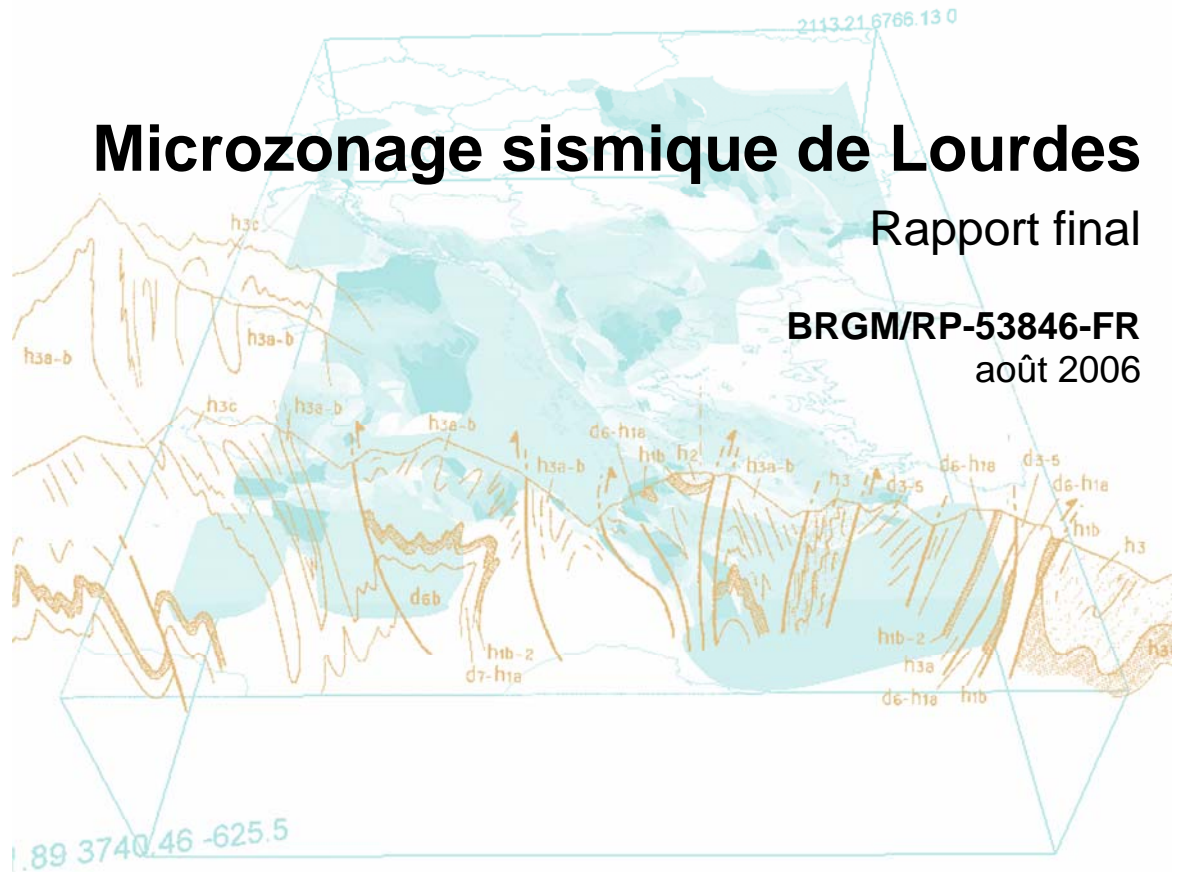




# Microzonage sismique de Lourdes

Rapport final

BRGM/RP-53846-FR  
août 2006



Document public

# Microzonage sismique de Lourdes

Rapport final

**BRGM/RP-53846-FR**  
août 2006

S. Bernardie, G. Delpont, P. Dominique, S. Le Roy, C. Negulescu, A. Roullé

**Vérificateur :**

Nom : JL Nédellec

Date : 08/06/06

Signature :

**Approbateur :**

Nom : Ph. Dutartre

Date : 09/06/06

Signature :



**Mots clés** : Aléa sismique, Sismotectonique, Mouvement sismique de référence, Microzonage, Lourdes, Pyrénées.

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

**Bernardie S., Delpont G., Dominique P., Le Roy S., Negulescu C., Roullé A.** (2006) – Microzonage sismique de Lourdes. BRGM/RP-53846-FR, 234 p., 86 fig., 35 tabl., 12 pl. hors texte, 1 volume annexes.

## Synthèse

À la demande de la Ville de Lourdes, le BRGM a été chargé d'évaluer et de cartographier les risques naturels de la commune. Il s'agit en particulier de la réalisation d'un microzonage sismique incluant les risques liés aux séismes et aux mouvements de terrain.

Ce travail est réalisé pour le compte de la Ville de Lourdes avec l'appui du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable et du BRGM (Projet PSP04MPY31) dans le cadre de ses actions de service public. Ce travail a également bénéficié d'une collaboration de l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP).

