150 km de la commune (source : SisFrance 2008 - BRGM/EDF/IRSN)

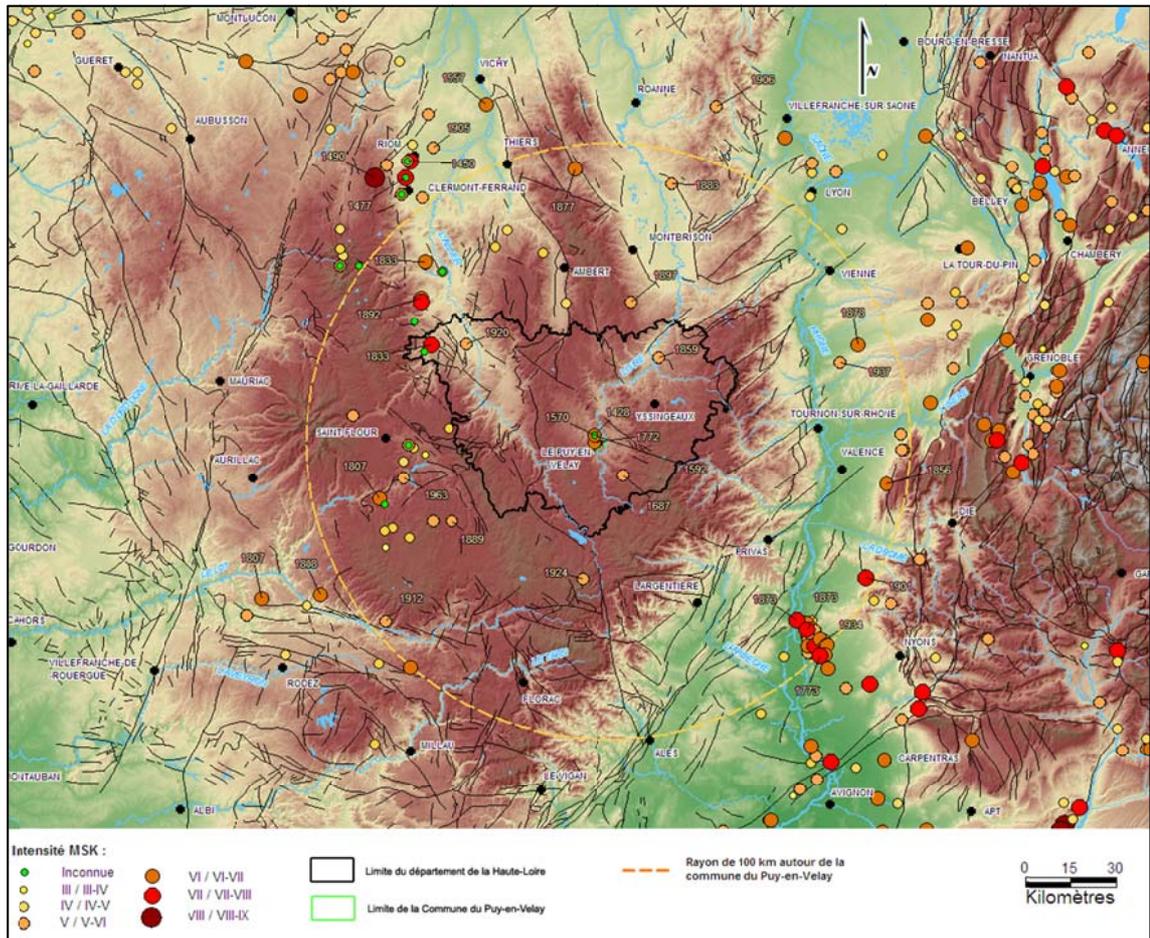


Figure 3 - Sismicité historique de la Haute-Loire (source : SisFrance - BRGM/EDF/IRSN)

Concernant la sismicité instrumentale (Figure 4), les plus forts séismes enregistrés à moins de 100 km de la ville du Puy-en-Velay sont ceux des 17 et 19 avril 1984 (Nord-Est de Valence), de magnitudes respectives 4,4 et 4,2 (MI). Le premier a été ressenti avec une intensité épiscopentrale de V-VI, et pour le second elle a atteint V MSK. Sinon, 7 séismes au total, de magnitude comprise entre 1,7 et 2,9, ont été enregistrés à des distances épiscopentrale inférieures ou égales à 5 km de la commune du Puy-en-Velay.

Par ailleurs, 65 séismes de magnitude modérée comprise entre 3,0 et 3,9 sont répertoriés entre 1962 et 2011 dans un rayon de 100 km autour de la commune du Puy-en-Velay, dans les bases de données françaises des séismes instrumentaux (base de données du Laboratoire de Détection Géophysique (LDG) du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), pour la période 1962-1979, et celle du Bureau Central Sismologique Français (BCSF) rassemblant les données du Réseau National de Surveillance Sismique (RéNaSS) et du LDG/CEA, entre 1980 et 2011). Pour cette même distance de 100 km, on compte un total de 8 séismes de magnitude comprise entre 1,5 et 3,1 (MI), entre janvier et avril 2011. Celui de magnitude 3,1 s'est produit le 26 janvier 2011, à une cinquantaine de kilomètres de la commune du Puy-en-Velay. Il s'agit de l'évènement sismique le plus fort produit en début d'année 2011, à moins de 100 km de la zone d'étude.

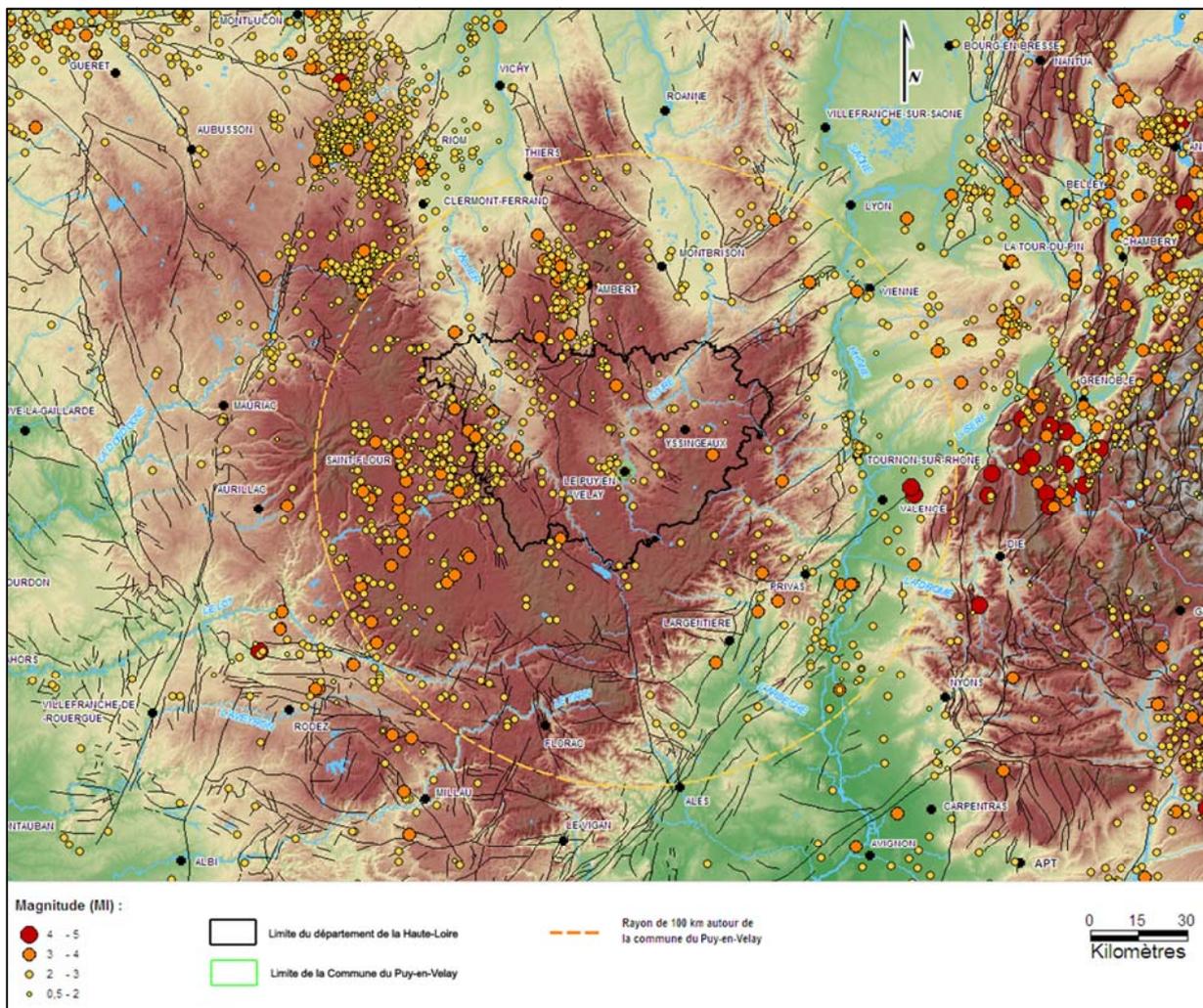


Figure 4 - Sismicité instrumentale de la Haute-Loire pour la période 1962 - avril 2011
(source : catalogue BCSF)

Actuellement, la sismicité au sein du Massif Central est toujours surveillée, et cela par le biais des 21 stations qui constituent le Réseau Sismologique Auvergne (RSA). Parmi elles, les 2 plus proches de la commune du Puy-en-Velay (Annexe 5) sont celles du canton de La Chaise-Dieu (accéléromètre, OCCD) et de la commune de Lubilhac (vélocimètre, LBL).

Cet inventaire de la sismicité locale montre qu'aucun séisme significatif n'est survenu depuis plus de 20 ans. De plus, les séismes historiques les plus forts avaient déjà été répertoriés il y a une dizaine d'années. Ainsi, l'ensemble des événements historiques et instrumentaux semblent avoir été pris en considération lors des études antérieures définissant l'aléa sismique à l'échelle régionale, telle que l'étude probabiliste menée par le Ministère de l'Environnement en 2002 utilisée à terme pour la définition des mouvements forfaitaires.

2.2.3. Éléments permettant de préciser le niveau d'aléa sismique régional

Les intensités ressenties au niveau de la commune du Puy-en-Velay peuvent être précisées grâce à l'étude statistico-historique (Rey et Dewez, 2008) établie dans le cadre du Plan Séisme (2005-2010). Ainsi, au niveau de la commune, l'intensité est évaluée entre IV et IV-V (MSK), pour une période de retour de 100 ans, et elle est comprise entre VI et VI-VII (MSK) pour une période de retour de 475 ans (Annexe 6).

Par la suite, il est possible de convertir ces intensités en accélérations (par la relation de Wald et al. (1999) pour les intensités inférieures à V et par la relation d'Atkinson et Sonley (2000) pour les intensités supérieures à V). Dans ce cas, les accélérations obtenues sont de l'ordre de 0,67 m/s² pour une période de retour de 100 ans, et de 1,44 m/s² pour une période de retour de 475 ans. Ces valeurs sont donc comparables aux accélérations définies par les mouvements réglementaires (de 0.7 à 1.1 m/s² en zone de sismicité faible), même si l'accélération estimée pour une période de retour de 475 ans est légèrement supérieure.

2.2.4. Etude préliminaire des failles actives dans la région du Puy-en-Velay

Plusieurs failles importantes, dont le tracé est connu ou supposé, sont répertoriées dans le voisinage de la commune du Puy-en-Velay (Figure 5). Parmi elles, certaines sont localisées dans des zones où une sismicité historique et instrumentale est recensée. Par exemple, c'est le cas dans la partie nord et à la limite ouest du département de la Haute-Loire. Située à environ 80 km de la commune, la faille des Cévennes (grand décrochement) peut également être citée.

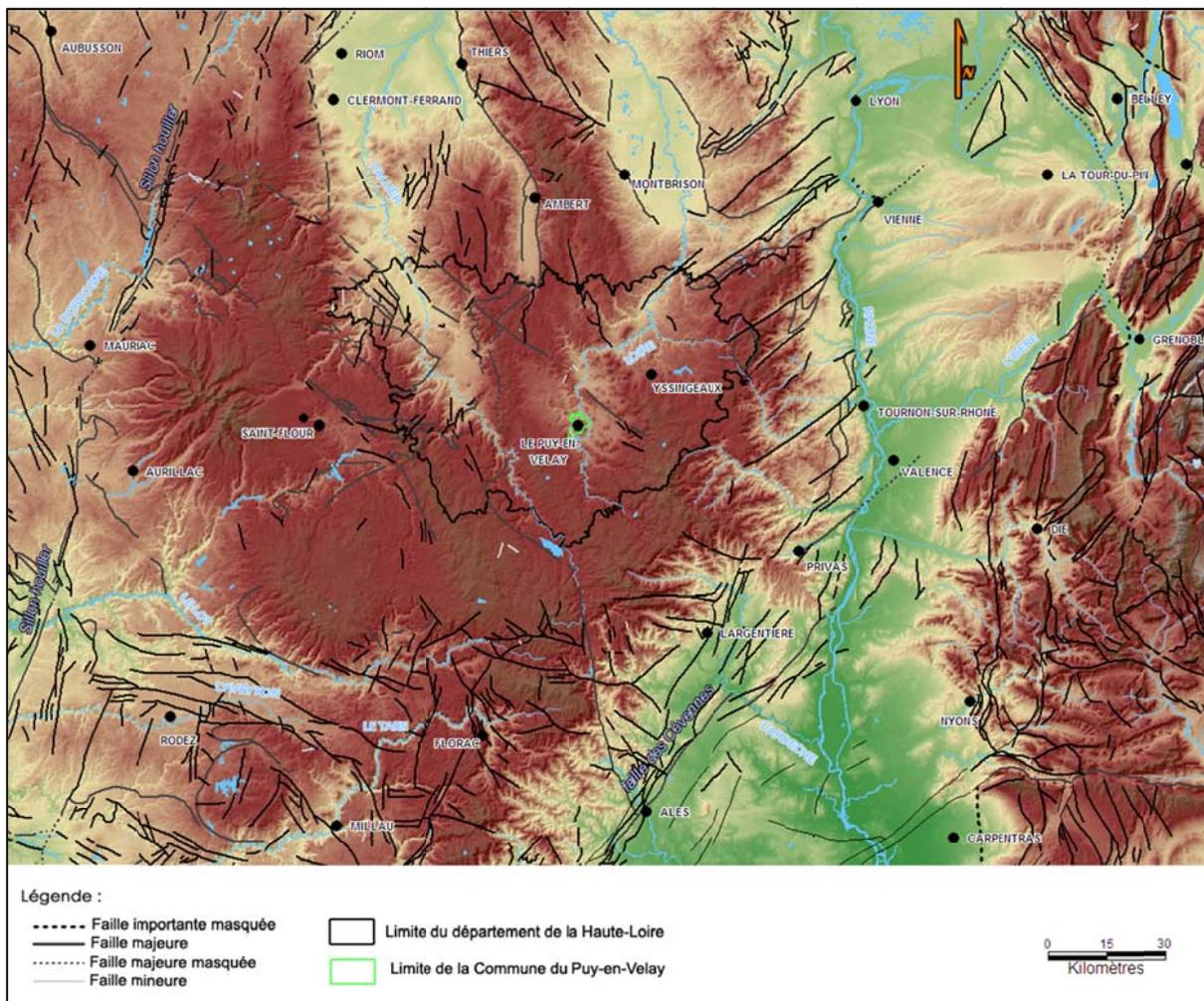


Figure 5 - Failles principales dans le voisinage de la commune du Puy-en-Velay

Ainsi, à partir d'études bibliographiques, il conviendrait d'estimer le potentiel sismogénique de chaque faille identifiée aux alentours du Puy-en-Velay, ainsi que la période de retour des événements destructeurs ayant eu lieu. En effet, cela permettrait d'évaluer la cohérence des mouvements induits par ces paléoséismes avec les mouvements réglementaires, pour une période de retour équivalente (par exemple de 475 ans). Si ce n'est pas le cas, ces mouvements spécifiques devront être pris en considération dans une réévaluation de l'aléa sismique régional.

Cependant, le lien entre la sismicité de la région et le fonctionnement de ces failles est assez complexe. En effet, l'article de Mazabraud *et al.* (2005) fournit des renseignements quant aux mécanismes au foyer de certains séismes (Figure 6). La plupart d'entre eux sont localisés au niveau de failles dont le jeu n'est pas connu. Pour les autres, d'une manière générale, leur mécanisme est différent de celui des failles auprès desquelles ils sont situés. Malgré tout, ces mécanismes au foyer montrent que la sismicité est globalement due à des décrochements ou de l'extension (failles normales, décrochements à composante normale...).

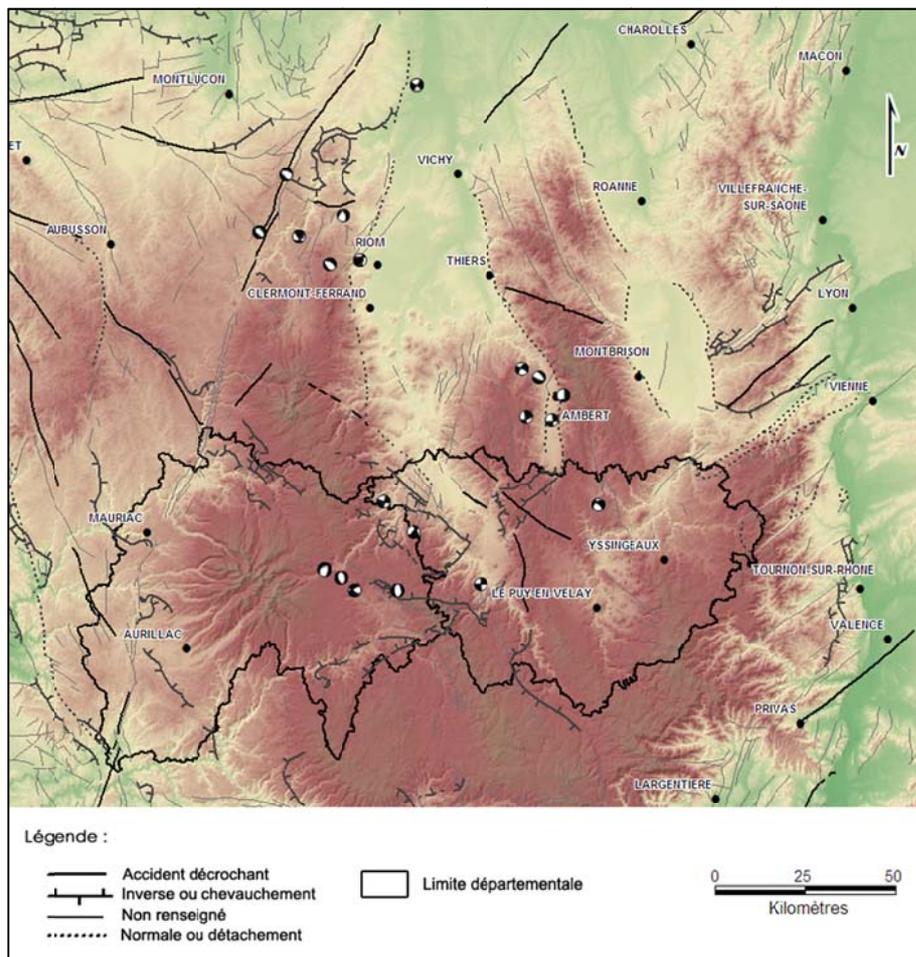


Figure 6 - Représentation de quelques mécanismes au foyer de la région Auvergne (source : OPGC)

Par ailleurs, aucune autre étude spécifique concernant la région de la commune du Puy-en-Velay, et qui nécessiterait de réévaluer ces mouvements sismiques, n'a été répertoriée.

2.3. ALEA SISMIQUE LOCAL

2.3.1. Effets de site lithologiques

Au vu de la carte géologique (Figure 7), les formations les plus susceptibles de générer des effets de site lithologiques sont les suivants :

Alluvions et colluvions du Quaternaire :

- Alluvions récentes : alluvions, galets, argile, sable (Fz) ;
- Epandages de pente et colluvions non-différenciés : argile, sable, blocs (C) ;
- Epandages de pente, colluvions et formations gélifluées de matériaux volcaniques basaltiques : sable, argile, blocs (composés principaux) et basalte (C β) ;

- Colluvions sablo-argileuses, parfois marneuses, de matériaux sédimentaires tertiaires : sable, argile (principalement) et calcaire (Cc) ;
- Alluvions anciennes et récentes non-différenciées : sable, graviers, galets (Fy-z) ;
- Alluvions anciennes de basse terrasse (Würm) : sable, graviers, argile (Fy).

Projections volcaniques du Quaternaire :

- Pyroclastites basaltiques des cônes stromboliens (py β) ;
- Brèches basanitiques (B β 1).

Formations du Tertiaire :

- Sables argileux fluvio-lacustres à éléments volcaniques remaniés (Pliocène) : sable, argiles, agglomérat, et blocs (Fv) ;
- Marnes et calcaires avec gypse accessoire de Ronzon (Oligocène inférieur et moyen ; e-gM) ;
- Sables argileux verts à kaolinite (eAv) ;
- Sables inférieurs rouges localement grésifiés de l'Eocène supérieur (eS) ;
- Lahars plio-pléistocènes (BL).

Ainsi, à l'aide de la carte géologique harmonisée, de sa notice et des données de la BSS (Banque de données du Sous-Sol), de nombreuses formations à effets de site potentiels ont pu être mises en évidence. Il s'agit principalement de dépôts sédimentaires. En effet, la sédimentation du Quaternaire et celle du Tertiaire peuvent présenter des épaisseurs proches de 20 m (voire plus pour e-gM, qui peut atteindre 30 m de profondeur), notamment dans la partie nord-ouest de la commune du Puy-en-Velay.

Il faut également prendre en compte certaines formations volcaniques, telles que les pyroclastites, les brèches et les lahars, qui sont elles aussi susceptibles de générer des effets lithologiques. Mais ces dépôts sont peu présents sur la commune du Puy-en-Velay. Par ailleurs les formations laviques ne sont pas considérées comme pouvant induire ces phénomènes, du fait de leur forte densité et de leur grande compacité. Néanmoins, peu de données fournissent des renseignements sur leurs épaisseurs.

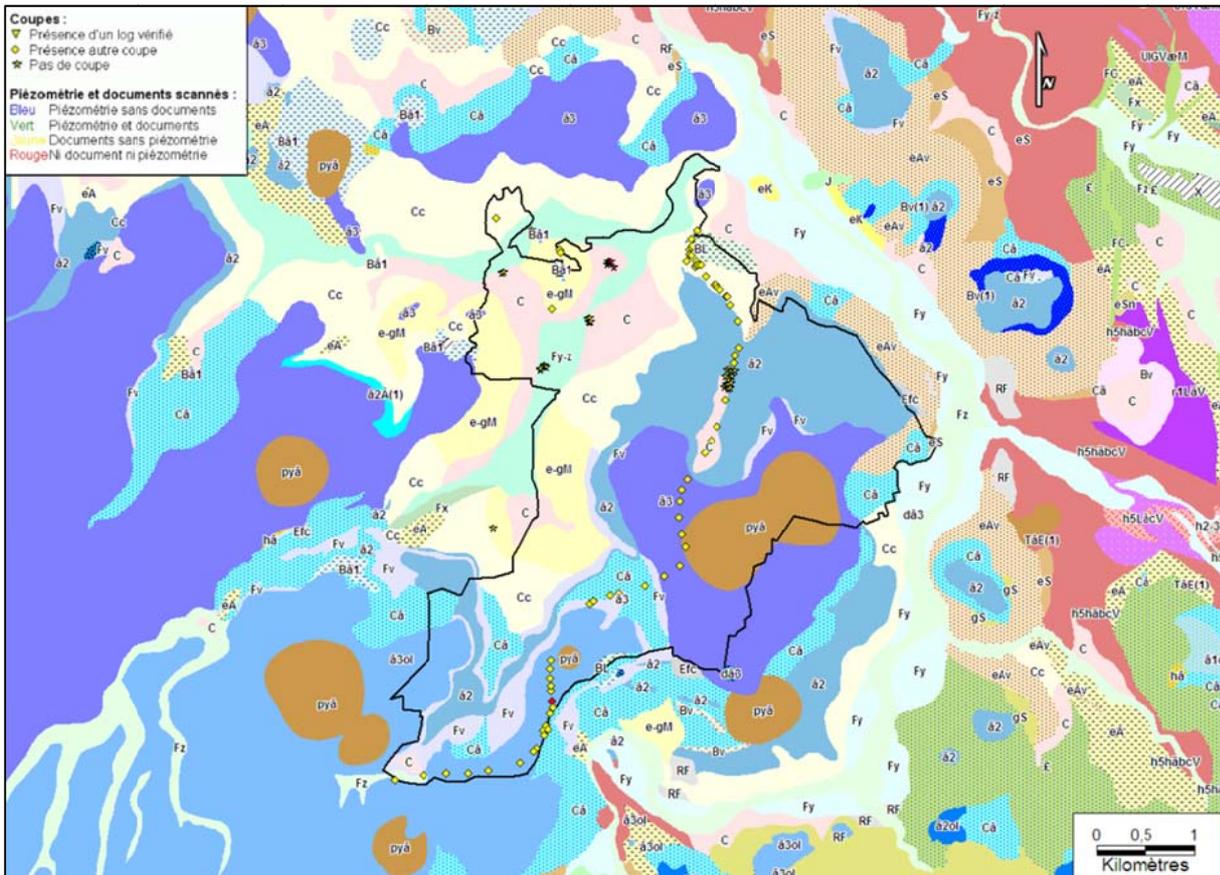


Figure 8 - Localisation des sondages BSS sur la carte géologique dans la commune du Puy-en-Velay

La répartition géographique des zones les plus susceptibles d'être exposées aux effets de sites lithologiques est représentée par la Figure 9. Cela correspond à environ 60 % du territoire, et à peu près à plus de 70 % des secteurs urbanisés tels qu'ils ont été considérés dans la suite de l'étude (voir 2.4). C'est principalement la partie nord-ouest de la commune qui est concernée.

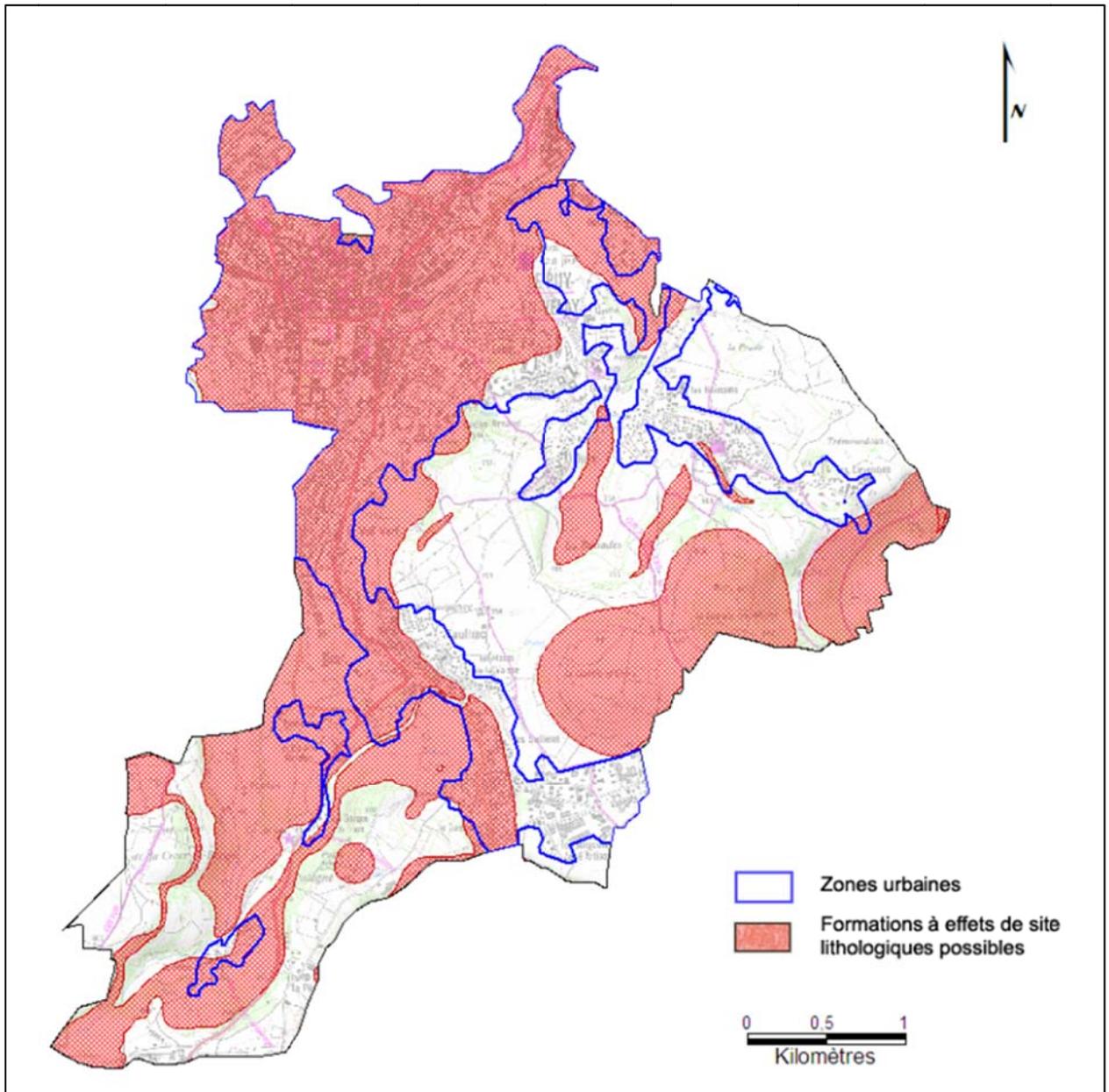


Figure 9 - Carte de susceptibilité aux effets de site lithologiques sur la commune du Puy-en-Velay

2.3.2. Effets de site topographiques

La commune du Puy-en-Velay montre une topographie assez accidentée. En effet, dans sa partie nord-ouest, au niveau du bassin sédimentaire, les altitudes varient progressivement entre 620 et 700 m, tandis que pour les formations volcaniques, présentes du Sud-Ouest au Nord-Est, elles peuvent atteindre environ 870 m. De plus, un dyke culminant à 730 m d'altitude se situe à la frontière nord de la commune. Il présente un relief très ponctuel (soit presque 100 m de dénivelé sur une distance de 200 m). Les effets de site topographiques

sont représentés pour cette commune par un zonage binaire (Figure 10), c'est-à-dire en distinguant les zones sans amplification de celles où une modification du signal est possible (on se reportera au rapport de Rey *et al.*, 2009 pour des compléments sur la méthodologie).

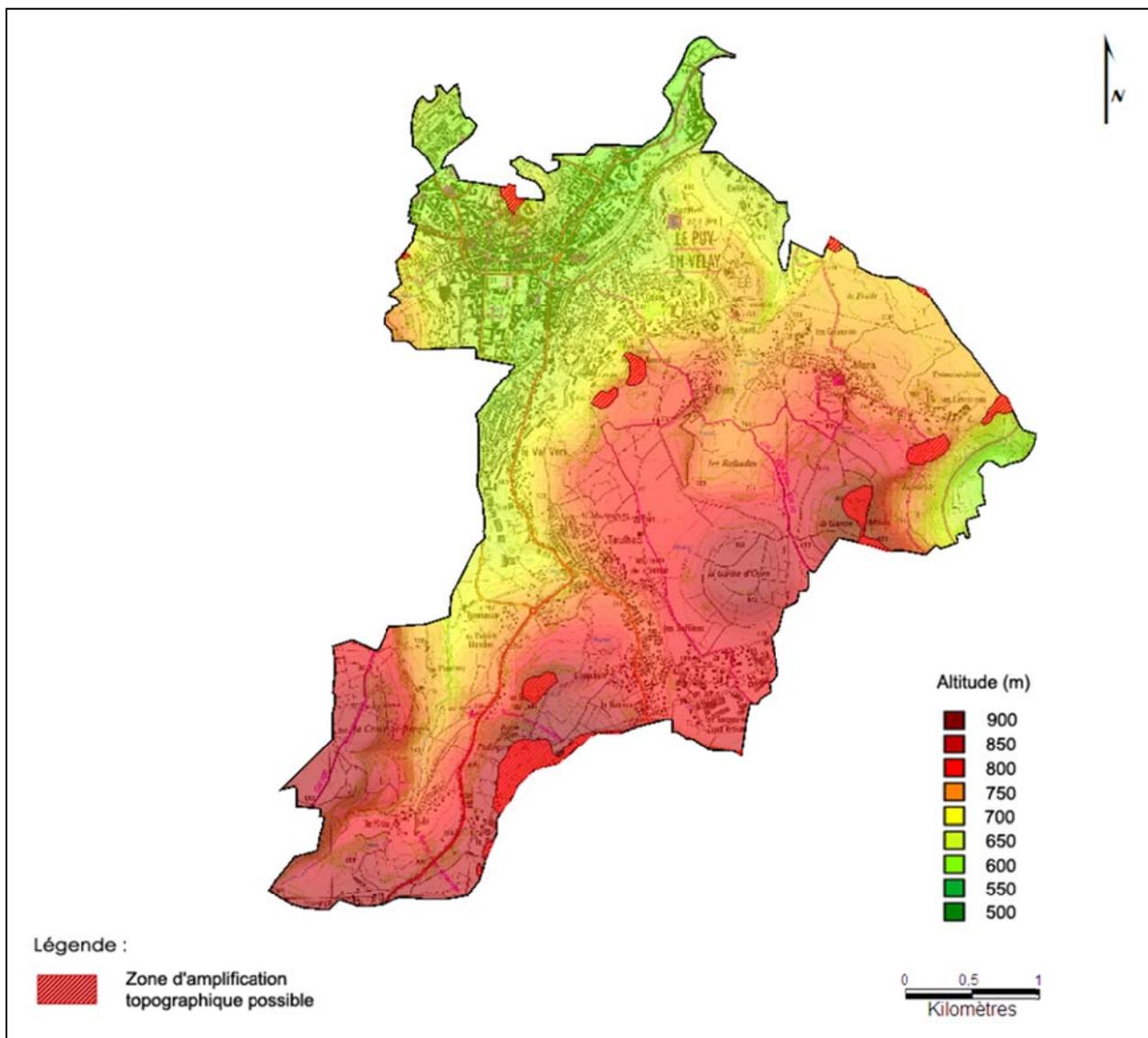


Figure 10 - Zones d'amplification topographique pour la commune du Puy-en-Velay (fond scan25 et MNT au pas de 50 m - IGN)

D'après cette cartographie de premier ordre des effets de site topographiques, les zones susceptibles d'être affectées par ce phénomène sont bien situées sur les bordures et les crêtes des formations volcaniques, ainsi qu'au niveau du dyke au Nord de la commune (Figure 11).



Figure 11 - Dykes surplombant la commune du Puy-en-Velay (photo BRGM)

2.3.3. Mouvements de terrain

i. Inventaire des mouvements de terrain

Dans le cadre d'un microzonage sismique, l'étude des mouvements de terrains induits par des séismes consiste à identifier les zones où ils sont susceptibles de se produire. Pour cela, l'utilisation de données géologiques, géomorphologiques et géotechniques est profitable. Cette étude s'est donc reposée sur l'analyse de cartes géologiques à 1/50 000, de données événementielles issues de la BDCAVITE (Base de Données des Cavités) et de la BDMVT (Base de Données des Mouvements de Terrain).

La BDCAVITE mentionne 62 cavités sur la commune du Puy-en-Velay (Figure 12). Parmi elles, 28 carrières se situent au Nord-Est de la commune (au niveau de la zone urbanisée), 3 ouvrages civils siègent au Sud, et 31 cavités n'ont pas pu être cartographiées (cavités confidentielles, sites archéologiques, sites protégés, cavités mal localisées).

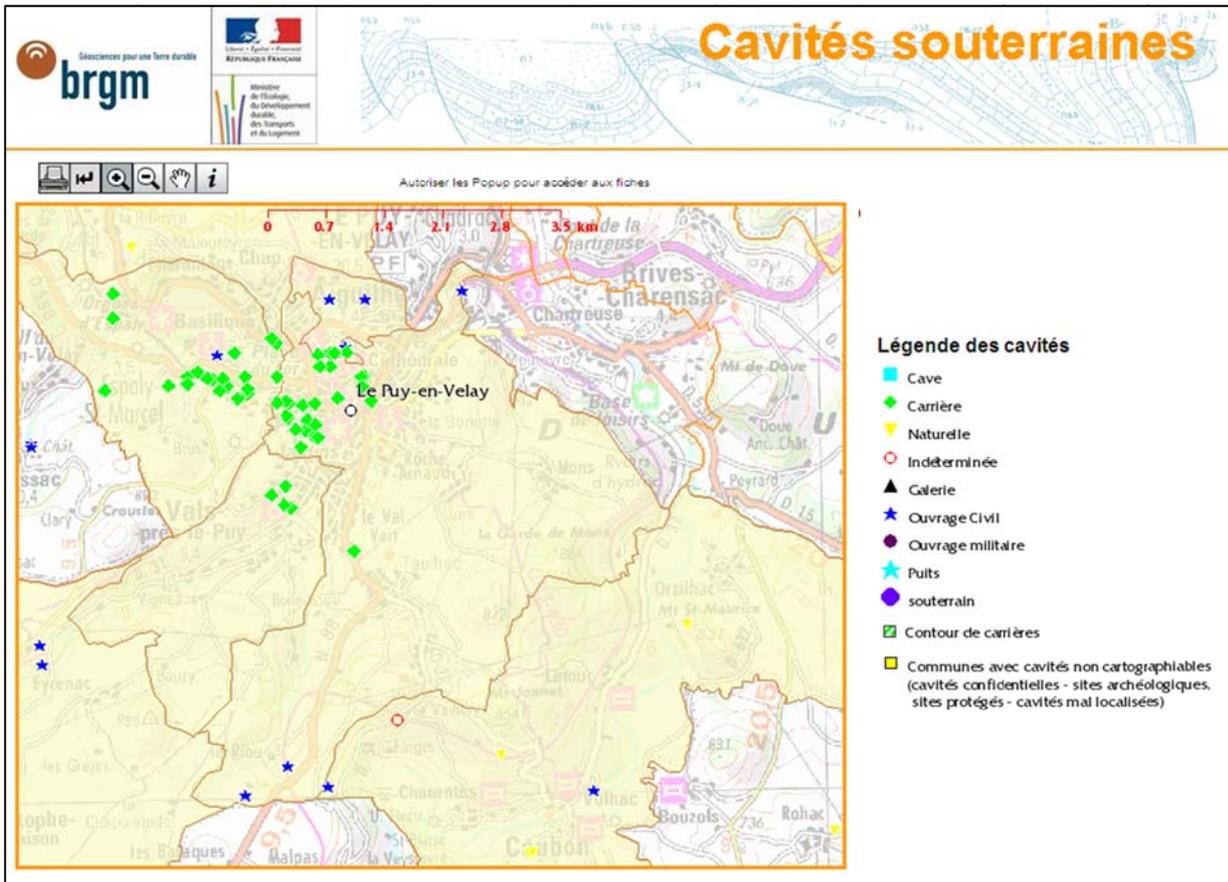


Figure 12 - Extrait de la BDCAVITE pour la commune du Puy-en-Velay

Quant à la BDMVT, elle mentionne 11 mouvements de terrain, en plus de ceux qui n'ont pas pu être localisés (Figure 13) : 7 glissements dans la partie est de la commune, 2 effondrements au Nord-Est, et 2 coulées situées plus au Nord. De plus, il est important de noter que la plupart d'entre eux se sont produits au niveau de la zone urbaine et que, d'après ce recensement, le volume de certains glissements peut atteindre 80 000 m³.

10° à 20° et de plus de 20°, pour lesquelles la probabilité de chute de blocs est considérée respectivement comme faible (à nulle), moyenne et forte.

				Valeurs de pente				
				0 - 5 °	5 - 10 °	10 - 15 °	15 - 20°	> 20 °
				1	2	3	4	5
Lithologie	Colluvions, alluvions...	Glissement	10	Faible (11)	Moyen (12)	Moyen (13)	Fort (14)	Fort (15)
	Calcaires, coulées volcaniques...	Chute de blocs	20	Faible (21)	Faible (22)	Moyen (23)	Moyen (24)	Fort (25)

Tableau 2 - Matrice et définition des classes de susceptibilité aux mouvements de terrain

La carte de susceptibilité aux mouvements de terrain issue de cette analyse (Figure 14) montre que près de 60 % de la zone urbanisée présente une susceptibilité moyenne aux mouvements de terrain.