Outre le présent rapport de synthèse, les résultats sont fournis sous la forme de cartes au 1/10 000. Leur lecture permet de connaître en tout point de la ville de Lourdes :

- les zones de réponse sismique homogène selon l'approche spécifique (niveau C) donnée par le Guide méthodologique : « *Prévention des risques naturels (PPR) Risques sismiques, 2002* » (**planche 1**) ;
- l'existence de phénomènes d'amplification topographique et de zones susceptibles de liquéfaction (**planche 2**) ;
- le type et l'intensité de l'aléa mouvement de terrain (**planche 3**) ;
- la synthèse des niveaux d'aléa considérés (**planche 4**).

**À titre d'information**, nous avons fourni les planches qui pourraient être issues de la réglementation nationale :

- le type de site selon les Règles de construction parasismique en vigueur, (PS 92) (**planche 5**) ;
- le type de site selon les Règles de construction parasismique en projet, (Eurocode 8) (**planche 6**).

Les différentes composantes de l'aléa sismique local peuvent désormais être prises en compte dans les documents d'urbanisme, afin que les aménageurs et urbanistes intègrent les différentes contraintes liées à cet aléa, dès la conception d'un projet, au même titre que les contraintes liées au fonctionnement actuel de la ville. Il est désormais primordial de transposer les constats techniques de l'étude de microzonage sismique en documents opposables aux tiers. C'est précisément l'objet des Plans de Prévention de Risques naturels prévisibles (PPR), dont la réalisation doit être une priorité pour la commune.

Pour le risque sismique, les amplifications du mouvement sismique sur les sols appelées effets de site lithologiques ou topographiques et le phénomène de liquéfaction - qui correspond à une perte de portance des sols sous sollicitation dynamique - ont été considérés. Enfin, nous n'envisageons pas la possibilité d'une rupture de surface le long de la faille de Lourdes.

Pour le risque mouvements de terrain, une distinction a été faite entre les glissements de terrain et les chutes de bloc dont la cinématique est différente.

Après la présentation de la méthodologie employée pour cartographier les différents aléas, les zones exposées sont reportées au 1/10 000 avec pour chaque phénomène un niveau d'aléa graduel.

En complément, un scénario de risque permet de combiner les résultats de l'aléa sismique local (agression sismique) et de la vulnérabilité physique des constructions grâce à l'outil ARMAGEDOM, afin d'aboutir aux estimations des degrés de dommages D0, D1, D2, D3, D4 (dommages sévères) et D5 (destruction complète) pour l'ensemble de la zone d'étude pour le bâti courant. Les secteurs sensibles de la ville pour lesquels la prise en compte du risque sismique est prioritaire sont ainsi identifiés.

L'approche adoptée suit les recommandations formulées par l'Association Française du Génie Parasismique dans son guide pour la réalisation des microzonages sismiques (AFPS, 1993).

# Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	17
<b>2. Aléa sismique régional</b> .....	19
2.1. INTRODUCTION .....	19
2.2. CADRE GÉODYNAMIQUE .....	19
2.3. STRUCTURE GÉOLOGIQUE .....	20
2.4. SISMICITÉ .....	22
2.5. IDENTIFICATION DES FAILLES ACTIVES .....	25
2.6. INDICES D'ACTIVITÉ NÉOTECTONIQUE OU PALÉOSISMOLOGIQUE .....	26
2.6.1. La base de données NéoPal .....	26
2.6.2. Données paléosismologiques.....	26
2.7. STRUCTURE(S) SISMOGÉNIQUE(S) CRITIQUE(S) DANS LA RÉGION DE LOURDES .....	27
2.8. APPROCHE STATISTICO-HISTORIQUE .....	29
2.8.1. Historique des mouvements sismiques dans la région de Lourdes .....	29
2.8.2. Détermination des périodes de retour pour chaque intensité seuil .....	34
2.9. COMPARAISON AVEC LES ÉTUDES PROBABILISTES .....	36
2.10. DÉFINITION DU SEISME DE RÉFÉRENCE.....	38
2.11. SPECTRE DE RÉPONSE ÉLASTIQUE AU ROCHER.....	39
<b>3. Contexte géologique</b> .....	45
3.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE DE LA COMMUNE.....	45
3.1.1. Les formations anciennes.....	45
3.1.2. Les formations récentes .....	47
3.2. ÉTUDE DÉTAILLÉE DES FORMATIONS RÉCENTES .....	48
3.2.1. Recherche d'information existante .....	48
3.2.2. Travaux de terrain .....	49
3.2.3. Localisation et sélection des informations .....	49