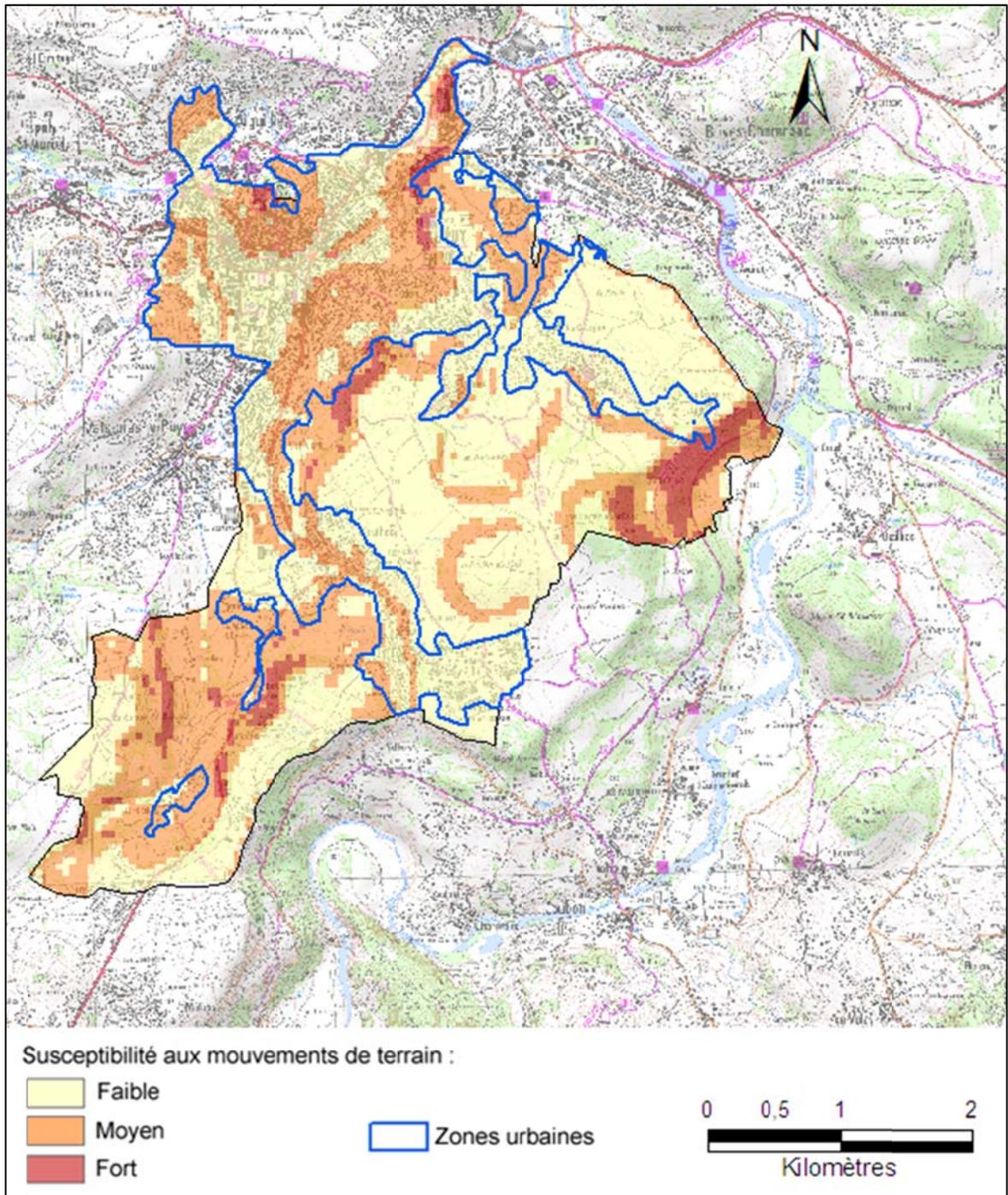


Figure 14 - Carte de susceptibilité aux mouvements de terrain sur la commune du Puy-en-Velay

Parmi elle, pratiquement tout le centre-historique est concerné. Sinon, la plupart des zones de susceptibilité moyenne à forte sont situées au Sud-Ouest, au Nord-Est et au centre de la commune, c'est-à-dire au niveau des bordures des formations volcaniques.

2.3.4. Potentialité de liquéfaction

La liquéfaction peut se produire au niveau de matériaux fins, plutôt limono-sableux, peu contraints et saturés en eau. Ainsi, d'après la carte géologique harmonisée, les formations pouvant aboutir à ce genre de phénomène sont les suivantes:

- Alluvions récentes : alluvions, galets, argile, sable(Fz) ;
- Epandages de pente et colluvions non-différenciés : argile, sable, blocs (C) ;
- Epandages de pente, colluvions et formations gélifluées de matériaux volcaniques basaltiques : sable, argile, blocs (composés principaux) et basalte(C β) ;
- Colluvions sablo-argileuses, parfois marneuses, de matériaux sédimentaires tertiaires : sable, argile (principalement) et calcaire (Cc) ;
- Alluvions anciennes et récentes non-différenciées : sable, graviers, galets (Fy-z) ;
- Alluvions anciennes de basse terrasse (Würm) : sable, graviers, argile (Fy) ;
- Sables argileux fluvio-lacustres à éléments volcaniques remaniés (Pliocène) : sable, argiles, agglomérat et blocs (Fv) ;
- Sables argileux verts à kaolinite (eAv) ;
- Sables inférieurs rouges localement grésifiés de l'Eocène supérieur (eS).

Cela couvre environ 40 % du territoire et plus de 60 % des zones urbanisées (Figure 15).

Certaines données de la BSS contiennent des informations piézométriques. Elles indiquent à divers endroits, et notamment dans la partie nord-est de la commune, des venues d'eau ou la présence de zones humides entre 2,50 et 5 m de profondeur. L'hypothèse d'une nappe superficielle sous ce territoire peut donc être envisagée. Mais étant donné que le réseau hydrographique en Auvergne est très discontinu, cela demande à être vérifié.

Cependant, l'activité sismique dans la commune du Puy-en-Velay n'est que modérée. Ainsi, même si ces formations sont susceptibles d'être liquéfiables, il est peu probable que lors d'un séisme ce phénomène se produise. Il conviendrait donc de prendre en compte ce faible niveau de sismicité lors d'une étude plus détaillée, afin de confirmer ou d'infirmer la présence de zones sujettes à la liquéfaction.

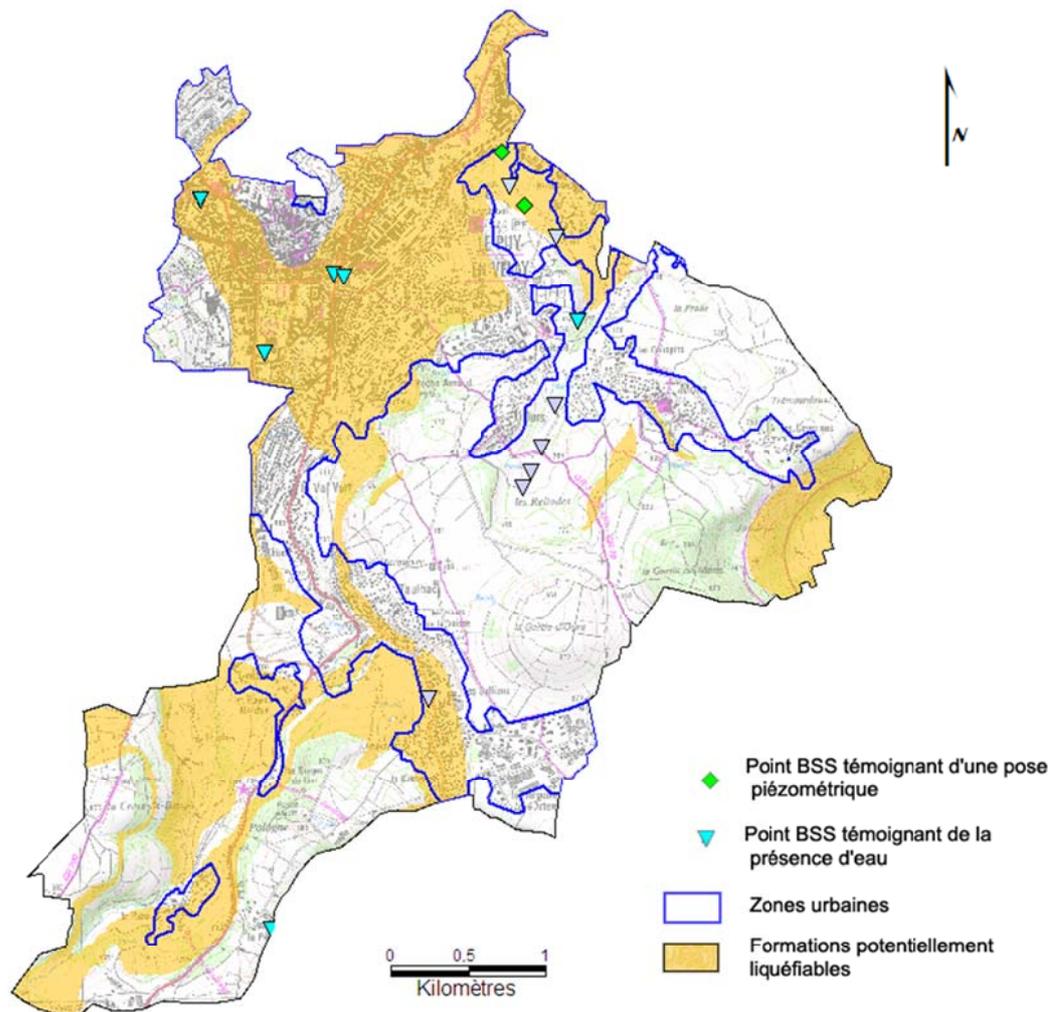


Figure 15 - Carte de susceptibilité à la liquéfaction sur la commune du Puy-en-Velay

2.4. VULNERABILITE DU BATI

2.4.1. Bâti courant (catégorie d'importance II)

Dans le cadre de ce prédiagnostic de microzonage sismique, l'analyse de la vulnérabilité du bâti courant (de catégorie d'importance II) a été réalisée à partir des données INSEE-IRIS de 1999 et de 2006 (Annexe 7), d'une visite de terrain de 2 jours et de l'étude de l'orthophotographie IGN du Puy-en-Velay.

Ainsi, cette commune est divisée en 8 IRIS qui sont représentés sur la Figure 16 et listés dans le Tableau 3.

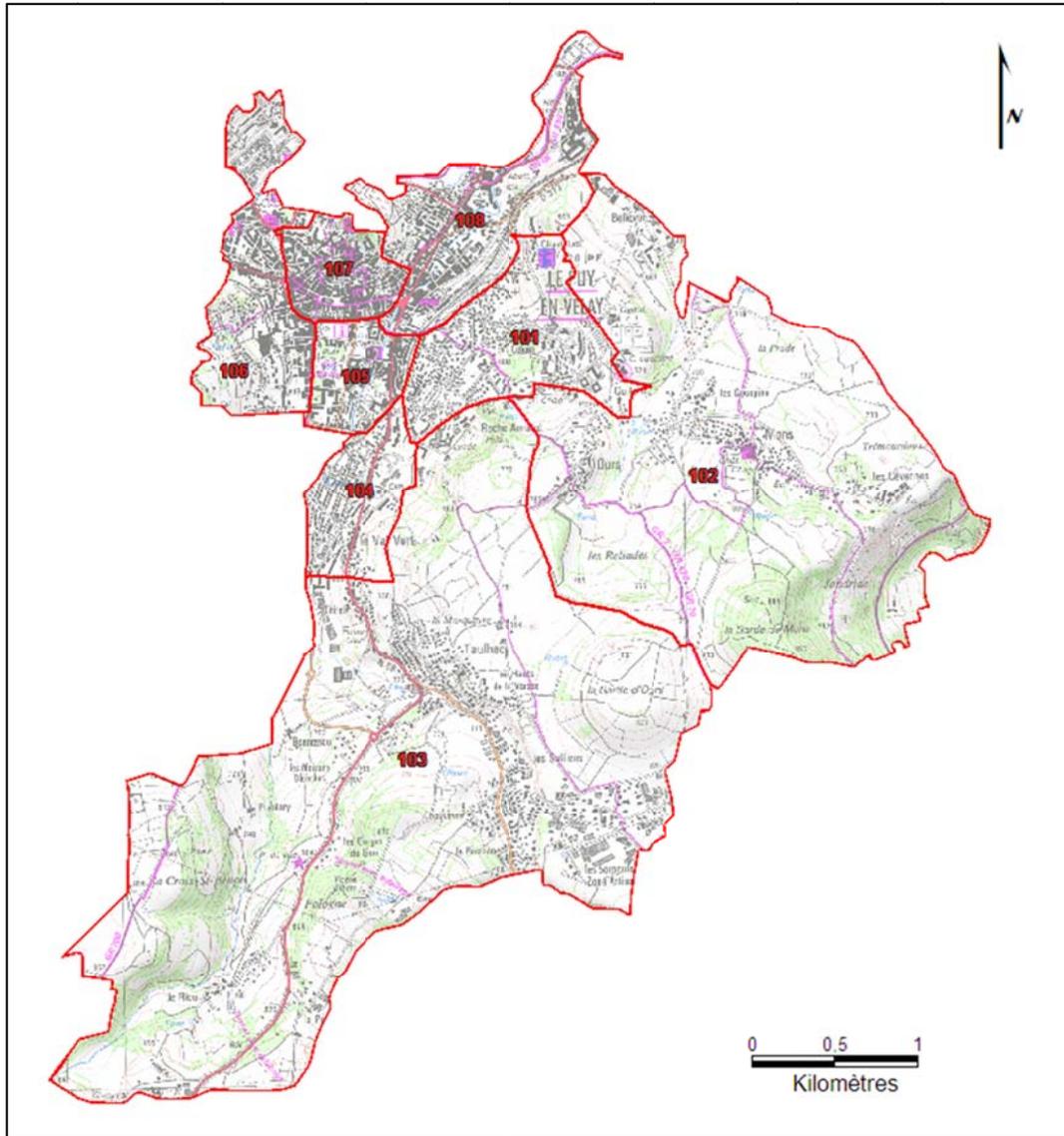


Figure 16 - Découpage de la commune du Puy-en-Velay par IRIS (source : © INSEE 1999)

Identifiant	Nom
101	Guitard-Roche Arnaud
102	Zone Verte Ours-Mons
103	Taulhac
104	Val Vert
105	Breuil-Carmes
106	Carnot-Capucins
107	Centre Historique
108	Saint-Jean-République

Tableau 3 - Liste des IRIS de la commune du Puy-en-Velay (source : © INSEE 1999)

La visite de terrain (Figure 17) a permis d'identifier les différents types de construction pour la plupart des îlots, afin de déterminer leur niveau d'importance en terme de vulnérabilité.

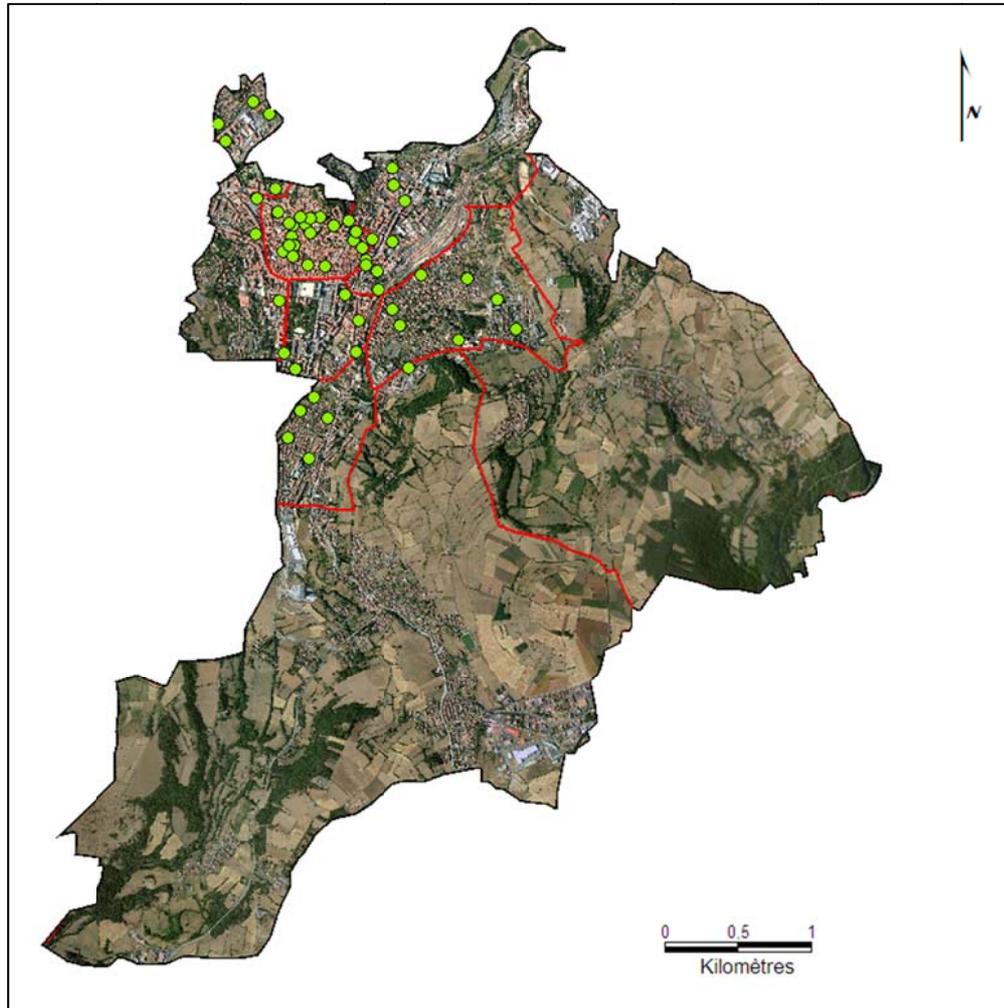


Figure 17 - Points d'observation (ronds verts) durant la visite de terrain et limites des différents IRIS (en rouge ; fond : orthophotographie ©IGN)

2.4.2. Vulnérabilité des habitats collectifs et individuels

D'après cette visite de terrain, il ressort que l'ensemble du territoire du Puy-en-Velay comprend principalement trois types d'habitat :

- ceux bâtis en maçonnerie de pierre (centre-ville et centre-historique), qui peuvent être à la fois de l'habitat individuel ou collectif ;
- les habitats collectifs des extensions urbaines, construits surtout dans les années 1960 - 1980 ;
- les habitats pavillonnaires construits à partir des années 1950 jusqu'à nos jours.

Tout le centre-historique, ainsi qu'une partie du centre-ville, sont composés de bâtiments construits en maçonnerie ancienne (Figure 18). De manière générale, ces constructions ne dépassent guère 4 étages, et comprennent à la fois de l'habitat collectif et individuel. Du basalte (de la région) a été utilisé pour les murs porteurs, du bois pour tout ce qui concerne le plancher et la charpente, et des tuiles pour la toiture. Les murs sont chaînés grâce au harpage des pierres aux niveaux des angles. Cette technique de chaînage utilise généralement des pierres de meilleure qualité, qui ont été taillées, le reste du mur étant construit avec des pierres simples. Les encadrements des ouvertures sont également faits avec des pierres massives (ou pierres de taille) sauf quelques linteaux qui peuvent être de bois (plus rare). Quelques bâtiments isolés peuvent présenter une façade (généralement côté rue) entièrement construite en pierres de taille, les autres étant en pierres simples.



Figure 18 - Maisons en maçonnerie ancienne dans le centre-ville du Puy-en-Velay (photos BRGM) :
- murs en pierres simples, chaînage des angles et encadrements des ouvertures en pierres de taille (gauche)
- façade côté rue entièrement en pierres de taille (droite)

Toutefois, ce type d'habitat présente de nombreux facteurs de vulnérabilité. On compte parmi eux les cheminées (généralement en briques et pouvant atteindre 2 m de haut), les fenêtres de toit, les corniches, ainsi que le manque de jointures et la différence de hauteur entre les bâtiments juxtaposés. De plus, beaucoup de ces constructions présentent des zones de transparences au niveau du rez-de-chaussée (RDC) suite à l'aménagement de magasins. Dans certains cas, un niveau de faiblesse existait déjà à cet endroit (cas des arches surbaissés). Par ailleurs, les réhabilitations dans le centre historique sont nombreuses, il est possible d'y trouver des poutres de bois ou métalliques pour renforcer les RDC.

Au niveau des grands boulevards, de nombreux bâtiments présentent un type de construction qui utilise toujours la maçonnerie de pierre (murs porteurs), et qui incorpore en plus des éléments décoratifs (irrégularité en plan), ainsi que des planchers en béton (Figure 19). Ces bâtiments ont été construits pendant la première moitié du XX^{ème} siècle, voire même une partie des années 1950. Ils se situent principalement dans les IRIS 105, 106 et 108. A la différence de l'habitat collectif du centre-historique, ces immeubles peuvent contenir un nombre plus important de logements.



Figure 19 - Bâtiments d'habitat collectif avec des murs porteurs en pierres (photos BRGM) :
- bâtis de 5 étages, avec des pierres de taille au niveau des ouvertures (gauche)
- bâtis de 3 étages avec planchers en béton (droite)

A partir des années 1960, l'habitat collectif se construit avec une structure en béton. D'abord, dans les environs du centre-ville (IRIS 105 et 108) on trouve des immeubles présentant une ossature porteuse en béton. La visite de terrain a permis de constater de nombreux facteurs de vulnérabilité sismique pour ces bâtiments, tels que les niveaux transparents, les balcons en porte à faux et les angles affaiblis (Figure 20).



Figure 20 - Bâtiments d'habitat collectif dans le centre-ville du Puy-en-Velay (photos BRGM) :
- zone de transparence sur tout le RDC et sur deux niveaux localement (gauche)
- balcons en porte à faux (droite)

L'habitat des îlots 104 (Val Vert) et 101 (Guitard Roche Arnaud) correspond plutôt à de l'habitat collectif social (HLM) construit dans les années 1960 - 1970 (Figure 21). A la différence des immeubles situés à proximité du centre-ville, ces bâtiments sont plus réguliers en forme. Malgré tout, ils présentent aussi des zones de transparence au RDC.



Figure 21 - Bâtiments de type HLM : le bâtiment à droite présente une transparence du RDC (photos BRGM)

Finalement, dans l'îlot IRIS 107 (centre-historique), le nombre de logements en habitat collectif, bâtis entre 1990 et 2004, est très important. Ces logements correspondent à des immeubles construits ces deux dernières décennies, suite à des travaux de réhabilitation du centre-ville (Figure 22). Le système constructif reste toutefois très similaire (structure en béton).



Figure 22 - Bâtiments d'habitat collectif dans le centre-ville du Puy-en-Velay (photos BRGM) :

- balcons en porte à faux, niveau de transparence au RDC (gauche)
- angle affaibli, porte à faux, zone de transparence au RDC (droite)

En ce qui concerne l'habitat pavillonnaire (Figure 23), il occupe principalement les IRIS 102 (zone verte Ours-Mons) et 103 (Taulhac). Ces constructions se sont principalement développées à partir des années 1950. De manière générale, il s'agit de bâtiments à un seul étage, assez simple en forme, mais avec de grandes cheminées en briques et des irrégularités au niveau de la toiture. Le système porteur est en maçonnerie, les charpentes

en bois, les planchers en bois ou en béton, et le toit en tuiles. De plus, beaucoup de ces maisons incorporent des revêtements décoratifs en pierre.



Figure 23 - Exemples de maisons individuelles construites en maçonnerie porteuse datant de la période 1950-1980 (photos BRGM)

Dans les mêmes îlots IRIS 102 et 103, on trouve de l'habitat individuel construit pendant les 20 dernières années. Le type de bâtiment et le système porteur restent néanmoins très similaires à ceux décrits ci-dessus pour l'habitat pavillonnaire (Figure 24).



Figure 24 - Lotissements de construction récente (photos BRGM)

Ainsi, la présente analyse indique que les quartiers anciens du centre-ville du Puy-en-Velay sont les plus vulnérables face au risque sismique, en raison de l'enjeu que constitue la grande concentration d'immeubles dans ces zones, ainsi que de l'ancienneté du bâti et de son état d'entretien variable. En effet, les structures en pierres de taille des bâtiments ont été conçues pour résister à des charges gravitationnelles, et non aux sollicitations horizontales telles que celles générées par un séisme. Mais par rapport à d'autres zones en France, où la construction traditionnelle est simplement faite avec des pierres tout-venant, dans la région du Puy-en-Velay l'utilisation du basalte et des pierres de taille pour les chaînages entre les murs et l'encadrement des ouvertures est un point positif vis-à-vis de la vulnérabilité sismique des bâtiments. Finalement, il ne faut pas négliger les nombreuses irrégularités constatées pour les immeubles construits en béton armé.

Le séisme récent de Lorca (Espagne, mai 2011) a montré l'importance des dégâts des éléments non structuraux en cas de séismes de faible magnitude. Or, le centre historique du Puy-en-Velay, ainsi que la quasi-totalité des maisons traditionnelles présentent des éléments non-structuraux à risque, tels que les cheminées, les fenêtres de toit, ou encore les corniches.

2.4.3. Répartition des classes de vulnérabilité sur la commune du Puy-en-Velay

Les bâtiments en maçonnerie ancienne peuvent présenter une forte variabilité de la vulnérabilité sismique en fonction de la qualité constructive, de l'état de conservation, des renforcements, du nombre d'étages, etc. L'échelle EMS-98 distingue trois types de vulnérabilité pour ces bâtiments en maçonnerie de pierre : la classe A pour des bâtiments en pierre tout-venant, la classe B pour des constructions en pierre brute et la classe C pour celles en pierre de taille. Sur le terrain, il a été observé que les pierres de taille n'ont été utilisées que pour les angles et les encadrements des ouvertures, le reste des murs étant bâti en pierre simple. Ainsi, une grande partie de ces bâtiments anciens a été considérée comme appartenant à la classe EMS-98 B. Seul un petit pourcentage d'immeubles du centre historique, entièrement construits en pierre de taille, pourrait être associé à la classe EMS-98 C. De même qu'un petit nombre de constructions de qualité plus médiocre feraient partie de la classe EMS-98 A.

La commune du Puy-en-Velay présente un grand nombre de logements en habitat collectif. Ce type d'habitat, construit surtout à partir de 1960, possède un système porteur en béton soit avec des portiques, soit avec un système mixte portiques-voiles. Etant donné que la commune du Puy-en-Velay se situait en zone de sismicité 0 d'après la réglementation du 11 mai 1991 (sismicité négligeable mais non nulle), ces bâtiments n'ont pas été construits selon un code parasismique. Néanmoins, ces immeubles ont pu bénéficier de contraintes constructives du code « vent » qui ajoute une force horizontale au dimensionnement de la structure (règles neige et vent datant de 1965). Dans la présente étude, il a été considéré que l'ensemble de l'habitat collectif de construction d'après-guerre correspond à une classe de vulnérabilité EMS-98 C. En ce qui concerne les maisons individuelles d'après-guerre, elles sont pratiquement toutes en maçonnerie non-renforcée, avec des planchers en béton. La classe EMS-98 C leur a été attribuée.

A partir de ces données et de celles de l'INSEE, ces classes de vulnérabilité ont été réparties sur l'ensemble de la commune du Puy-en-Velay (Tableau 4).

Ainsi, la répartition des bâtiments en classe de vulnérabilité B est représentée par la Figure 25, et celle de la classe C par la Figure 26 (la répartition des bâtiments de classe A n'est pas représentée car leur nombre est trop faible mais ils ont bien été pris en compte dans la suite de l'étude). Il en découle que les habitats les plus vulnérables (classe B) se situent au Nord de la commune, au niveau du centre-ville et du centre historique (IRIS 105, 106, 107 et 108), et les moins vulnérables (classe C) au Sud (IRIS 101, 102 et 103).

ID	Nom	Nombre habitation	Maisons individuelles			Immeubles	
			A	B	C	B	C
101	Guitard-Roche Arnaud	558	3%	27%	52%	6%	12%
102	Zone Verte Ours-Mons	300	2%	20%	78%	0%	0%
103	Taulhac	555	1%	11%	81%	1%	6%
104	Val Vert	356	2%	17%	46%	6%	29%
105	Breuil-Carmes	392	1%	12%	11%	52%	24%
106	Carnot-Capucins	585	2%	15%	26%	43%	14%
107	Centre Historique	716	1%	13%	10%	55%	21%
108	Saint-Jean-République	378	1%	9%	18%	40%	32%

Tableau 4 - Répartition des différentes classes de vulnérabilité pour chaque IRIS de la commune du Puy-en-Velay

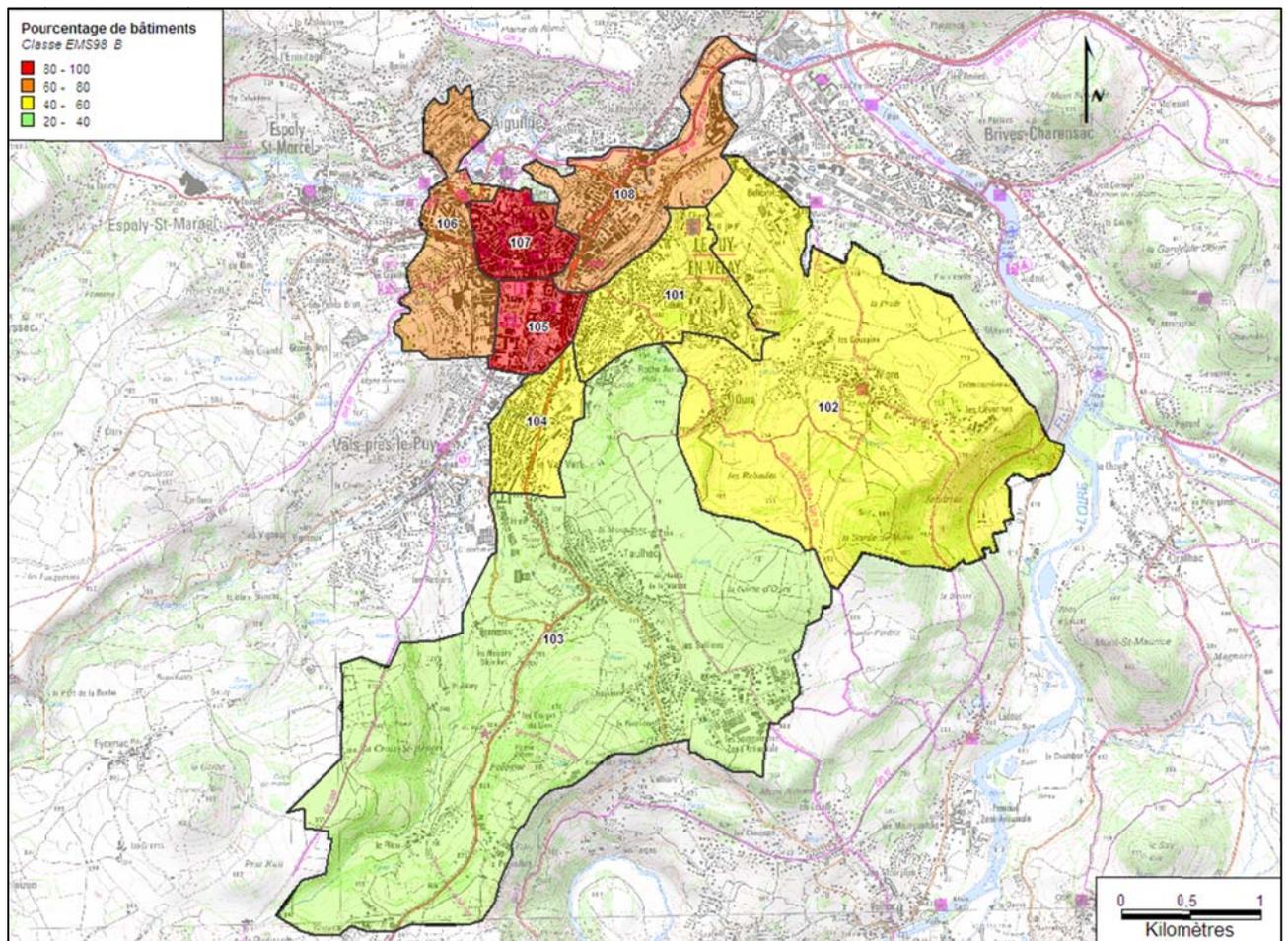


Figure 25 - Répartition des bâtiments en classe de vulnérabilité B sur la commune du Puy-en-Velay

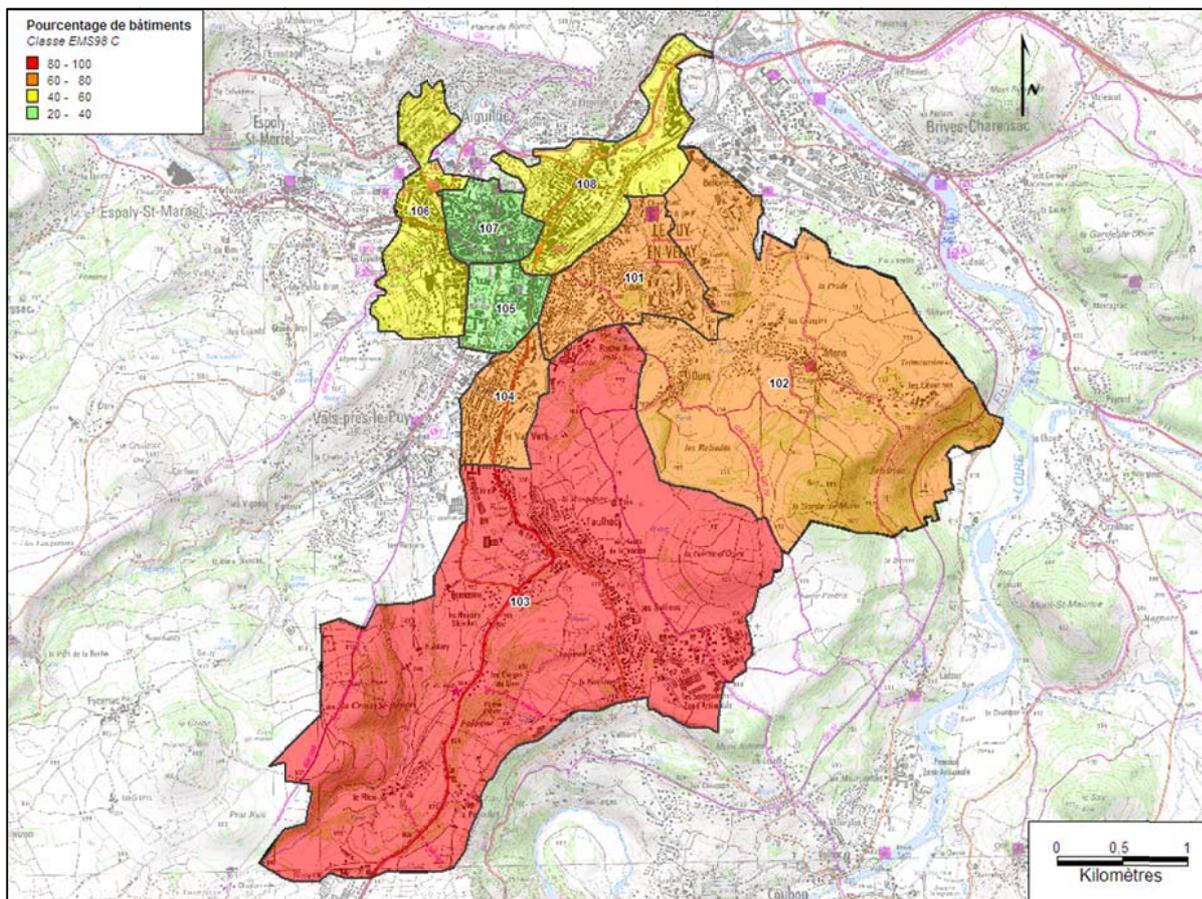


Figure 26 - Répartition des bâtiments en classe de vulnérabilité C sur la commune du Puy-en-Velay

2.4.4. Bâti de catégorie d'importance III et IV

La vulnérabilité des bâtiments de catégorie d'importance III et IV fait l'objet, lors des microzonages sismiques, d'une analyse spécifique : chaque bâtiment est considéré individuellement, contrairement à ceux des catégories d'importance I et II, qui sont traités de manière statistique.

Ainsi, la Figure 27 montre la localisation des principaux bâtis de catégorie d'importance III et IV sur la commune du Puy-en-Velay. Généralement, il s'agit des ERP (Etablissements Recevant du Public) tels que les établissements d'enseignement, les gares ferroviaires, la plupart des établissements sanitaires et administratifs. Ces ERP sont respectivement de type R, GA, U et W. De plus, cette catégorie d'importance comprend également les établissements de secours.

En tout, 46 bâtiments ont été recensés, dont 24 établissements scolaires, 1 bâtiment administratif, 1 gare ferroviaire, 15 établissements sanitaires et enfin 3 bâtiments accueillant des services nécessaires pour la gestion de crise et ne relevant pas du classement des ERP (Annexe 8).

Parmi ces bâtiments, certains (environ 7) sont stratégiques en cas de crise d'un point de vue décisionnel (préfecture) ou organisationnel (gendarmerie, hôpitaux...). Ces ouvrages à forts enjeux sont répartis sur l'ensemble de la commune.

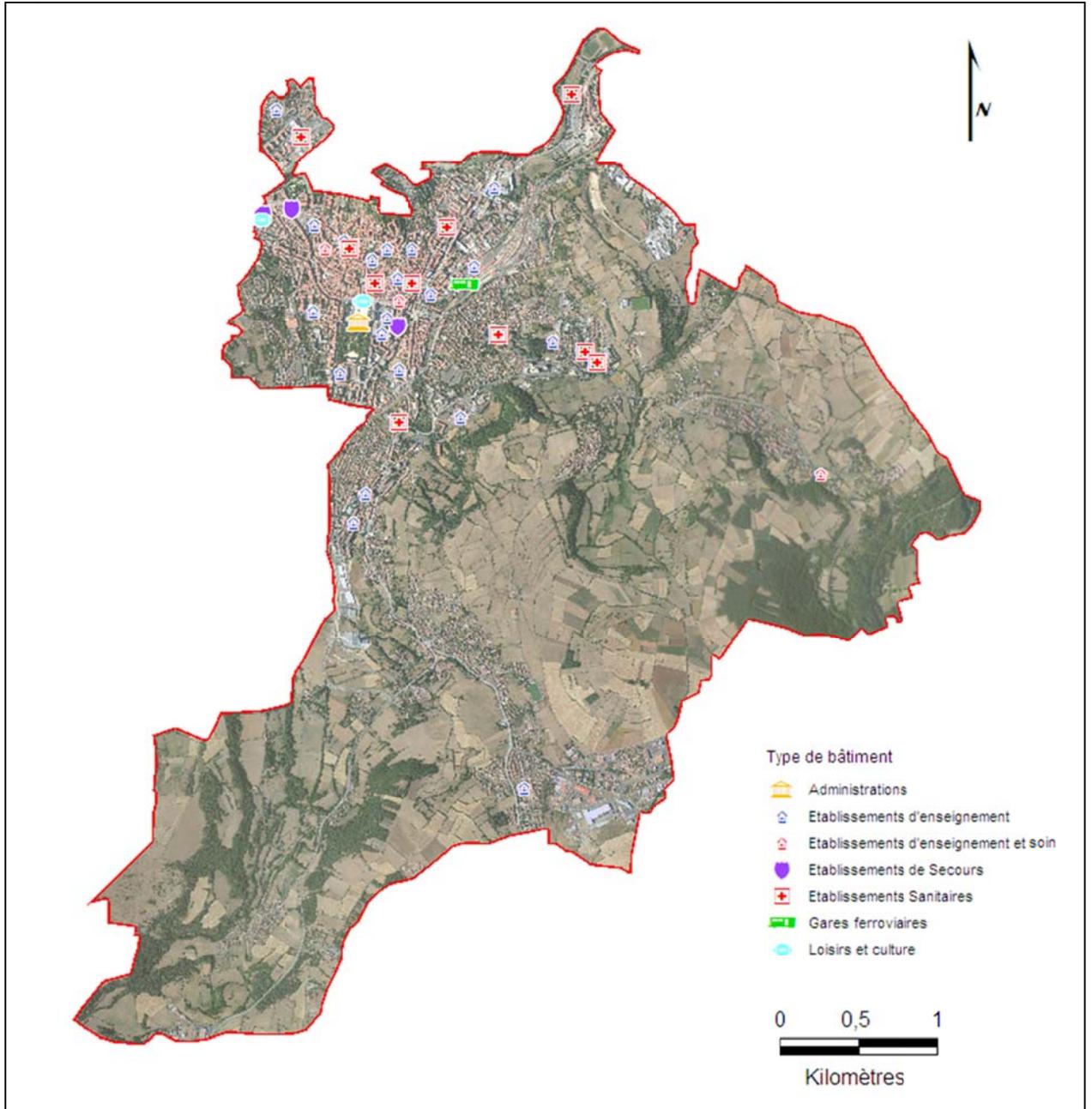


Figure 27 - Localisation des principaux bâtiments de catégorie d'importance III et IV recensés sur la commune du Puy-en-Velay (fond de carte : ortophotographie)

3. Pertinence d'un microzonage sismique dans l'optique de l'élaboration d'un PPR pour la commune du Puy-en-Velay

3.1. ALEA SISMIQUE REGIONAL

L'aléa sismique déterminé de façon forfaitaire est faible (accélération au rocher de 0.7 à 1.1 m/s²). De plus, une étude permettant de préciser l'aléa sismique régional au niveau de la commune du Puy-en-Velay (étude statistico-historique) confirme ce niveau d'aléa. Enfin, un inventaire de la sismicité locale a montré qu'il ne semble pas y avoir d'événements historiques ou instrumentaux majeurs qui n'auraient pas été pris en considération lors des études antérieures définissant l'aléa sismique à l'échelle régionale.

Ainsi, dans le cadre d'un microzonage sismique, les mouvements forfaitaires définis par le zonage réglementaire en vigueur pourront être utilisés comme mouvements de référence pour définir l'aléa sismique régional. **Il ne semble pas nécessaire à ce stade de mener une étude spécifique** (microzonage sismique de niveau B ou C).