3.2.4. Fiabilité des informations .....	51
3.2.5. Description des formations par interprétation des sondages .....	51
3.3. BASE DE DONNÉE GÉOLOGIQUE TRIDIMENSIONNELLE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES MEUBLES .....	65
3.3.1. Généralités.....	65
3.3.2. Intégration des sondages disponibles (Figure 16) .....	66
3.3.3. Description des sondages interprétés.....	67
<b>4. Zonage géotechnique .....</b>	<b>77</b>
4.1. MÉTHODOLOGIE .....	77
4.2. PROSPECTION GÉOPHYSIQUE.....	77
4.2.1. La méthode SASW.....	77
4.2.2. La méthode H/V bruit de fond .....	78
4.3. MESURES GÉOPHYSIQUES DISPONIBLES ET RÉALISÉES .....	80
4.4. MESURES GÉOTECHNIQUES DISPONIBLES ET RÉALISÉES .....	80
4.4.1. Mesures réalisées à Lourdes .....	82
4.5. ZONAGE GÉOTECHNIQUE .....	83
4.5.1. Zone 0 : Rocher .....	84
4.5.2. Zone 1 : Gave Sud .....	84
4.5.3. Zone 2 : Lac de Lourdes .....	84
4.5.4. Zone 3 : Gave Basilique.....	85
4.5.5. Zone 4 : Gave Ouest.....	85
4.5.6. Zone 5 : Alluvions Abbadie .....	85
4.5.7. Zone 6 : Alluvions du Centre.....	85
4.5.8. Zone 7 : Alluvions Anclades.....	86
4.5.9. Zone 8 : La Citoyenne.....	86
4.5.10. Zone 9 : Flyschs Biscaye .....	86
4.5.11. Zone 10 : Moraines de Saux.....	86
4.5.12. Zone 11 : Terrasses de Sarsan.....	87
4.5.13. Zone 12 : Marais de Monge .....	87
4.5.14. Zone 13 : Alluvions Gare.....	87
<b>5. Synthèse géologique, géophysique et géotechnique : détermination des     colonnes de sol.....</b>	<b>89</b>
5.1. PRÉAMBULE .....	89
5.2. CARACTÉRISATION DES UNITÉS GÉOMECANIQUES POUR CHAQUE ZONE .....	89

5.2.1. Zone Gave Sud .....	89
5.2.2. Zone Lac Lourdes.....	91
5.2.3. Zone Gave basilique.....	93
5.2.4. Zone Gave Ouest .....	95
5.2.5. Zone Moraines Abbadie .....	97
5.2.6. Zone Alluvions Centre .....	99
5.2.7. Zone Alluvions Anclades .....	104
5.2.8. La Citoyenne .....	106
5.2.9. Zone Flysch Biscaye .....	107
5.2.10. Zone Moraines Saux .....	109
5.2.11. Zone Marais Monge.....	113
5.2.12. Zone Terrasses de Sarsan .....	115
5.2.13. Alluvions Gare .....	116
<b>6. Détermination des spectres de réponse tenant compte des conditions de site .....</b>	<b>119</b>
6.1. PRÉSENTATION DU PROBLÈME .....	119
6.1.1 Méthodes empirico-statistiques.....	119
6.1.2 Méthodes numériques.....	119
6.2. SPECTRES SPÉCIFIQUES TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE (PLANCHE 1).....	122
6.3. CLASSIFICATION DES ZONES SELON LES PS92 (PLANCHE 5) .....	132
6.4. CLASSIFICATION DES ZONES SELON LES EC8 (PLANCHE 6) .....	134
<b>7. Cartographie des effets de site lithologiques.....</b>	<b>137</b>
<b>8. Cartographie des effets de site topographiques.....</b>	<b>141</b>
8.1. DÉFINITION .....	141
8.2. PRINCIPES DE LA RÉGLEMENTATION.....	141
8.3. ÉVOLUTION DE LA CONNAISSANCE ET DE LA RÉGLEMENTATION.....	143
8.4. CARTOGRAPHIE .....	143
<b>9. Appréciation des potentialités de liquéfaction.....</b>	<b>145</b>
9.1. DÉFINITION ET MÉTHODE .....	145
9.1.1. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction .....	146
9.1.2. Susceptibilité quantitative à la liquéfaction .....	147