D'autre part, et bien que nous ne disposions d'aucune information sur leur niveau d'activité, quelques failles sont répertoriées à proximité de la commune du Puy-en-Velay (au Nord et à la limite ouest du département de la Haute-Loire). Dans le cadre d'un éventuel microzonage sismique, il conviendrait d'étudier ces failles afin de déterminer leur potentiel sismogénique, ainsi que les potentialités de rupture en surface.

3.2. ALEA SISMIQUE LOCAL

Effets de site lithologiques : Environ 60 % de la commune du Puy-en-Velay et 70 % des zones urbanisées sont concernées. Treize types de formations pouvant potentiellement générer des effets de site sont identifiés sur l'ensemble du territoire. Etant donné que les sondages de la BSS disponibles sont peu nombreux, que les formations superficielles en place présentent une forte hétérogénéité ainsi qu'une grande variabilité géographique, des reconnaissances complémentaires (campagne géophysique dense, sondages, mesures en laboratoire) ainsi que des calculs numériques d'effets de site (microzonage sismique de niveau C) semblent nécessaires. L'avis du BRGM est ainsi de traiter les effets de site lithologiques sur la commune du Puy-en-Velay avec un niveau C, par la réalisation d'un microzonage sismique.

Effets de site topographiques : Quelques zones sont concernées. Elles sont principalement limitées aux bordures et aux crêtes des formations volcaniques, mis à part le dyke qui se situe au Nord de la commune. Etant donné que ces zones d'amplification topographique sont dans certains cas urbanisées (par exemple le dyke qui est à proximité du centre-ville), il conviendrait de les réétudier sur la base d'un MNT plus fin. L'avis du BRGM est qu'il serait ainsi souhaitable, si un microzonage sismique était réalisé sur la zone, de traiter les effets de site topographiques sur la commune du Puy-en-Velay avec un niveau B.

Mouvements de terrain : Quelques zones présentant une susceptibilité moyenne à forte aux mouvements de terrain sont identifiées. Elles se situent principalement au niveau des bordures des formations volcaniques, et affectent les zones d'extension principalement situées en dehors des zones urbanisées. Ainsi, une visite de terrain pourrait être nécessaire pour qu'un spécialiste expertise les risques de chutes de blocs et/ou de coulées de boue et identifie également les enjeux de la zone soumis à cet aléa. Cette vérification, qui correspondrait alors à un microzonage de niveau B, constituerait une étude conséquente étant donné l'étendue de la zone à considérer. Compte tenu de ces éléments, l'avis du BRGM est qu'il serait souhaitable, si un microzonage sismique était réalisé sur la zone, de traiter les mouvements de terrain sur la commune du Puy-en-Velay avec un niveau B.

Potentialité de liquéfaction : Environ 40 % du territoire et 60 % des zones urbanisées sont potentiellement concernées. Neuf types de formations pouvant être potentiellement liquéfiables sont identifiés sur l'ensemble de la commune. Avant toute chose, la profondeur de la nappe doit être évaluée au niveau de ces formations. Le contexte hydrogéologique de la zone étant complexe et les données disponibles de la BSS ne donnant pas accès à ce type d'information, on leur préférera des chroniques piézométriques qui donnent l'évolution du niveau de la nappe dans le temps. Dans le cas où aucune information ne serait disponible, des sondages superficiels complémentaires seront alors nécessaires dans toutes les formations potentiellement liquéfiables. Cependant, compte tenu du fait que le niveau d'aléa régional est relativement faible pour la commune du Puy-en-Velay, le niveau des accélérations estimées ne semble pas suffisant pour être susceptible de liquéfier localement les sols. Ainsi, il n'apparaît pas pertinent de prendre en compte cet aléa « liquéfaction » lors d'une étude de microzonage sismique.

3.3. VULNERABILITE DU BATI

Bâtiments de catégorie d'importance II : une étude statistique à partir des données recensées a été réalisée dans le cadre de ce pré-diagnostic (îlots IRIS et données statistiques sur le bâti), et peut ainsi être utilisée pour une étude préliminaire de vulnérabilité. Un zonage qualitatif de la présomption de vulnérabilité du bâti au risque sismique a été établi à partir de ces données et d'une visite de terrain. Ce zonage indique que la commune du Puy-en-Velay est globalement plus vulnérable au niveau des quartiers anciens du centre-ville (IRIS 105 et 107). Il convient cependant de noter que, pour une étude de vulnérabilité complète, des polygones plus petits que les IRIS devront être définis à l'issue de visites de terrain et/ou de l'étude d'orthophotographies. Ces polygones devront en particulier être homogènes en termes de date, de qualité et de mode de construction. Ceci représente un travail important. Ainsi, la commune du Puy-en-Velay ne semble pas présenter un bâti particulièrement vulnérable aux séismes justifiant une analyse spécifique de sa vulnérabilité dans le cadre d'un microzonage sismique.

Bâtiments de catégorie d'importance III et IV : à l'issue d'une étude préliminaire à partir de la liste des ERP de la commune, 46 bâtiments sont identifiés comme appartenant à la catégorie d'importance III et IV, selon la réglementation parasismique en vigueur. Ces bâtiments pourraient être pris en considération dans le cadre d'une étude de vulnérabilité associée à un microzonage sismique. Le volume de travail que cela représenterait est relativement important étant donné le nombre notable de bâtiments concernés. Des visites

de terrain peuvent permettre d'établir une classification sommaire (bâtiments ne nécessitant pas un renforcement étant donné les mouvements sismiques attendus, bâtiments à renforcer, bâtiments devant faire l'objet d'une étude spécifique). Pour les bâtiments stratégiques identifiés, soit moins d'une dizaine d'entre eux, une étude spécifique s'imposerait alors. Ces bâtiments sont principalement concentrés dans le centre-ville de la commune. L'étude spécifique doit consister en une visite de terrain approfondie et éventuellement une étude des plans de construction. Ce travail peut prendre plusieurs jours pour chaque bâtiment étudié. La présente étude consistait, pour les bâtiments de catégorie d'importance III et IV, en un recensement de premier ordre. Il ne nous est pas possible de nous exprimer sur leur vulnérabilité aux séismes, et sur la nécessité de la traiter dans le cadre d'un microzonage sismique.

Pour ces études de vulnérabilité, un microzonage sismique de niveau A, B ou C n'est pas défini car ces analyses ne font pas vraiment partie des études de microzonages sismiques au sens strict (Annexe 9).

3.4. CONCLUSION

Il ressort du pré-diagnostic de microzonage sismique de la commune du Puy-en-Velay que l'aléa sismique régional peut être évalué sur la base de mouvements forfaitaires. Cependant, l'activité des failles situées à proximité de la zone étudiée devra être vérifiée. En ce qui concerne les formations susceptibles de générer des effets de site lithologiques, il n'est pas possible de définir leurs homogénéités sur le territoire à cause du manque d'informations sur leurs épaisseurs. Des données BSS supplémentaires auraient été utiles. Du fait de ce manque de connaissances précises sur les formations sédimentaires en place, il apparaît ainsi nécessaire de procéder à la définition complète de l'aléa sismique local par la réalisation d'études et de mesures complémentaires (étude de niveau C). En effet, les formations susceptibles de générer des effets de site lithologiques étant très hétérogènes sur le territoire de la zone étudiée, avec une forte variabilité géographique, elles devraient être caractérisées de manière spécifique, incluant le recours à des reconnaissances géophysiques ainsi qu'à des simulations numériques. Certaines zones à effets de sites topographiques ont pu être mises en évidence. Elles devraient être réétudiées sur la base d'un MNT plus fin. Concernant les mouvements de terrain, bien qu'ils affectent des zones d'extension principalement situées en dehors des zones urbanisées, il conviendra de les étudier spécifiquement (étude de niveau B). Enfin, malgré la présence de formations liquéfiables et d'une nappe sub-affleurante dans certaines parties du territoire (notamment au niveau de zones urbaines), le niveau d'aléa régional est bien inférieur à celui susceptible de générer de tels effets. Il n'apparaît donc pas pertinent de prendre en compte cet item dans le cadre d'un microzonage sismique.

En ce qui concerne la vulnérabilité du bâti, il est difficile de se prononcer sur la nécessité ou non de procéder à des études spécifiques à mener dans le cadre d'un microzonage sismique, lesquelles s'avèreraient être relativement lourdes. Pour le bâti courant, des visites de terrain seraient souhaitables dans les zones les plus vulnérables. Elles permettraient en effet de définir des polygones plus petits. Cependant, cette analyse spécifique ne paraît pas indispensable. Pour les bâtis de catégorie d'importance III et IV,

dont la vulnérabilité n'a pas été étudiée, il n'est pas possible de savoir s'il est nécessaire de traiter cet item dans le cadre d'un microzonage sismique.

Au final, l'aléa sismique régional et local semblent globalement bien caractérisés. Un éventuel microzonage sismique concernerait uniquement quelques items liés à des phénomènes directs (effets de site topographiques et lithologiques) et induits (mouvements de terrains), dans des zones limitées (peu de zones urbanisées sont concernées par les effets de site topographiques et les mouvements de terrain).

Ainsi, un microzonage sismique n'est pas préconisé pour la commune du Puy-en-Velay.

Ces conclusions sont synthétisées dans le tableau présenté en Annexe 9.

4. Scénario de dommages de niveau 0 pour la commune du Puy-en-Velay

Dans le but de valoriser le pré-diagnostic effectué sur la commune du Puy-en-Velay, un scénario de niveau 0 a été réalisé. Il va permettre d'évaluer de manière très globale le comportement des bâtiments lors d'une sollicitation sismique. Pour cela, les informations relatives aux aléas et à la vulnérabilité sont croisées.

4.1. METHODOLOGIE

Les scénarios de risque sismique conduisant à l'évaluation des conséquences dommageables d'un séisme simulé sont un outil précieux d'évaluation du risque sismique au niveau du bâti existant.

Les trois composantes nécessaires à l'établissement d'un scénario de risque sismique (de niveau 0, 1 ou 2) sont :

- l'aléa ou le séisme de scénario caractérisant l'agression sismique ;
- la valeur des éléments exposés caractérisant les enjeux ;
- la vulnérabilité des éléments exposés.

Le risque (R) est par définition la convolution de l'aléa A, de la vulnérabilité V et de la valeur de l'élément exposé E : $R = A.V.E.$

Cette équation théorique se base sur les définitions données lors de la Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles [DIPCN92] :

- Risque : « Espérance mathématique de pertes en vies humaines, blessés, dommages aux biens et atteinte à l'activité économique au cours d'une période de référence et dans une région donnée, pour un aléa particulier » ;
- Aléa : « Evénement menaçant ou probabilité d'occurrence dans une région et au cours d'une période donnée, d'un phénomène pouvant engendrer des dommages » ;
- Eléments exposés ou éléments à risque : « Population, constructions et ouvrages de génie civil, activités économiques, services et infrastructures publiques, etc., exposés à un aléa ». Un élément exposé ayant une valeur constitue un enjeu ;
- Vulnérabilité : « Degré de perte (de 0 % à 100 %) d'un élément à risque résultant d'un phénomène susceptible d'engendrer des victimes et des dommages matériels ».

Cette méthodologie est mise en œuvre pour la commune du Puy-en-Velay afin d'estimer le risque sismique basé sur les résultats du pré-diagnostic présenté précédemment. Les enjeux traités dans le cadre de ce rapport sont les bâtiments de classe II à usage d'habitation (selon les Eurocode 8). Le logiciel utilisé pour l'analyse du risque sismique de

la commune du Puy-en-Velay est « Armagedom[®] », logiciel développé par le BRGM et conduisant à simuler les conséquences de phénomènes naturels avec l'objectif d'évaluer les possibles dégâts occasionnés.

Les résultats obtenus à l'aide d'Armagedom[®] permettent de mettre en évidence une estimation préliminaire des dégâts sur le bâti courant, et ce à partir des résultats de l'étude de pré-diagnostic présentée précédemment.

4.2. PARAMETRES UTILISES POUR LE SCENARIO

Etant donné que la commune du Puy-en-Velay est située en zone de sismicité faible (selon le zonage sismique réglementaire en vigueur), une accélération de $1,1 \text{ m/s}^2$ a été choisie pour définir le niveau d'aléa qui sera par la suite retenu pour le scénario. Ensuite, en tenant compte des effets de site lithologiques (coefficient d'amplification forfaitaire de 1,4) et topographiques (coefficient d'amplification forfaitaire de 1,4), des intensités de l'ordre de VI à VII ont pu être obtenues sur l'ensemble du territoire (Figure 28). Ainsi, d'après l'échelle EMS98 des intensités, des dégâts légers à modérés sont attendus.

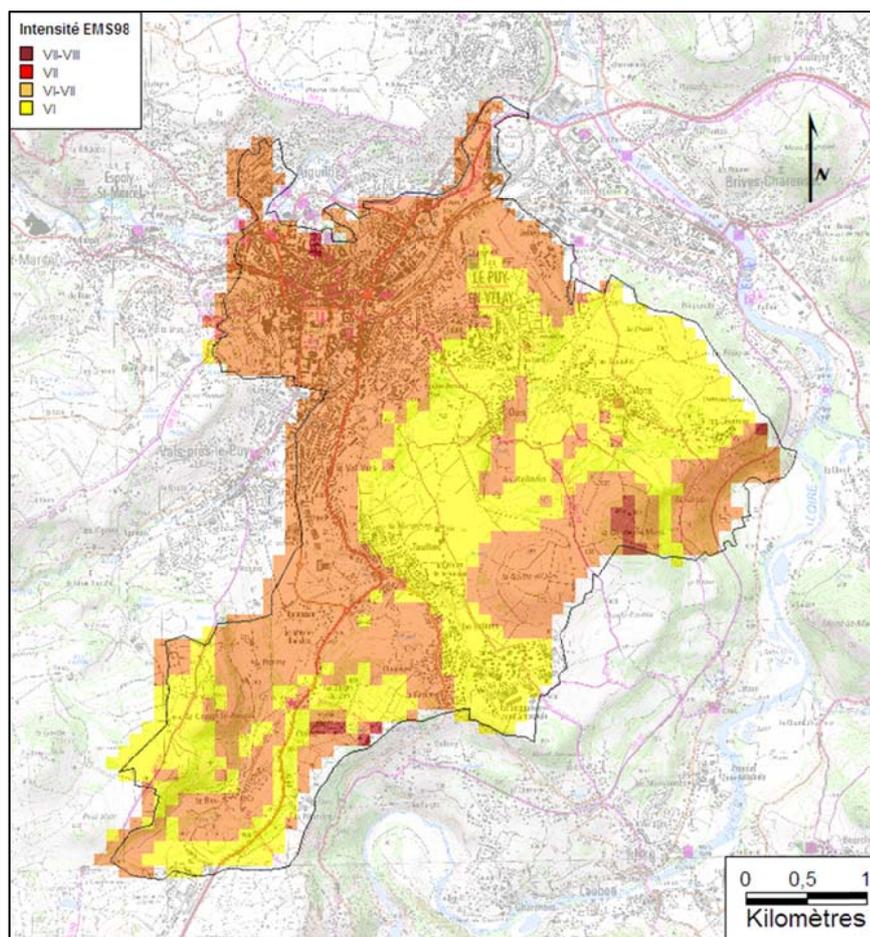


Figure 28 - Mouvements sismiques retenus dans le cadre du scénario établi dans la présente étude (intensités EMS98)

4.3. VULNERABILITE PHYSIQUE DES OUVRAGES

Le traitement de la vulnérabilité et des fonctions d'endommagement utilisé pour ces scénarios de risque est celui-ci des scénarios de risque de niveau 0 (Sedan *et al.*, 2008).

4.3.1. Classes de vulnérabilité EMS98

L'échelle d'intensité EMS98 a été établie sur la base du retour d'expérience, en analysant de manière statistique le comportement de différents types de bâtiments ayant subi des séismes dans la période historique.

Le concept de vulnérabilité est fondamental pour la construction des échelles modernes d'intensité. La violence de la secousse déterminante pour la destruction d'une chaumière en briques de pisé mal construite n'est pas la même que celle qui entraîne la destruction d'un immeuble de bureaux massif. Ces distinctions de comportement doivent faire l'objet d'une différenciation.

L'EMS98 a introduit les notions de conception des structures, en distinguant le degré de conception parasismique (sans, moyen, bon) pour les structures en béton, et les systèmes de renforcement employés pour les structures en maçonnerie. La typologie des EMS98 est présentée dans la Figure 29 où, pour chaque type de construction, est attribuée une classe de vulnérabilité la plus probable (avec son incertitude). Il s'agit donc d'un tableau à double entrée avec :

- 1) une typologie simplifiée des bâtiments : les types de bâtiments sont classés en fonction de leurs groupes principaux (maçonnerie, béton armé, acier et bois) ;
- 2) une classification de niveau de vulnérabilité en six classes, de la plus vulnérable à la plus résistante.

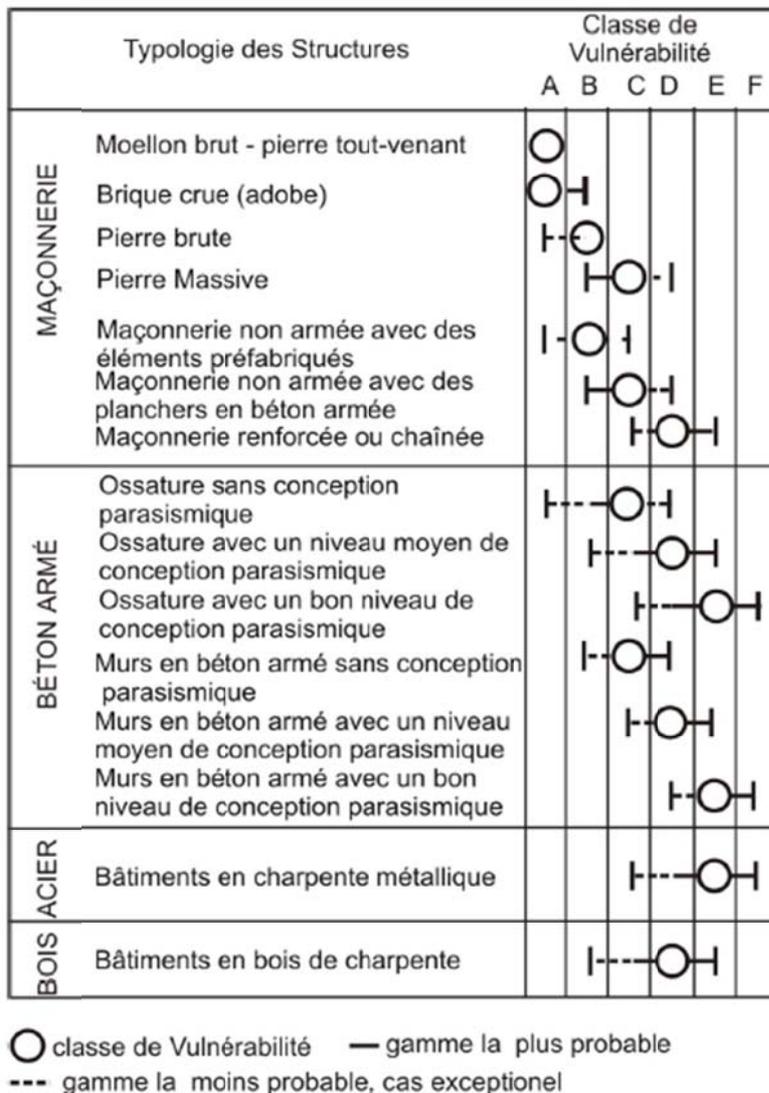


Figure 29 - Typologie des bâtiments et classes de vulnérabilité de l'échelle EMS98

Connaissant la classe de vulnérabilité (A à F) à laquelle se rapporte le type de bâti considéré, un indice de vulnérabilité, V_i , correspondant sera calculé à l'aide des fonctions d'appartenance proposées par la méthode Risk-UE de niveau 1. L'appartenance d'un bâtiment à une classe de vulnérabilité spécifique est définie par un indice de vulnérabilité. Les valeurs d'indice sont arbitraires car elles représentent seulement un score qui quantifie le comportement sismique d'un bâtiment. L'indice de vulnérabilité varie entre 0 et 1. Les valeurs proches de 1 représentent les bâtiments les plus vulnérables. Les valeurs proches de 0 sont des bâtiments ayant un niveau de construction parasismique élevé.

On se reportera à l'Annexe 1 pour des compléments sur la méthodologie utilisée.

4.3.2. Echelle de dommages

En parallèle, l'échelle EMS98 définit aussi 5 degrés de dommages aux constructions (Figure 30) :

- Degré 1 (D1) : Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structurel, légers dégâts non structurels) ;
- Degré 2 (D2) : Dégâts modérés (dégâts structurels légers, dégâts non structurels modérés) ;
- Degré 3 (D3) : Dégâts sensibles à importants (dommages structurels modérés, dommages non structurels importants) ;
- Degré 4 (D4) : Dégâts très importants (dégâts structurels importants, dégâts non structurels très importants) ;
- Degré 5 (D5) : Destruction (dégâts structurels très importants).

Il s'agit d'une échelle purement qualitative, qui décrit la nature des dommages observables. On se reportera à l'Annexe 1 pour plus de précisions sur cette échelle.

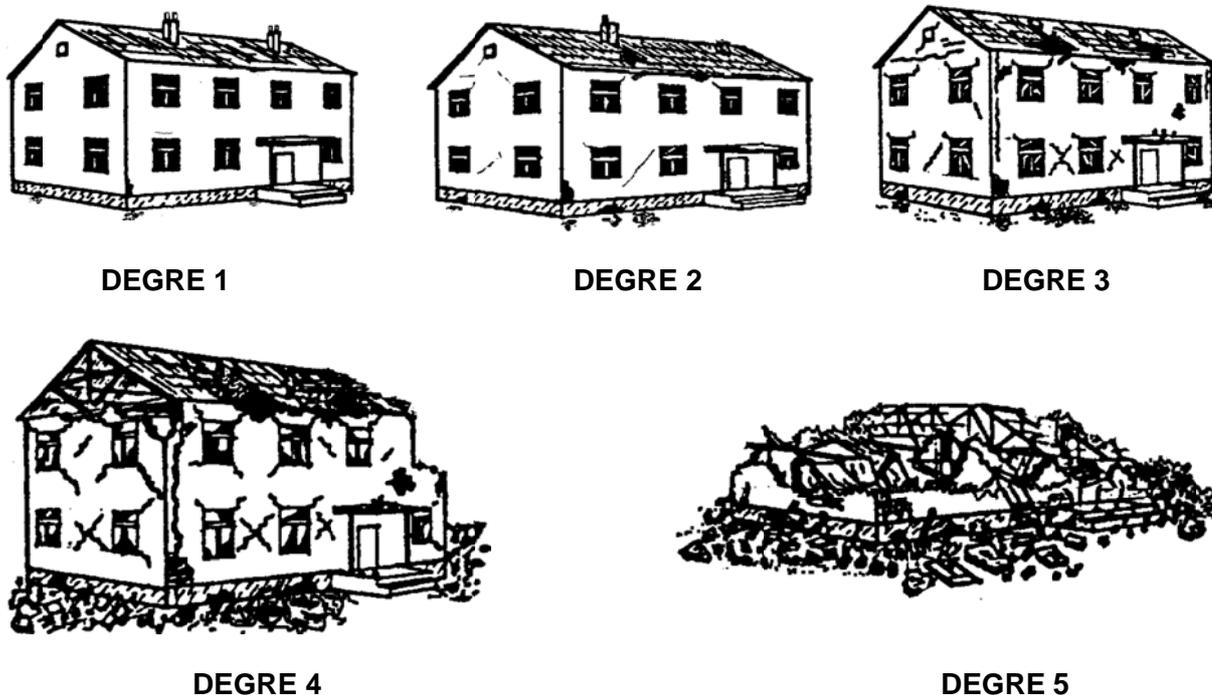


Figure 30 - Classification des dégâts selon l'Echelle Macrosismique Européenne

4.4. NIVEAU DE PRECISION DES SIMULATIONS REALISEES DANS LE CADRE DE CETTE ETUDE

Un scénario de dommages peut être réalisé de façon plus ou moins fine. Sedan *et al.* (2008) précisent ce qui relève d'un scénario de niveau 0, 1 ou 2, selon un degré de précision croissant. Dans le cadre de la présente étude, l'estimation du mouvement sismique de référence, qui prend en compte l'aléa régional mais aussi local, peut être assimilé aux données d'entrée d'un scénario de niveau 1. L'analyse de la vulnérabilité se situerait plutôt entre un scénario de niveau 0 (utilisation uniquement de données statistiques et les îlots IRIS constituent l'unité cartographique de base) et un niveau 1 (détermination sur le terrain de zones de typologies homogènes, à l'échelle de quartiers, qui constituent l'unité cartographique de base). Cette analyse a en effet principalement bénéficié de l'utilisation des statistiques et a été réalisée à l'échelle des îlots IRIS, mais elle a été par ailleurs accompagnée d'une visite de terrain qui a servi à établir une typologie du bâti local.

Etant donné que la présente étude est réalisée dans le but de valoriser des données obtenues dans le pré-diagnostic, et à des fins de communication, les scénarios réalisés et les résultats obtenus ne devront pas explicitement être identifiés comme étant strictement de niveaux 0 ou 1. Il faut bien garder en mémoire que ce type d'analyse présente des incertitudes importantes et que **les résultats obtenus doivent être considérés d'une façon globale**. Ainsi, les résultats pour chaque îlot et pour chaque degré de dommages (D0 à D5 au sens de l'EMS98, voir ci-dessus) ne seront pas présentés. La restitution sera réalisée à l'échelle de la commune et uniquement selon deux classes de dommages : d'une part les « bâtiments fortement endommagés ou détruits », ce qui correspond globalement aux degrés D4 et D5 au sens de l'EMS98, et d'autre part les « bâtiments moyennement endommagés ». Cette seconde catégorie correspond plus ou moins aux degrés de dommages D2 et D3.

4.5. RESULTATS

Les résultats du scénario sur la zone d'étude sont exprimés en pourcentage de bâtiments fortement endommagés (Figure 31) et modérément endommagés (Figure 32).

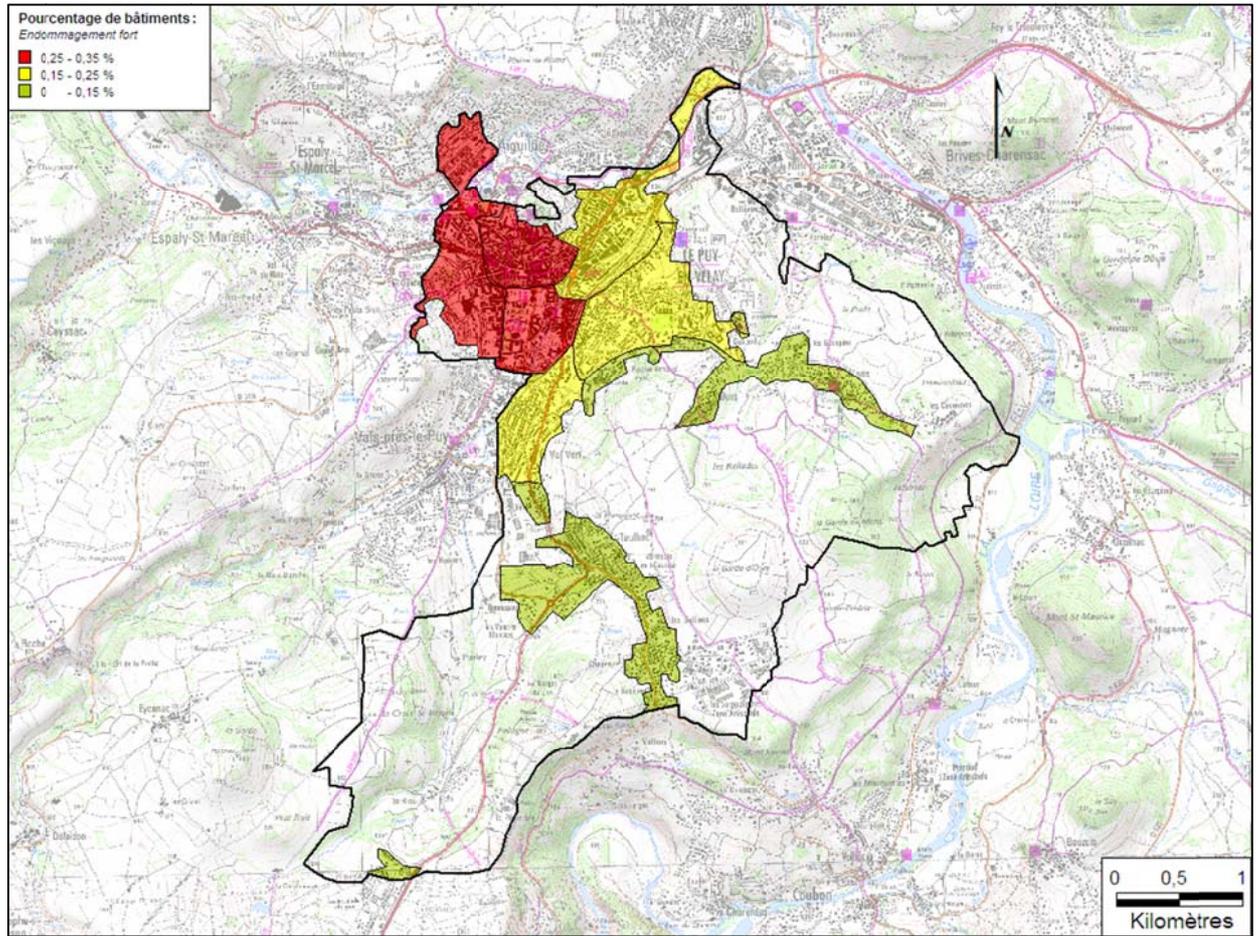


Figure 31 - Pourcentage de bâtiments fortement endommagés

Ainsi, un maximum de 0,25 à 0,35 % des bâtiments de chaque zone peuvent être assimilés à ce type d'endommagement (bâtiments « fortement endommagés »). Ce sont notamment les IRIS 105 (Breuil-Carmes), 106 (Carnot-Capucins) et 107 (centre historique) qui sont concernés. En tout, sur l'ensemble de la commune, seuls quelques bâtiments pourraient être fortement endommagés.

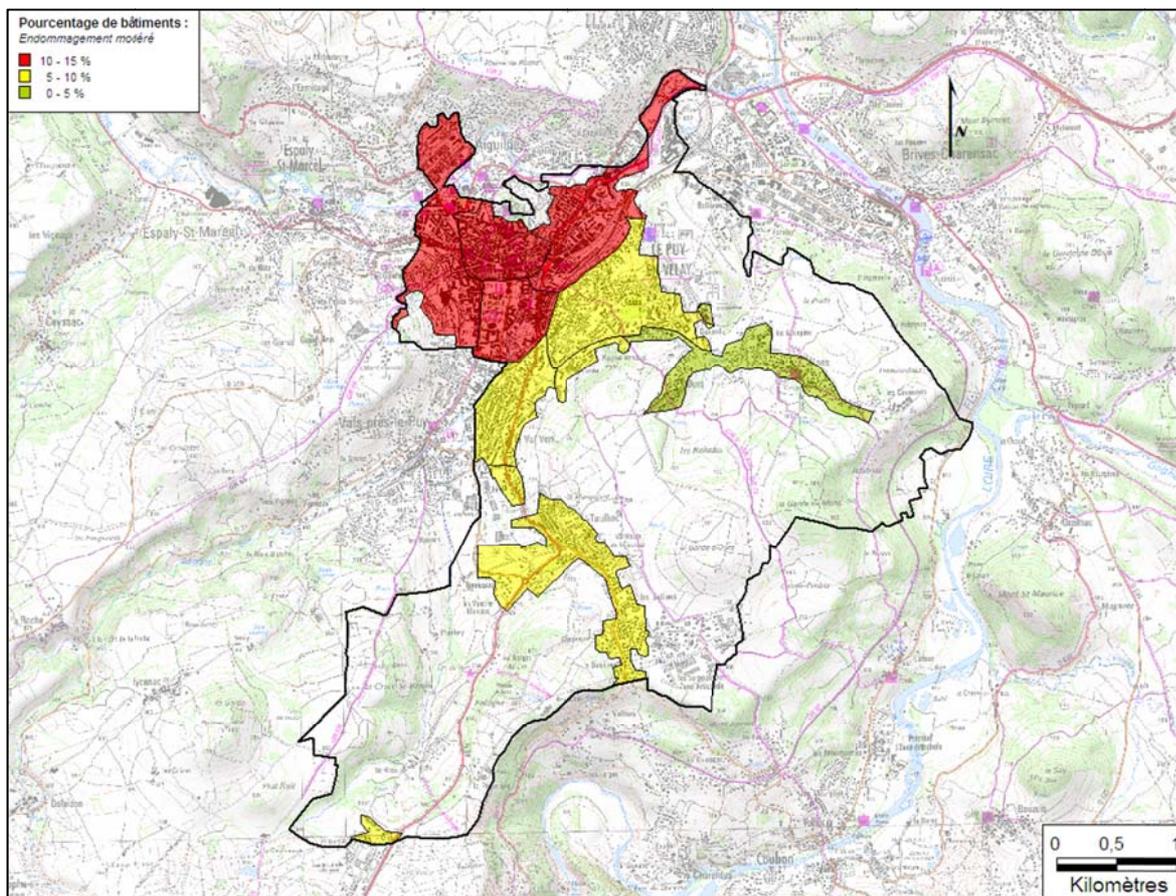


Figure 32 - Pourcentage de bâtiments en endommagement modéré

En revanche, les dégâts modérés seraient plus généralisés (Figure 32). En effet, pour certaines zones de la commune, 10 à 15 % des bâtiments pourraient être soumis à ce type d'endommagement (« endommagement modéré »). Cela concerne principalement les IRIS 105 (Breuil-Carmes), 106 (Carnot-Capucins), 107 (centre historique) et 108 (Saint-Jean République), c'est-à-dire le centre-ville. A l'issue de ce scénario, près de 400 bâtiments présenteraient des dommages modérés sur l'ensemble du territoire.

De plus, afin de mieux comprendre ces résultats, ils sont représentés sur la Figure 34 et la Figure 33 sous forme de grille de 250 mètres. Cela permet de s'affranchir des superficies des zones délimitées lors de l'étude de la vulnérabilité et de mettre en valeur les dommages plus particulièrement liés aux effets de site. Il en ressort que le centre historique du Puy-en-Velay pourrait présenter des endommagements modérés pour environ une centaine de ses bâtiments. Une vision en pourcentage permet d'observer que la zone du centre-ville serait en effet la plus impactée car coïncident géographiquement une zone à effet de site lithologique et une forte concentration de bâtiments anciens plus vulnérables. En revanche, la zone au Sud-Est de la commune, moins densément peuplée, de construction plus récente en général et située sur des formations géologiques sans effet de site, présente des taux d'endommagement modérés nettement moindres. La zone à effet de site lithologique de Taulhac Val Vert se situerait entre ces deux situations extrêmes

(zone à effet de site lithologique mais constructions plutôt récentes et donc moins vulnérables).

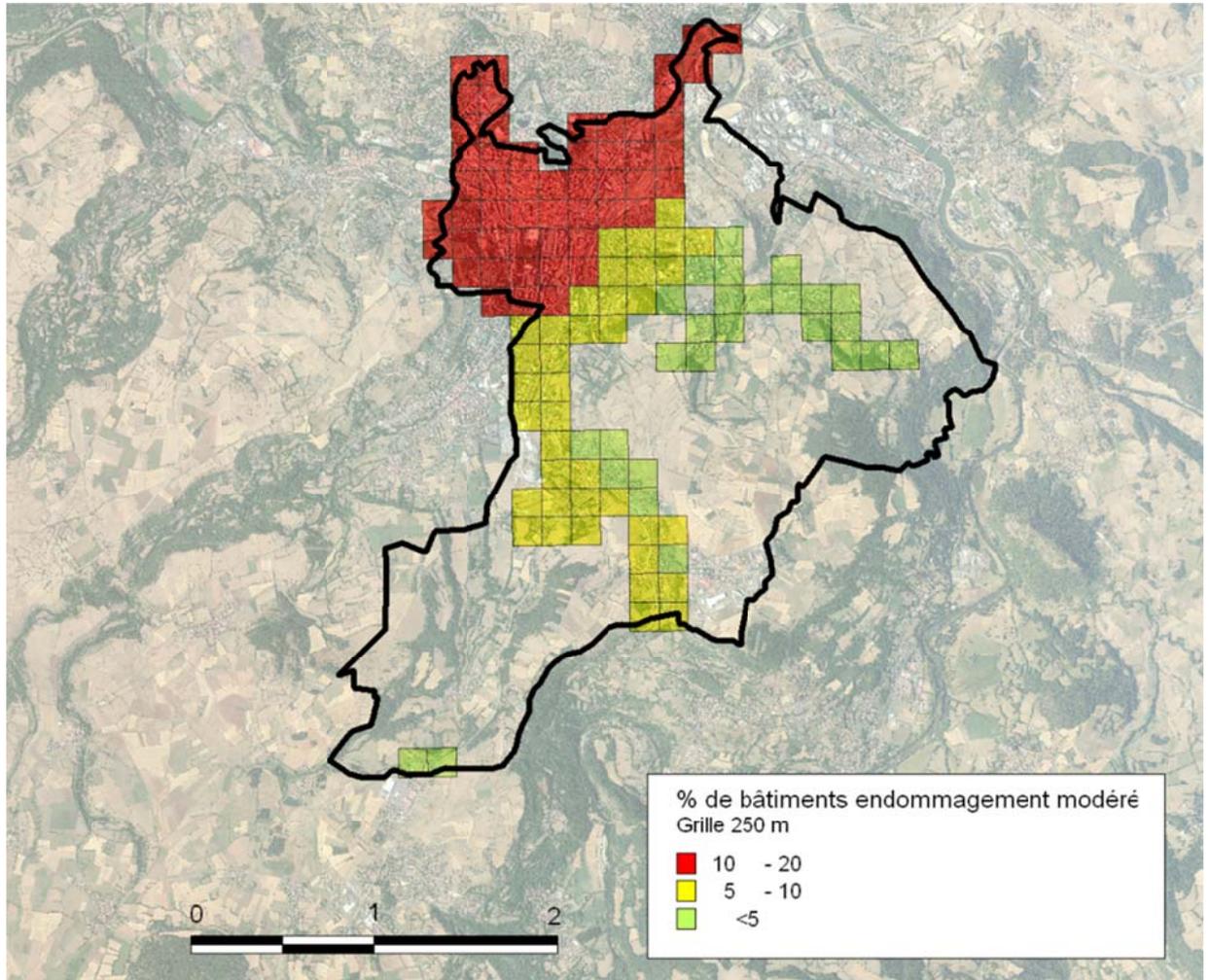


Figure 33 - Pourcentage de bâtiments en endommagement modéré par grille de 250 m

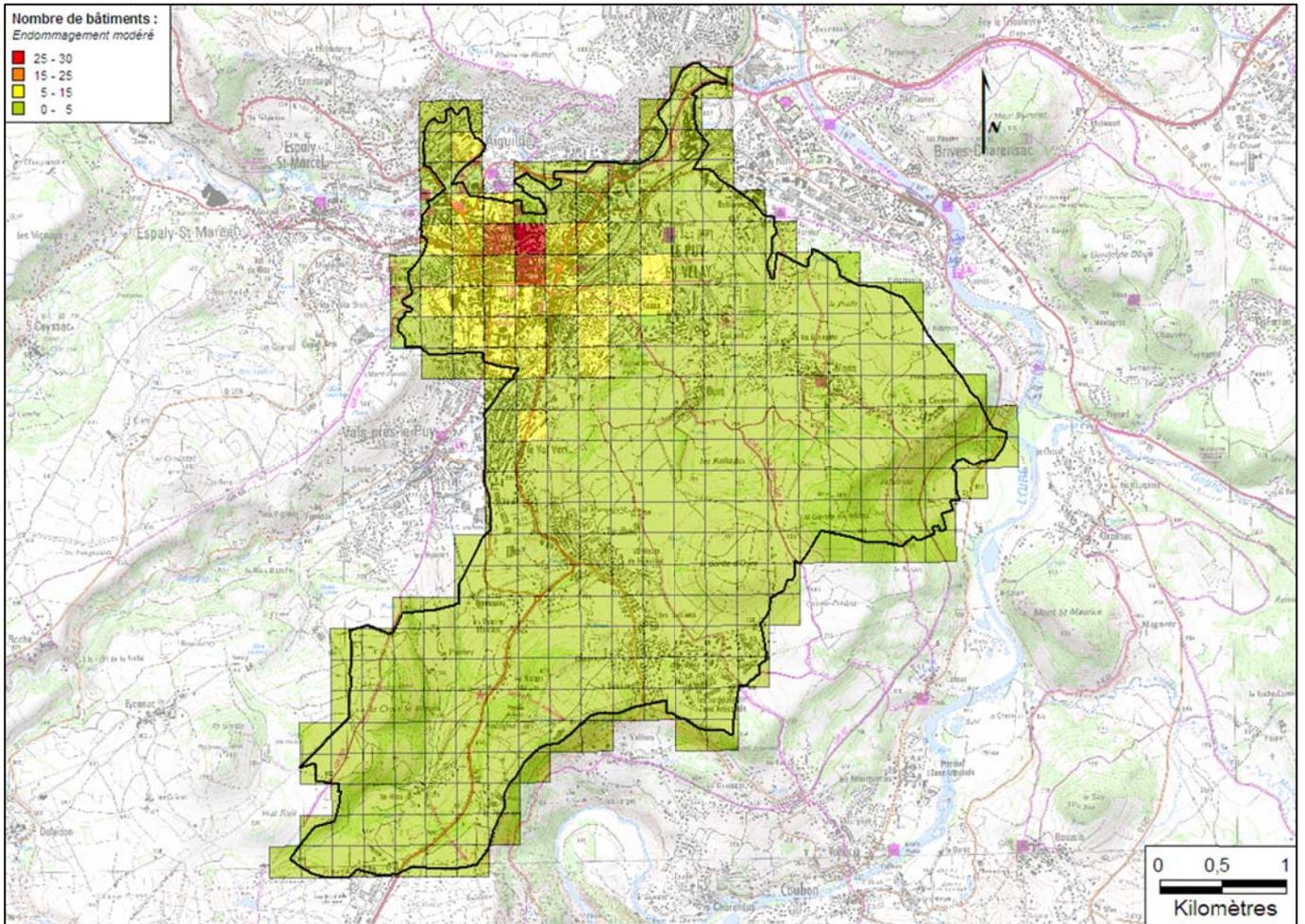


Figure 34 - Nombre de bâtiments en endommagement modéré par grille de 250 m

4.6. DOMMAGES REELS GENERES PAR UN SEISME MODERE

Pour avoir une idée plus précise de ces dommages, quelques images des dégâts causés par le séisme de Lorca (Espagne, mai 2011) sont présentées ci-dessous (Figure 35 et Figure 36). En effet, ce genre de séisme pourrait très bien se produire en Auvergne.