9.2. APPRÉCIATION DES POTENTIALITÉS QUALITATIVES DE LIQUÉFACTION SUR LES DIFFÉRENTES ZONES GÉOTECHNIQUES DE LA COMMUNE DE LOURDES – ANALYSE GÉOLOGIQUE PRÉLIMINAIRE .....	149
9.2.1. Zone Gave Sud .....	150
9.2.2. Zone Lac Lourdes .....	150
9.2.3. Zone Gave basilique .....	151
9.2.4. Zone Gave Ouest.....	151
9.2.5. Zone Moraines Abbadie .....	151
9.2.6. Zone Alluvions Centre.....	152
9.2.7. Zone Alluvions Anclades.....	153
9.2.8. Zone La Citoyenne.....	153
9.2.9. Zone Flysch Biscaye .....	154
9.2.10. Zone Moraines Saux.....	154
9.2.11. Zone Marais Monge .....	155
9.2.12. Zone Terrasses Sarsan.....	155
9.2.13. Zone Alluvions Gare.....	155
9.3. SUSCEPTIBILITÉ QUALITATIVE À LA LIQUÉFACTION – EXPLOITATION DES CRITÈRES NORMALISÉS .....	156
9.3.1. Les argiles de la zone Lac Lourdes .....	156
9.3.2. Les alluvions de la zone Alluvions Centre.....	158
9.3.3. Les sables fins avec graviers de la zone Alluvions Centre .....	159
9.3.4. Les limons de la zone Alluvions Centre .....	160
9.3.5. Les sables de la zone Alluvions Anclades .....	160
9.3.6. Les argiles vaseuses de la zone Moraines Saux.....	160
9.3.7. Les vases de la zone Marais Monge.....	161
9.3.8. Les limons de la zone Alluvions Gare .....	161
9.3.9. Synthèse .....	161
9.4. SUSCEPTIBILITÉ QUANTITATIVE ET OPPORTUNITÉ À LA LIQUÉFACTION .....	162
9.5. CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA LIQUÉFACTION .....	163
9.6. PRÉCONISATIONS EN TERME DE DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES ....	163
<b>10. Cartographie des mouvements de terrain .....</b>	<b>167</b>
10.1. CONTEXTE.....	167
10.2. DONNÉES EXPLOITÉES .....	167
10.3. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE .....	168
10.3.1. Phasage de l'analyse .....	168
10.3.2. Détermination de critères de susceptibilité aux instabilités.....	168
10.3.3. Intégration de l'effet dynamique du séisme.....	169
10.3.4. Niveaux d'aléa.....	170

10.4. LES GLISSEMENTS .....	171
10.4.1. Les formations géologiques.....	171
10.4.2. La carte des pentes .....	171
10.4.3. Combinaison des facteurs .....	171
10.5. LES CHUTES DE BLOCS .....	173
10.5.1. Les zones de départ .....	173
10.5.2. Les zones de propagation .....	174
<b>11. Scénario de risque sismique.....</b>	<b>179</b>
11.1. INTRODUCTION .....	179
11.2. VULNÉRABILITÉ.....	180
11.2.1. Méthode d'évaluation de la vulnérabilité – Méthode RISK-UE.....	181
11.2.2. Adaptation de la méthode pour la zone d'étude .....	186
11.2.3. Résultats de l'analyse de la vulnérabilité.....	196
11.3. SCÉNARIOS SISMIQUES.....	200
11.3.1. Logiciel de simulation utilisé pour scénario sismique : Armagedom.....	200
11.3.2. Degré de dommages .....	200
11.3.3. Choix et méthodologie de scénario de risque .....	202
11.3.4. Résultats des scénarios .....	208
11.3.5. Conclusions.....	218
<b>12. Conclusion générale .....</b>	<b>221</b>
<b>13. Références bibliographiques .....</b>	<b>225</b>
<b>14. Glossaire .....</b>	<b>231</b>

## Liste des figures

Figure 1 -	Localisation de la zone d'étude dans le contexte pyrénéen et axes de contraintes horizontales maximum (modifié d'après Alasset et Meghraoui, 2005). .....	20
Figure 2 -	Structure « en éventail » de la chaîne pyrénéenne le long d'une coupe transversale sud-nord (modifié d'après Sibuet <i>et al.</i> , 2004, In Alasset, 2005). .....	22
Figure 3 -	Sismicité historique de la région de Lourdes (base de données SisFrance, <a href="http://www.sisfrance.net">www.sisfrance.net</a> ) et localisation des failles. ....	24
Figure 4 -	Sismicité instrumentale de la région de Lourdes (modifié d'après Dubos <i>et al.</i> , 2004) ; les zones pointillées délimitent, de la gauche vers la droite, le groupe d'Arudy, le groupe d'Aucun, le groupe de Lourdes et le groupe de Bagnères-de-Bigorre. ....	25
Figure 5 -	Interprétation des mouvements normaux observés par Alasset et Meghraoui (2005) sur le segment de Capbis de la faille de Lourdes ; A) déformation de type « flexural slip » ; B) réajustement en faille normale en réponse à la variation de pendage d'une faille inverse en profondeur ; le nord est à gauche et le sud à droite. ....	28
Figure 6 -	Localisation et intensité épiscopale des différents séismes ayant été ressentis sur la commune de Lourdes avec une intensité supérieure ou égale à IV (source SisFrance, 2006 ; <a href="http://www.sisfrance.net">www.sisfrance.net</a> ). ....	33
Figure 7 -	Intensités observées sur la commune de Lourdes pour les différents séismes listés dans le Tableau 1 et ressentis sur la commune avec une intensité supérieure ou égale à IV (source SisFrance, 2006 ; <a href="http://www.sisfrance.net">www.sisfrance.net</a> ). Les intensités ressenties ont été représentées au niveau de l'épicentre du séisme correspondant pour une meilleure lecture de la carte. ....	34
Figure 8 -	Distribution de la probabilité annuelle de dépassement en fonction de l'intensité sur la commune de Lourdes (croix rouges). Les lignes pointillées indiquent les incertitudes associées aux valeurs obtenues et la droite rouge correspond à une période de retour de 475 ans. ....	36
Figure 9 -	Aléa sismique probabiliste sur la région pyrénéenne d'après Secanell <i>et al.</i> , 2006. PGA médian pour une période de retour de 475 ans. ....	37
Figure 10 -	Carte des isovaleurs médianes des accélérations en $\text{cm/s}^2$ pour une période de retour de 475 ans (d'après Le Brun et Imbault, 2003). L'étoile symbolise la ville de Lourdes. ....	37
Figure 11 -	Spectre de réponse au rocher horizontal affleurant proposé pour le microzonage sismique de Lourdes à 5% d'amortissement. Comparaison avec les spectres de réponse calculés à partir des lois d'atténuation citées dans le paragraphe précédent. ....	41
Figure 12 -	Spectre de réponse au rocher horizontal affleurant utilisé pour le microzonage sismique de Lourdes pour différents amortissements. ....	42
Figure 13 -	Paysage géomorphologique de la région de Lourdes. ....	45
Figure 14 -	Extrait de la carte géologique n° 1052 de la commune de Lourdes. ....	46