Figure 35 - Dégâts modérés occasionnés par le séisme de Lorca (Espagne, 11 mai 2011 ; photos BRGM)

- fissure verticale d'un bâtiment en maçonnerie (gauche)
- défaillance d'un mur de revêtement d'un bâtiment en béton armé (droite)



Figure 36 - Dégâts majeurs occasionnés par le séisme de Lorca (Espagne, 11 mai 2011 ; photos BRGM)

- effondrement partiel d'un bâtiment en maçonnerie (gauche)
- effondrement d'un bâtiment en béton armé (droite)

5. Conclusions

Les conclusions concernant l'opportunité d'un microzonage sismique pour la commune du Puy-en-Velay sont développées au paragraphe 3.4 et dans le tableau de synthèse en Annexe 9.

Il en ressort qu'au final, l'aléa sismique régional et l'aléa local semblent globalement bien caractérisés. Un éventuel microzonage sismique concernerait uniquement quelques items liés à des phénomènes directs (effets de site topographiques et lithologiques) et induits (mouvements de terrains), dans des zones limitées (peu de zones urbanisées sont concernées par les effets de site topographiques et les mouvements de terrain).

D'autre part, une première analyse indique que la vulnérabilité du bâti est globalement plus importante au niveau des quartiers anciens du centre-ville (IRIS 105 et 107). Même si les moyens mis en œuvre ne permettent pas de se prononcer sur la nécessité de prendre en compte la vulnérabilité des bâtiments, la commune du Puy-en-Velay ne semble pas présenter un bâti particulièrement vulnérable aux séismes, justifiant une analyse spécifique de sa vulnérabilité dans le cadre d'un microzonage sismique.

Ainsi, une étude de microzonage sismique n'est pas préconisée pour ce territoire.

Le scénario de risque sismique de niveau 0, réalisé sur le territoire de la commune du Puy-en-Velay dans le but de valoriser les données obtenues dans le pré-diagnostic et à des fins de communication, prend en compte les effets de site lithologiques, topographiques et la vulnérabilité du bâti courant appréhendée de façon statistique. Les intensités obtenues pour ce scénario varient entre VI et VII.

A ce niveau d'intensité sismique, l'endommagement fort serait donc très rare et ponctuel et, en revanche, l'endommagement modéré (chutes de cheminées et d'éléments non structuraux, lézardes) pourrait atteindre un pourcentage relativement important (entre 10 et 15 %) de bâtiments. La zone où les taux d'endommagement modéré seraient les plus importants est le centre-ville et le centre historique du Puy-en-Velay car les bâtiments les plus vulnérables (construits majoritairement en maçonnerie à l'ancienne) coïncident géographiquement avec une zone à possible effet de site lithologique.

Le secteur au Sud-Est de la commune (îlot IRIS 102 Zone verte Ours-Mon) serait le moins impacté. En effet, cette zone est située sur le rocher et ce sont pour la plupart des cités d'habitat collectif ou des lotissements, moins vulnérables que les structures anciennes.

6. Bibliographie

AFNOR (1995) - Règles de construction parasismique : règles PS applicables aux bâtiments, dites règles PS92. *AFNOR, Paris, norme française NF P 06-013.*

Atkinson G.M., Sonley E. (2000) - Empirical relationships between Modified Mercalli Intensity and Response Spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.90 (2), pp.537-544.

Mazabraud Y., Béthoux N., Guilbert J., Bellier O. (2005) - Evidence for short-scale stress field variations within intraplate central-western France. *Geophysical Journal International*, vol.160, pp. 161-178.

NF En 1998-1 (2005) - Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments. *AFNOR, Paris, norme française P06-030-1.*

Prognon F., Chèvremont P., Rocher P., Nehlig P., Jacques E. (2009) - Carte géologique harmonisée du département de la Haute-Loire (43). Rapport final BRGM/RP-56860-FR.

Rey J., Auclair S., Bès de Berc S., Negulescu C., Vandromme R., Conil P., Rocher P., Dugrillon D., Rivet F., Renault O., Picot J.C., Rouzaire D. (2009) - Pré-diagnostic sur les microzonages sismiques pour des communes d'importance variable. Rapport final. BRGM/RP-57129-FR.

Rey J., Auclair S., Lambert J., Montfort-Climent D., Vanoudheusden E. (2010) - Impact du séisme de Limagne de 1490 sur le bâti courant de la ville de Clermont-Ferrand. Rapport BRGM/RP-59153-FR.

Rey J., Dewez T., avec la collaboration de J. Lambert, (2008) - Carte de l'aléa sismique par l'approche statistico-historique. Rapport final. Rapport BRGM/RP-54983-FR.

Sedan O., Terrier M., Negulescu C, Winter T., Roullé A., Douglas J., Rohmer J., Bès de Berc S., De Martin F., Arnal C., Dewez T., Fontaine M. (2008) - Scénario départemental de risque sismique - Méthodologie et processus de réalisation. Rapport BRGM/RP-55415-FR.

Wald D. J., Quitoriano V., Heaton T. H., Kanamori H. (1999) - Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California. *Earthquake Spectra* 15, 557-564.

Annexe 1 - Méthodes utilisées pour l'estimation de la vulnérabilité physique des ouvrages

Fonctions d'appartenance

Les fonctions d'appartenance des six classes de vulnérabilité EMS98 ont une valeur $\chi = 1$ (plausible) et une variation linéaire dans l'intervalle possible, définissant ainsi la transition entre deux classes adjacentes (cf. Figure 37).

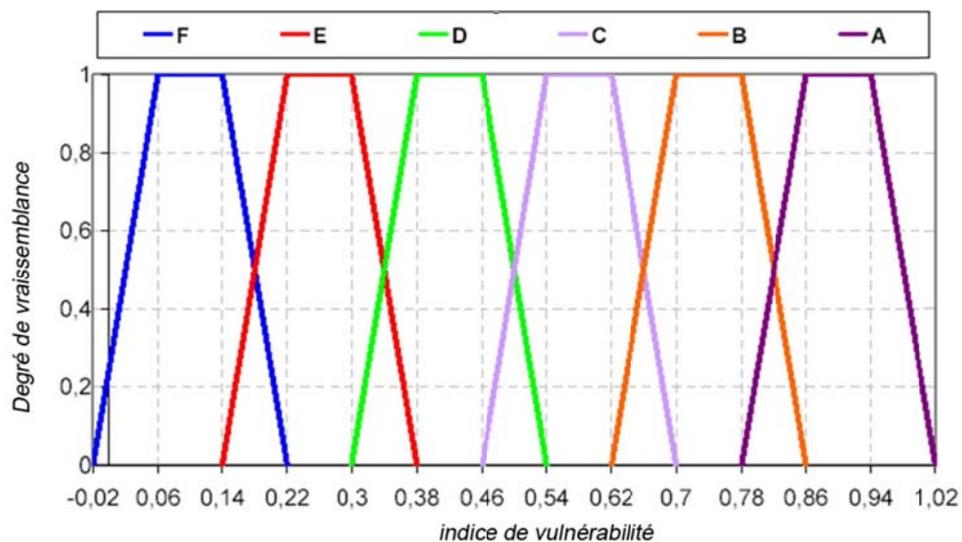


Figure 37 - Fonctions d'appartenance des différents indices de vulnérabilité

Fonctions de vulnérabilité

La méthode RISK-UE de niveau 1 définit des fonctions de vulnérabilité moyenne semi empiriques qui corrélient le niveau de dommage moyen μ_D avec l'intensité macrosismique I et l'indice de vulnérabilité V_i . Ces fonctions sont définies pour les valeurs discrètes des matrices de probabilité de dommage (cf. Figure 16). μ_D est défini comme suit :

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

Pour calculer une matrice de probabilité de dommage continue pour chaque classe de vulnérabilité selon la formule, une distribution bêta est utilisée :

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

$$\text{CDF: } P_{\beta}(x) = \int_a^x p_{\beta}(\varepsilon) d\varepsilon$$

avec :

- a, b, t et q : paramètres de distribution
- x : variable continue variant entre a et b
- Γ : fonction gamma

Les paramètres de la distribution bêta sont corrélés avec le niveau de dommage moyen μ_D comme suit :

$$q = t(0.007\mu_D^3 - 0.052\mu_D^2 + 0.2875\mu_D)$$

Le paramètre t affecte une dispersion à la distribution. Si t = 8 est utilisé, la distribution bêta est très similaire à une distribution binomiale. Afin d'utiliser la distribution bêta, il est nécessaire de se référer au niveau de dommage D (variable discrète) caractérisé par 5 niveaux de dommage plus le niveau de dommage zéro (i.e. absence de dommage). Il est conseillé d'assigner la valeur 0 au paramètre a et la valeur 6 au paramètre b (Lagomarsino *et al.* 2006).

Echelle de dommages EMS98

Une échelle des dégâts très simple regrouperait tous les dégâts aux bâtiments d'un type particulier indépendamment de la résistance du bâtiment endommagé. A l'autre extrême, une échelle très détaillée peut être imaginée dans laquelle la connaissance des paramètres techniques de bâtiment serait nécessaire pour déterminer le séisme qui a causé les dégâts. La première échelle serait très simple à utiliser mais très imprécise. Au contraire, la deuxième échelle serait précise mais inutilisable dans la pratique. L'Echelle Macrosismique Européenne cherche à présenter un compromis entre ces deux extrêmes. Elle est basée sur une différenciation simple de la résistance des bâtiments aux séismes liée à la vulnérabilité permettant de différencier la réponse des bâtiments aux agressions sismiques.

L'échelle de dégâts EMS98 prend en compte le fait que les différentes typologies de structures réagissent de manières différentes vis-à-vis des séismes et présentent des

défaillances diverses en proposant des mesures séparées pour les constructions en maçonnerie et les bâtiments en béton armé.

Les degrés des dégâts, classés de 1 à 5, représentent également un compromis. Ils ne représentent qu'approximativement l'augmentation de la force de secousse sismique. Il est à noter que dans le cas particulier des structures avec une conception parasismique, la progression des dégâts peut ne pas être linéairement croissante. Ceci peut s'expliquer compte tenu des principes de conception relatifs aux performances des structures calculées aux différents niveaux d'intensité du séisme de dimensionnement. La Figure 38 présente la classification des dégâts selon l'échelle EMS98. Dans la pratique, il n'est cependant pas toujours facile de classer un bâtiment endommagé dans une seule classe.

Niveau de dommage	Maçonnerie	Béton armé
D 1: Dégâts léger négligeable		
D 2: Dégâts modérés		
D 3 : Dégâts sensibles à importants		
D 4 : Dégâts très importants		
D 5 : Destruction		

Figure 38 - Classification des dégâts selon l'Echelle Macrosismique Européenne pour les structures en maçonnerie et en béton armé

Annexe 2 - Zonage sismique réglementaire

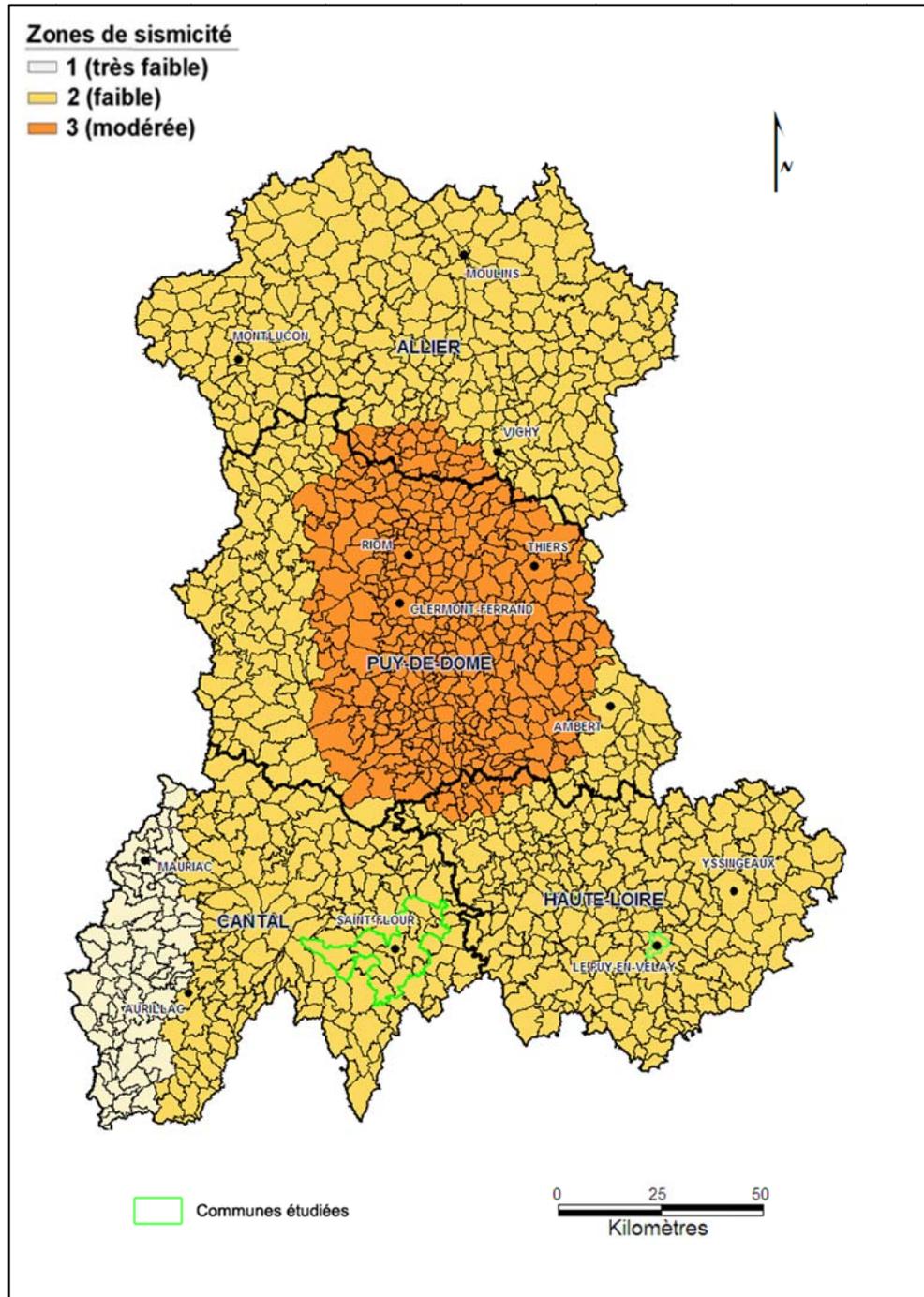
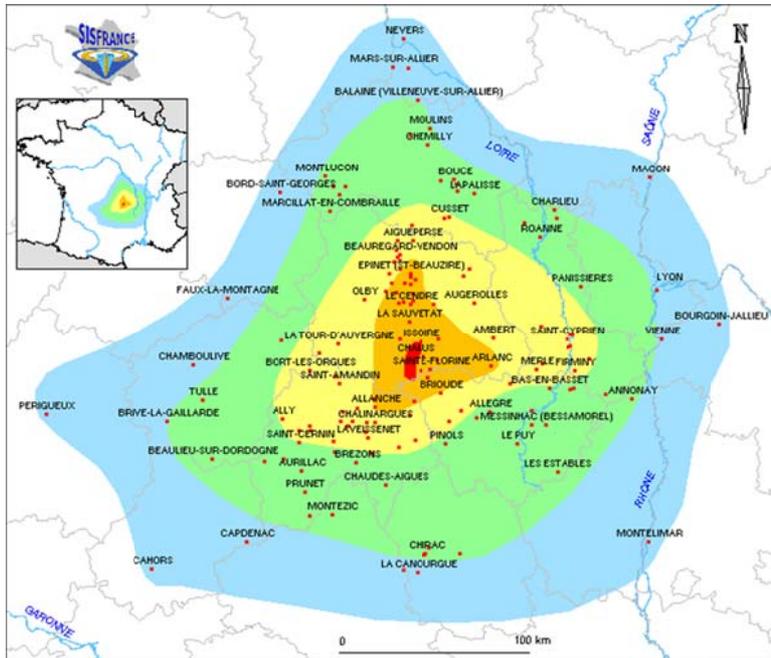
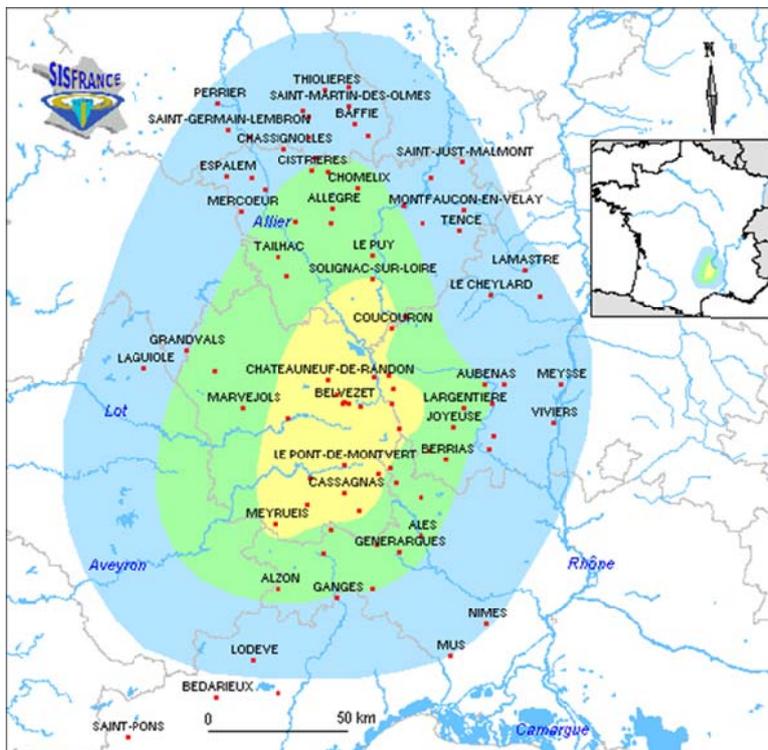


Figure 39 - Zonage sismique réglementaire en vigueur depuis le 1^{er} mai 2011 en région Auvergne

Annexe 3 - Cartes des isoséistes de séismes ressentis dans la région du Puy-en-Velay



Carte des isoséistes du séisme du 26 août 1892



Carte des isoséistes du séisme du 17 janvier 1924

)

icés

reuses

éisme

Annexe 4 - Articles relatant des événements sismiques dans la région du Puy-en-Velay

LE PUY

Un « grand tremblement de terre » survint encore le « mardi matin à une heure après minuit du lundi que c'estoit le seizième jour du mois de septembre audist an 1631. » Oyez plutôt Jacmon :

« Arrivé là, comme dict est, la nuit, et dura demy-cart de heure que toute la terre tranbla, les arbres, murailles et maisons, que esvelha les andormis et balha une telle espovante au peuple que l'on tranblet de grand peur. Cella arriva en Aulvergnie, Viverés, Forest, Gevoldent et Velley et autres provinces, et qu'il fesoit tellement esbranler les bastiments et rochers que je peulx assurer, avec beaucoup d'autres personnes que l'on a anthandu que au roc de Quornelhe de ladicté ville, y couche quantité de courbeaulx, que lhors de ce tranblement et il s'evalharent et se mirent à voller et crier de telle sorte qu'avaient mis l'espovante à plusieurs personnes quy les enthandict, et mesmement fist tumber plusieurs choses mal assurées (4). »

Ces jours de panique, Jacmon les consigne à nouveau à la date du 27 octobre 1616.