Figure 15 -	Localisation des sondages utilisés et des coupes synthétiques. Extrait de la carte géologique n° 1052. ....	50
Figure 16 -	Formations GW et GX aval. Extrait de la carte géologique n° 1052. ....	54
Figure 17 -	Formation Fz-Lac de Lourdes – Ruisseau de Baratchelé. Extrait de la carte géologique n° 1052. ....	56
Figure 18 -	Formation Gya centre ville. (Extrait de la carte géologique n° 1052). ....	58
Figure 19 -	Formations Fya-Gare-Biscayes-Anclades. Extrait de la carte géologique n° 1052. ....	60
Figure 20 -	Formation Fz-sud gare (ruisseau des Graves). Extrait de la carte géologique n° 1052. ....	62
Figure 21 -	Fz-pont Peyramale-Basilique. Extrait de la carte géologique n° 1052. ....	63
Figure 22 -	Fz-usine électrique-station d'épuration. Extrait de la carte géologique n° 1052. ....	64
Figure 23 -	Coupe SSO-NNE des formations morainiques du ruisseau des Graves et du centre-ville. ....	69
Figure 24 -	Coupe O-E des formations morainiques du ruisseau des Graves. ....	70
Figure 25 -	Coupe SSO-NNE des formations alluviales du Gave. ....	71
Figure 26 -	Coupe ONO-ESE des formations alluviales du Gave de Pau (place de la Merlasse-rue Sainte-Marthe). ....	71
Figure 27 -	Vue en perspective de la carte géologique de la région de Lourdes. ....	72
Figure 28 -	Exemples de surfaces générées à partir de la base de sondages. ....	75
Figure 29 -	Exemple de coupe réalisé à partir des surfaces des formations. ....	75
Figure 30 -	Dispositif SASW utilisé à Mayotte (à gauche : « flûte » de géophones, à droite : station d'acquisition). ....	78
Figure 31 -	Dispositif H/V utilisé à Mayotte (à gauche : la station d'acquisition et à droite : le sismomètre tridimensionnel 5 secondes). ....	79
Figure 32 -	Localisation des données géophysiques et géotechniques disponibles pour le microzonage sismique de Lourdes. ....	83
Figure 33 -	Zonage géotechnique de la commune de Lourdes. ....	88
Figure 34 -	Comparaison entre les spectres de réponse des accélérogrammes choisis pour le calcul des spectres spécifiques et le spectre au rocher défini précédemment. ....	121
Figure 35 -	Comparaison des spectres de réponse des colonne 1 (bleu) et 2 (rouge) pour la zone 10 (Moraines de Saux). ....	123
Figure 36 -	Comparaison des spectres de réponse des colonne 1 (bleu) et 2 (rouge) pour la zone 5 (Moraines Abbadie). ....	124
Figure 37 -	Comparaison des spectres de réponse des colonne 1 (bleu) et 2 (rouge) pour la zone 6 (Alluvions Centre). ....	125
Figure 38 -	Spectre de réponse au rocher horizontal affleurant proposé pour la classe 0. ....	126