Article relatant les effets du séisme survenu le 16 septembre 1631 à proximité immédiate de la commune du Puy-en-Velay

234

Mémoires d'Antoine Jacmon

1646

[Tremblement de terre au Puy.]

Ce sabmedy 27^e octobre 1646, à quatre heures de matin, heure de repos, arriva par deux diverses foix, demy quart d'heure d'ung après l'autre, ung sy grand esbranlement et tremblement des terres et maizons quy faizoit remuer les meubles d'icelles, tant portes, fenestres, lictz, bastimants que autres chozes ; lequel avoict donné sy grande espouvante à ceux quy veilloient et sy grande frayeur, ne sçachant quel signe c'estoit, ou quel mal devoict arriver. Mais ce quy en consolla plusieurs quy se souvindrent d'un autre grand tremblement quy estoit arrivé de nostre temps en ceste ville et pays de Velay le 16^e septembre 1631 ; où Dieu nous veulhe conserver par sa sainte grace des mauvais inconveniantz comme nous sommes menacés!

Article relatant les effets du séisme survenu le 27 octobre 1646
à proximité immédiate de la commune du Puy-en-Velay

1772. — TREMBLEMENT DE TERRE. — Le 24^e juin, jour de Saint-Jean-Baptiste de cette année 1772, nous avons senti ici un tremblement de terre à neuf heures du matin ; il a duré tout au plus une demi-minute, il s'est fait sentir dans presque toute la longueur des montagnes qui séparent le Forez d'avec l'Auvergne ; mais la plus forte secousse a été au Puy où l'on dit qu'il a renversé des chandeliers sur les autels ; et chez moi, ici, dans la vieille cure où j'habitois encore, il a fait tiqueter des bouteilles qui étoient sur une table proche les unes des autres. Une personne qui étoit assise sur l'entablement de la croix de la place et appuyée, le dos contre la croix, a senti trembler et l'entablement et la croix. (Registres paroissiaux de Chazelles-sur-Lavieu).

Article relatant les effets du séisme survenu le 24 juin 1772
à proximité immédiate de la commune du Puy-en-Velay

—

Le Puy. — Samedi dernier, vers 5 heures du soir, un tremblement de terre s'est produit dans notre ville. La secousse, qui n'a duré que quelques secondes, a été principalement ressentie dans la partie nord-ouest du Puy.

Article relatant les effets du séisme survenu le 23 mars 1889
à environ 60 km de la commune du Puy-en-Velay

Le Puy. — Hier, vendredi, trois secousses de tremblement de terre plus ou moins fortes se sont fait sentir au Puy. La première s'est produite à quatre heures et demie du matin. Dix minutes après, on constatait une nouvelle oscillation. La dernière eut lieu à dix heures dix minutes. La première et la troisième ont été les moins fortes et les moins prolongées. La seconde a, au contraire, ébranlé le mobilier des maisons. Elle a duré de trois à quatre secondes, dans la direction du nord-ouest au sud-est.

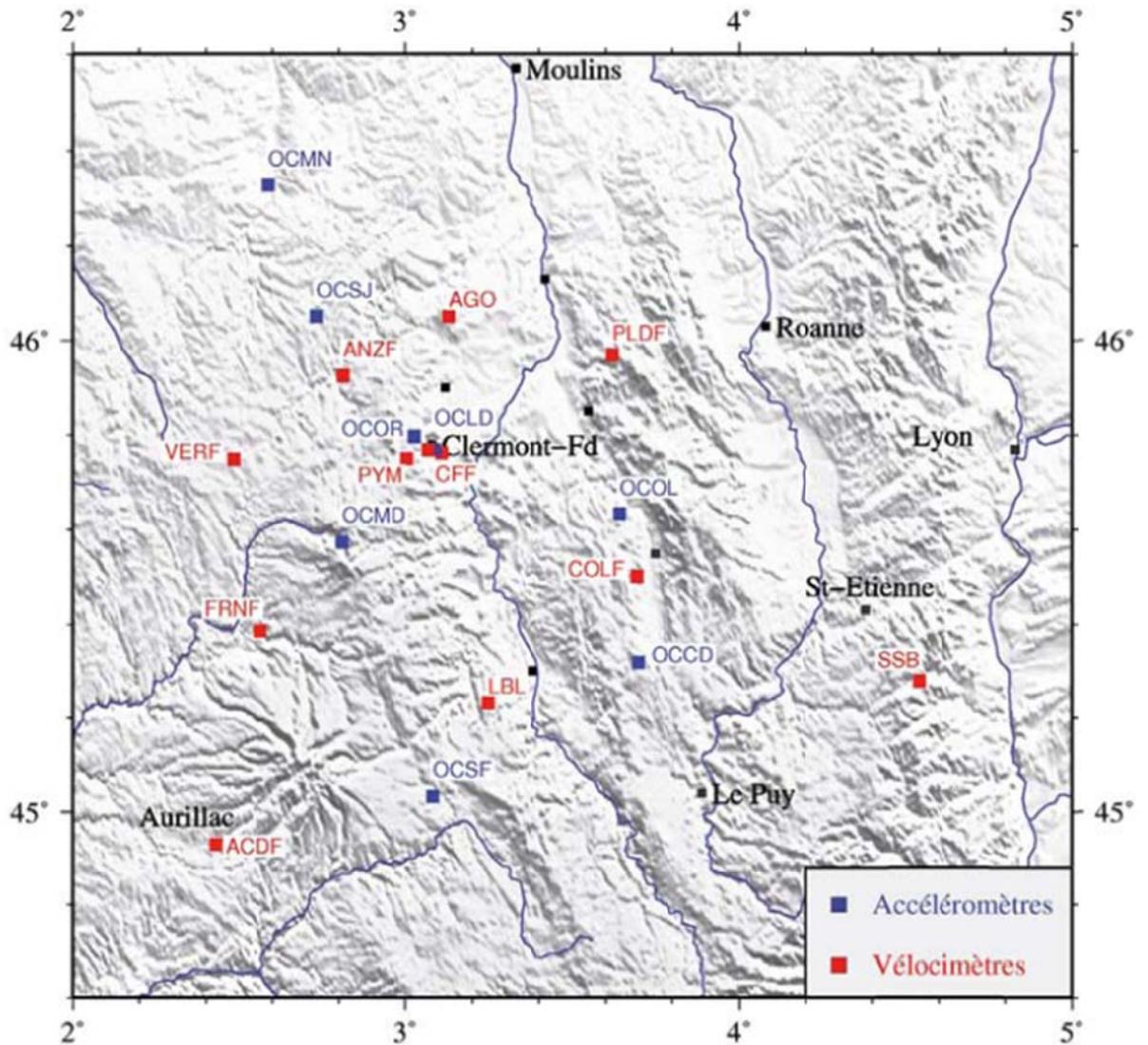
Article relatant les effets du séisme survenu le 26 août 1892
à environ 70 km de la commune du Puy-en-Velay

HAUTE-LOIRE.

ARRONDISSEMENT DU PUY. — *Le Puy*, une seule sec. vers 5 h. 30, de degré III, direction NE-SW. Impression de chute dans la direction sus-indiquée (J. Breschet, 16 Bd. Gambetta). — *Canton d'Allègre*: Allègre, vers 5 h. 35. Tremblement de la maison comparable à celui que produit le passage d'un lourd tracteur automobile. (Valla, directeur d'École). — *Canton du Puy*: Charentins-près-Coubon, très légère sec., ressentie par quelques personnes seulement qui ont cru au passage d'un camion sur la route (Richard, charcutier à Coubon). — *Paulhac*, vers 5 h. 46. Une forte sec. du N-E au S-W. Un grondement souterrain, sourds Balancement du lit (Paulet, garde forestier). — *Canton de Craponne*: Chomelix, objets tombés dans le couloir, quelques fragments de plâtre tombés du plafond (Montchamp, inst.). Une sec. de 5 s. Direction Nord-Sud. Bruit sourd semblable au vent soufflant au loin. (Brun, inst.). — *Canton de Solignac-sur-Loire*: Solignac-sur-Loire, vers 5 h. 45, 2 ou 3 sec. S-W. Il m'a semblé que la terre se levait horizontalement. Ébranlement constaté par un grand nombre de personnes tant à l'intérieur des maisons qu'en plein air. (Perrin, inst.). — *Canton de Saugues*: Venteuges, vers 5 h. 50 une sec. de 2 à 3 s. Bruit insolite dans la chambre, vitres ébranlées, portes de communications secouées. Au village de Pépinet, chez Raynaud, vitres

Article relatant les effets du séisme survenu le 17 janvier 1924
à environ 50 km de la commune du Puy-en-Velay

Annexe 5 - Stations sismologiques à proximité du Puy-en-Velay



Le Réseau Sismologique Auvergne (© OPGC)

	Sigle	OCCD
	Nom	La Chaise-Dieu (43)
	Latitude	45°19'N
	Longitude	3°41'E
	Altitude en m	1080
	Sismomètres	Accéléromètre - 3 Composantes
	Transmission	Téléphone

	Sigle	LBL
	Nom	Lubilhac (43)
	Latitude	45°13'N
	Longitude	3°14'E
	Altitude en m	950 m
	Sismomètres	1Hz-Vertical
	Transmission	Télémetrie radio

Exemples de stations sismologiques installées à proximité du Puy-en-Velay (© OPGC)

Annexe 6 - Résultats de l'analyse statistico-historique

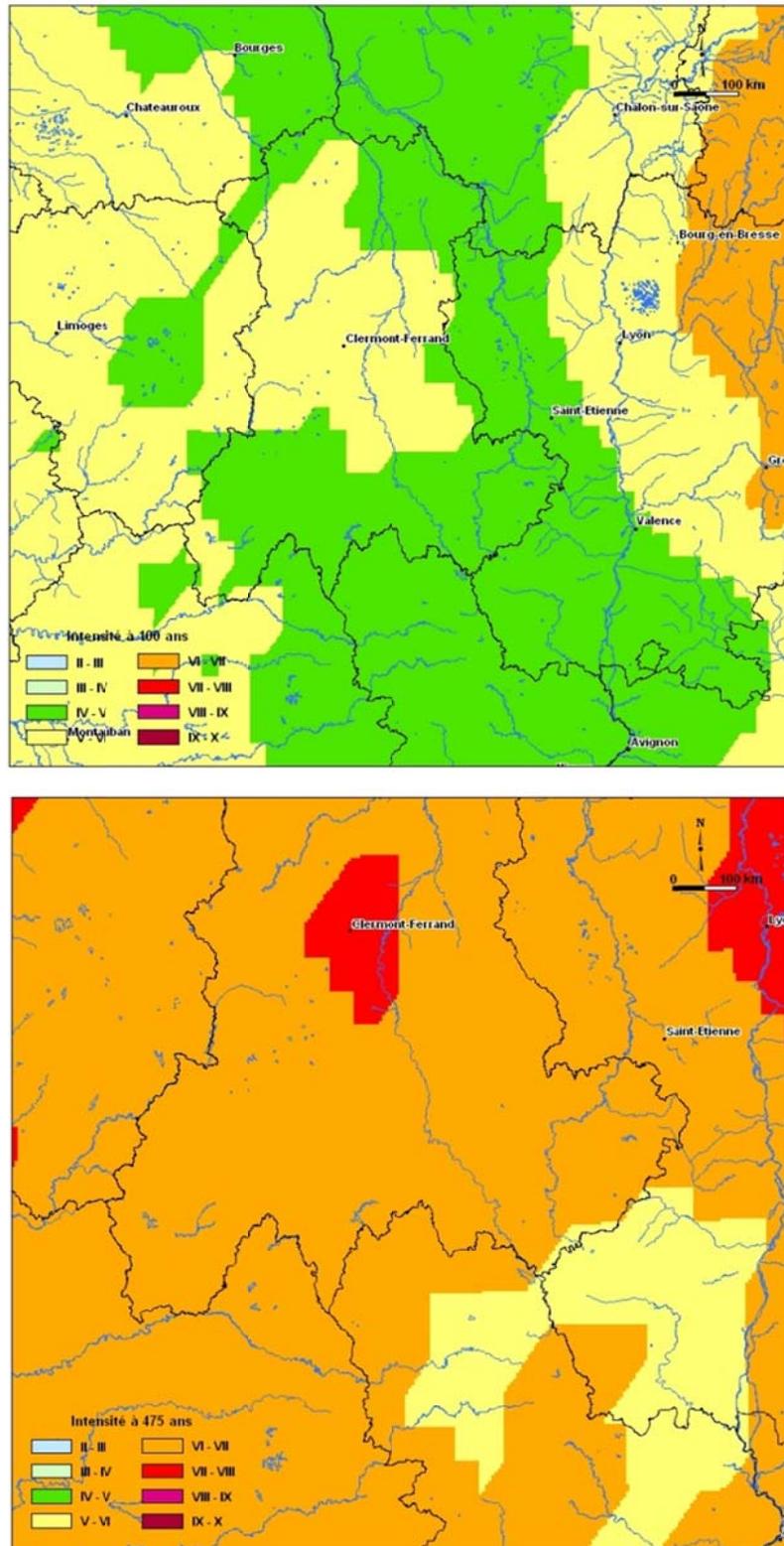


Figure 40 - Carte des intensités pour des périodes de retour de 100 et 475 ans (© BRGM)

Annexe 7 - Données INSEE pour commune du Puy-en-Velay

Libellé commune ou ARM	Résprinc Type maison avt 1949 en 2006 (princ)	Résprinc Type maison 1949 à 1974 en 2006 (princ)	Résprinc Type maison 1975 à 1989 en 2006 (princ)	Résprinc Type maison 1990 à 2003 en 2006 (princ)	Résprinc Type appart avt 1949 en 2006 (princ)	Résprinc Type appart 1949 à 1974 en 2006 (princ)	Résprinc Type appart 1975 à 1989 en 2006 (princ)	Résprinc Type appart 1990 à 2003 en 2006 (princ)
Guitard-roche Arnaud	170	109	128	53	67	298	220	6
Zone Verte Ours-Mons	66	34	81	118	0	0	6	0
Taulhac	66	112	252	89	8	221	36	0
Val Vert	66	142	8	14	45	789	42	6
Breuil-Carmes	52	21	15	6	411	472	246	26
Carnot-Capucins	96	103	36	13	506	200	332	130
Centre Historique	103	12	23	39	783	195	453	541
Saint-Jean-République	37	43	12	13	302	542	268	170

Classification des habitats par type et par périodes de construction pour chaque IRIS de la commune du Puy-en-Velay (source : © INSEE 2006)

IRIS	Libellé commune ou ARM	Logements en 2006	Maisons en 2006	Appartement en 2006	% MI	% Coll
101	Guitard-roche Arnaud	1227	544	683	44,33	55,67
102	Zone Verte Ours-Mons	350	337	9	96,55	2,57
103	Taulhac	888	587	290	66,10	32,61
104	Val Vert	1219	245	973	20,13	79,87
105	Breuil-Carmes	1507	110	1385	7,30	91,87
106	Carnot-Capucins	1657	287	1364	17,32	82,32
107	Centre Historique	3104	224	2875	7,21	92,64
108	Saint-Jean-République	1678	119	1527	7,08	91,01

Nombre total de logements par secteur IRIS pour la commune du Puy-en-Velay (source : © INSEE 2006)

		1 - 2 étages	3 - 5 étages	6 - 8 étages	> 8 étages
Puy-en-Velay (Le)	Total	437	1030	62	5
	avant 1915	148	525	1	2
	de 1915 à 1948	92	154	0	0
	de 1949 à 1967	73	123	34	0
	de 1968 à 1974	32	76	16	3
	de 1975 à 1981	29	59	3	0
	de 1982 à 1989	37	60	2	0
	en 1990 ou après	26	33	6	0

Nombre d'immeubles en fonction de leur étage et de leur période de construction pour la commune du Puy-en-Velay (source : © INSEE 1999)

Annexe 8 - Etablissements Recevant du Public (ERP) dans commune du Puy-en-Velay

Type d'établissement	Catégorie ERP	Nom
Santé	–	Centre Hospitalier Emile Roux
Santé	–	Centre Hospitalier Sainte Marie
Santé	–	Clinique Bon Secours
Santé	–	Hébergement Personnes Âgées
Santé	–	Hébergement Personnes Âgées
Santé	–	Hébergement Personnes Âgées
Santé	–	Multi Accueil "Les Petites Mousses"
Santé	–	Multi Accueil "Les Coquins d'Abord"
Santé	–	Multi Accueil "La Petite Poule Rousse"
Santé	–	Multi Accueil "Saperlipopette"
Santé	–	Centre Médico Psycho Pédagogique
Secours	–	Commissariat de police
Secours	–	Brigade territoriale gendarmerie
Secours	–	Caserne Pompier
Transport	–	Gare SNCF
Administratif	–	Préfecture
Enseignement	5	Ecole publique du Val-Vert
Enseignement	5	Ecole publique Jeanne d'Arc
Enseignement	4	École publique Marcel Pagnol
Enseignement	5	Ecole publique et privée de Guitard
Enseignement	5	Ecole Primaire publique de Taulhac
Enseignement	5	Ecole Primaire publique "Les Fraisses"
Enseignement	4	Ecole Primaire publique Michelet
Enseignement	4	Ensemble scolaire la chartreuse & Paradis
Enseignement	4	Ecole privée St Louis Notre Dame De France
Enseignement	3	Ecole privée Saint Joseph Le Rosaire
Enseignement	5	Groupe scolaire des Carmes
Enseignement	5	Ecole privée Sainte Thérèse
Enseignement	3	Ecole Michelet
Enseignement	5	Ecole St Régis-St Michel
Enseignement	2	Université (IUFM et IUT)
Enseignement	3	Lycée professionnel Jean Monnet

Enseignement	2	Lycée Technologique Anne-Marie Martel
Enseignement	3	Lycée Simone Weil
Enseignement	3	Lycée professionnel du Bâtiment
Enseignement	3	Lycée Polyvalent Charles & Adrien Dupuy
Enseignement	3	Lycée Anne Marie Martel
Enseignement	3	Ecole/Collège St Régis St Michel
Enseignement	3	Collège Lafayette
Enseignement	2	Collège Jules Valles
Enseignement/Santé	5	Classes Annexes pour déficients Auditifs
Enseignement/Santé	5	I.M.Pro Les Cévennes
Enseignement/Santé	5	Institut Marie Rivier
Enseignement/Santé	5	Institut Médico-Professionnel
Culture	3	Le Théâtre
Loisirs	3	Complexe sportif Massot

Liste des principaux bâtiments de catégorie d'importance III et IV recensés sur la commune du Puy-en-Velay

Annexe 9 - Tableau de conclusion sur le pré-diagnostic de microzonage sismique pour la commune du Puy-en-Velay

Item considéré	Pertinence d'un microzonage sismique ?			Remarques
	De niveau A	De niveau B	De niveau C	
Aléa sismique régional :				
Aléa sismique régional	Non	Non	Non	Aléa sismique pris correctement en compte par les mouvements réglementaires : à confronter aux paléoséismes.
Aléa sismique local :				
Effets de sites lithologiques	Non	Non	Oui (Mesures géophysiques + sondages + simulations numériques)	13 types de formations affectant près de 60 % du territoire. Pas assez de connaissances sur les épaisseurs.
Effets de sites topographiques	Non	Oui	Non	Quelques zones identifiées : zonage à préciser sur la base d'un MNT plus précis.
Mouvements de terrain	Non	Oui (visite de terrain)	Non	Quelques zones sont concernées. Présence de nombreuses carrières au niveau de secteurs urbanisés.
Potentialités de liquéfaction	Non	Non	Non	Le niveau de la nappe est à préciser dans les zones non renseignées. 9 types de formations identifiées couvrant près de 40 % du territoire. Niveau sismique à priori pas suffisant pour liquéfier.
Vulnérabilité :				
Bâtiments de classe II	La vulnérabilité semble plus marquée au niveau des quartiers anciens du centre-ville du Puy-en-Velay. Néanmoins, une étude de vulnérabilité spécifique n'est pas nécessaire.			IRIS 105 (Breuil-Carmes) et 107 (Centre Historique).
Bâtiments de classe III et IV	46 bâtiments identifiés : vulnérabilité non-évaluée. Des visites spécifiques sont nécessaires pour les bâtiments stratégiques.			Localisés principalement dans le centre-ville.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude Guillemin
BP 6009
45060 Orléans cedex 2 - France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service Géologique Régional Auvergne

12, avenue des Landais
Campus des Cézeaux
63170 Aubière - France
Tél. : 04 73 15 23 00