Figure 39 -	Spectres de réponse calculés, spectre de réponse au rocher horizontal affleurant (en noir) et spectre de réponse avec effet de site (en rouge) proposé pour la classe 1. ....	127
Figure 40 -	Spectres de réponse calculés, spectre de réponse au rocher horizontal affleurant (en noir) et spectre de réponse avec effet de site (en rouge) proposé pour la classe 2. ....	128
Figure 41 -	Spectres de réponse calculés, spectre de réponse au rocher horizontal affleurant (en noir) et spectre de réponse avec effet de site (en rouge) proposé pour la classe 3. ....	129
Figure 42 -	Spectres de réponse calculés, spectre de réponse au rocher horizontal affleurant (en noir) et spectre de réponse avec effet de site (en rouge) proposé pour la classe 4. ....	129
Figure 43 -	Spectres spécifiques retenus pour le microzonage sismique de la commune de Lourdes. ....	130
Figure 44 -	Paramètres mathématiques permettant de définir un spectre de réponse élastique. ....	131
Figure 45 -	Zonage sismique spécifique. ....	138
Figure 46 -	Zonage sismique selon les PS92. ....	139
Figure 47 -	Zonage sismique selon les EC8. ....	140
Figure 48 -	Principe de calcul du coefficient $\tau$ pour l'évaluation des effets de site topographiques. ....	142
Figure 49 -	Choix des profils pour le calcul du coefficient $\tau$ . ....	143
Figure 50 -	Effet de site topographique et aléa liquéfaction. ....	166
Figure 51 -	Matrice de définition des classes de susceptibilité. ....	172
Figure 52 -	Aléa glissements de terrain. ....	173
Figure 53 -	Aléa chutes de blocs. ....	175
Figure 54 -	Aléa mouvement de terrain. ....	176
Figure 55 -	Carte de synthèse des aléas. ....	177
Figure 56 -	Courbes de vulnérabilité. ....	185
Figure 57 -	Orthophotos de la région de Lourdes. ....	187
Figure 58 -	Délimitation de zones homogènes. ....	188
Figure 59 -	Classification des zones homogènes selon leurs typologie d'occupation des sols. ....	189
Figure 60 -	Zones homogènes des bâtiments représentant un lotissement (LOT). ....	189
Figure 61 -	Zones homogènes des bâtiments représentant des habitats collectifs (COL). ....	189
Figure 62 -	Tableau excel avec les caractéristiques nécessaires pour le calcul de l'indice de vulnérabilité pour une structure. ....	190
Figure 63 -	Pointage des structures dans les zones CV te CH (gauche). ....	191
Figure 64 -	Pointage des structures dans les zones LOT (droite). ....	191

Figure 65 -	Zone homogène des habitats collectifs (ID58) et photos des bâtiments appartenent à cette zone .....	192
Figure 66 -	Zone homogène des habitats collectifs (ID31) et photos des bâtiments appartenent à cette zone. ....	193
Figure 67-	Zone ID78 (LOT) et photos des bâtiments appartenant à cette zone. ....	193
Figure 68 -	Zone ID26 (LOT) et photos des bâtiments appartenent à cette zone. ....	194
Figure 69 -	Zone ID42 (CH) et photos des bâtiments appartenent à cette zone. ....	194
Figure 70 -	Zone ID41 (hôtels) et quelques bâtiments représentatifs. ....	195
Figure 71 -	Structures caractéristiques pour les différentes zones considérées. ....	197
Figure 72 -	Classification des zones homogènes en fonction de leur niveau d'inspection sur le terrain. ....	197
Figure 73 -	(gauche) Résultat de l'analyse: vulnérabilité constatée.....	198
Figure 74 -	(droite) Résultat de l'analyse : vulnérabilité déduite. ....	198
Figure 75 -	Carte des contours de la commune de Lourdes : IRIS INSEE en rouge.....	199
Figure 76 -	Classification des dégats : l'Echelle Macrosismique Européenne.....	201
Figure 77 -	Carte d'accélération : sans effet de site. ....	204
Figure 78 -	Carte d'accélération : avec effets de site topographique. ....	205
Figure 79 -	Carte d'accélération : avec des effets de site lithologique. ....	206
Figure 80 -	Carte d'accélération avec effets de site lithologique et topographique.....	207
Figure 81 -	Identifiants des zones homogènes. ....	208
Figure 82 -	Pourcentage de bâtiments atteignant ou dépassant le degré de dommage D4 pour chaque polygone.....	209
Figure 83 -	Nombre de bâtiments atteignant ou dépassant le degré de dommage D4 pour chaque polygone. ....	209
Figure 84 -	Probabilité de 30 % pour que les bâtiments compris dans le polygone se trouvent dans le degré de dommage. ....	210
Figure 85 -	Probabilité de 50 % pour que les bâtiments compris dans le polygone se trouvent dans le degré de dommage. ....	210
Figure 86 -	Nombre de logements qui se trouvent dans les degrés de dommages D5 et D4-D5 par contours IRIS INSEE.....	216
Figure 87 -	Pourcentage de logements qui se trouvent dans les degrés de dommages D5 et D4-D5 par contours IRIS INSEE .....	217

## Liste des tableaux

Tableau 1	- Liste des différents séismes ayant été ressentis sur la commune de Lourdes avec une intensité supérieure ou égale à IV. Les latitudes et longitudes sont en degrés sexagésimaux. ....	33
Tableau 2	- Nombre de séismes ayant induit une intensité supérieure ou égale à $I_{\text{seuil}}$ sur la commune de Lourdes. ....	35
Tableau 3	- Périodes de retour sur la commune de Lourdes pour des seuils d'intensité compris entre IV et VII MSK calculées à partir des données SisFrance et des dates d'exhaustivité retenue pour la région pyrénéenne (Secanell <i>et al.</i> , 2006). ....	35
Tableau 4	- Source retenue pour la détermination des mouvements sismiques au rocher horizontal affleurant sur la commune de Lourdes. ....	39
Tableau 5	- Spectre de réponse élastique horizontal du séisme de référence au rocher horizontal affleurant. Valeurs de A, V et D. ....	43
Tableau 6	- Caractéristiques des formations géologiques. ....	91
Tableau 7	- Résultats des essais en laboratoire. ....	92
Tableau 8	- Caractéristiques des formations géologiques. ....	93
Tableau 9	- Caractéristiques des formations géologiques. ....	95
Tableau 10	- Caractéristiques des formations géologiques. ....	97
Tableau 11	- Caractéristiques des formations géologiques – Colonne 1. ....	99
Tableau 12	- Caractéristiques des formations géologiques – Colonne 2. ....	99
Tableau 13	- Résultats des essais en laboratoire. ....	101
Tableau 14	- Caractéristiques des formations géologiques. ....	103
Tableau 15	- Caractéristiques des formations géologiques. ....	103
Tableau 16	- Caractéristiques des formations géologiques. ....	105
Tableau 17	- Caractéristiques des formations géologiques. ....	107
Tableau 18	- Caractéristiques des formations géologiques. ....	109
Tableau 19	- Résultats des essais en laboratoire. ....	110
Tableau 20	- Caractéristiques des formations géologiques - Colonne 1. ....	112
Tableau 21	- Caractéristiques des formations géologiques - Colonne 2. ....	113
Tableau 22	- Caractéristiques des formations géologiques. ....	114
Tableau 23	- Caractéristiques des formations géologiques. ....	116
Tableau 24	- Caractéristiques des formations géologiques. ....	118
Tableau 25	- Caractéristiques des accélérogrammes réels utilisés pour la modélisation numérique. ....	121
Tableau 26	- Paramètres mathématiques définissant les spectres proposés pour les bâtiments de classe B. ....	131

Tableau 27 - Paramètres d'identification des sols avec les PS92.....	132
Tableau 28 - Classification des différentes zones géotechniques selon les PS92.....	133
Tableau 29 - Classification des classes de sol selon les EC8.....	134
Tableau 30 - Classification des différentes zones géotechniques selon les EC8.....	135
Tableau 31 - Colonne de sol dans la zone Gave Sud et potentialités de liquéfaction.....	150
Tableau 32 - Colonne de sol dans la zone Lac Lourdes et potentialités de liquéfaction.....	150
Tableau 33 - Colonne de sol dans la zone Gave basilique et potentialités de liquéfaction.....	151
Tableau 34 - Colonne de sol dans la zone Gave Ouest et potentialités de liquéfaction.....	151
Tableau 35 - Première colonne de sol dans la zone Moraines Abbadie et potentialités de liquéfaction.....	151
Tableau 36 - Deuxième colonne de sol dans la zone Moraines Abbadie et potentialités de liquéfaction.....	152
Tableau 37 - Première colonne de sol dans la zone Alluvions Centre et potentialités de liquéfaction.....	152
Tableau 38 - Deuxième colonne de sol dans la zone Alluvions Centre et potentialités de liquéfaction.....	152
Tableau 39 - Troisième colonne de sol dans la zone Alluvions Centre et potentialités de liquéfaction.....	153
Tableau 40 - Colonne de sol dans la zone Alluvions Anclades et potentialités de liquéfaction.....	153
Tableau 41 - Colonne de sol dans la zone Flysch Biscaye et potentialités de liquéfaction.....	154
Tableau 42 - Première colonne de sol dans la zone Moraines Saux et potentialités de liquéfaction.....	154
Tableau 43 - Deuxième colonne de sol dans la zone Moraines Saux et potentialités de liquéfaction.....	154
Tableau 44 - Colonne de sol dans la zone Marais Monge et potentialités de liquéfaction.....	155
Tableau 45 - Colonne de sol dans la zone Terrasses Sarsan et potentialités de liquéfaction.....	155
Tableau 46 - Colonne de sol dans la zone Alluvions Gare et potentialités de liquéfaction.....	155
Tableau 47 - Zone Alluvions Centre, Colonne 1 - Calcul de l'intensité de liquéfaction.....	164
Tableau 48 - Zone Alluvions Centre, Colonne 2 - Calcul de l'intensité de liquéfaction.....	165
Tableau 49 - Bâtiments de classe D traités par le Cete Méditerranée.....	180
Tableau 50 - Typologies définies par la BTM (Building Typology Matrix) RISK-UE.....	182
Tableau 51 - Facteurs aggravants pour les bâtiments en béton.....	183
Tableau 52 - Facteurs aggravants pour les bâtiments en maçonnerie.....	184



Tableau 53 - (première partie) Répartition du nombre des logements qui se trouvent dans le degré de dommage D5 et D4 ou D5 par zones homogènes, pour le scénario de risque et le Vi moyen. ....	211
Tableau 54 - Répartition de dommages ND5 et ND4-ND5 par contours IRIS INSEE, pour l'indice de vulnérabilité moyen. ....	214
Tableau 55 - Répartition de dommages ND4-ND5 en fonction du type d'occupation des sols.....	215

# 1. Introduction

Il est bien établi que les Pyrénées et en particulier la Bigorre, constitue la région métropolitaine où la sismicité est la plus forte. L'histoire nous rappelle que la ville de Lourdes a subi plusieurs séismes destructeurs par le passé en 1660 (VII-VIII MSK<sup>1</sup>), 1665 (VII MSK), 1750 (VIII MSK), 1854 (VII MSK). Ainsi, le séisme de la Bigorre du 21 juin 1660 a atteint l'intensité épiscopentrale VIII-IX MSK.

Le dernier séisme ayant produit de légers dommages sur Lourdes (intensité V MSK) s'est produit en 1953. Mais, plus de 120 séismes ont été ressentis à Lourdes sur le dernier siècle (base SisFrance, version 2006).

L'évaluation de l'aléa sismique est un préalable à toute étude de risque sismique. Elle permet d'évaluer les mouvements sismiques de référence à prendre en compte dans le cadre d'un microzonage sismique et d'orienter les schémas de développement urbain en intégrant les contraintes liées à l'aléa sismique.

Cette étude technique est réalisée pour le compte de la ville de Lourdes, avec l'appui du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable et du BRGM (Projet PSP04MPY31) dans le cadre de ses actions de service public. Ce travail a également bénéficié d'une collaboration avec l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP).

L'approche adoptée suit les recommandations formulées par l'Association Française du Génie Parasismique dans son guide pour la réalisation des microzonages sismiques (AFPS, 1993).

Elle s'articule de la façon suivante :

Une première partie rappelle les caractéristiques principales de l'**aléa sismique régional**, en accordant une attention particulière au contexte sismotectonique local, objet du chapitre 2.

Dans une seconde partie, à partir des données de sondages géologiques et géotechniques disponibles et réalisés dans le cadre de cette étude, ainsi qu'avec l'appui des méthodes d'investigation géophysique H/V et SASW (Spectral Analysis of Surface Waves), une synthèse géotechnique (chapitre 0) permet de déterminer les caractéristiques géomécaniques des formations et d'établir des colonnes de sol représentatives des configurations de site rencontrées sur la ville de Lourdes. Le calcul des mouvements sismiques de référence tenant compte des conditions locales de site ainsi définies conduit à la cartographie des **effets de site** sous la forme d'un microzonage sismique.

---

<sup>1</sup> MSK : Medvedev, Sponheuer, Karnik (1964). Echelle discrète d'intensité macrosismique. La description des degrés d'intensité est indiquée dans le glossaire.

L'analyse des **effets induits** traite des aléas mouvement de terrain et liquéfaction.

L'**aléa mouvement de terrain** est cartographié de façon naturaliste et selon le principe de similitude des événements par rapport à des facteurs de prédisposition.

L'**aléa liquéfaction** est évalué et cartographié selon la méthodologie préconisée par l'AFPS, à partir des facteurs de prédispositions (critères des Règles PS 92), à savoir essentiellement la granulométrie et les propriétés mécaniques des formations rencontrées. Cet aléa concerne plus particulièrement les formations sableuses, limoneuses de type lacustre, fluvatile ou glaciaire (moraines).

Enfin, une étude de la vulnérabilité par typologie du bâti rencontré dans les différents secteurs de la ville de Lourdes permet d'évaluer pour un scénario de risque correspondant au microzonage sismique les probabilités de dommages sur ces secteurs.

## 2. Aléa sismique régional

### 2.1. INTRODUCTION

La fiabilité de toute évaluation de l'aléa sismique régional, quelles que soient les méthodes suivies (probabiliste, historique, statistique ou déterministe), dépend fortement d'une bonne compréhension des mécanismes des déformations actives et surtout de la cohérence de ces déformations à toutes les échelles depuis la tectonique des plaques jusqu'à l'escarpement sismique.

L'analyse de l'aléa sismique suit une méthodologie qui vise à comprendre les mécanismes liant l'environnement tectonique à l'apparition des séismes. Elle comprend plusieurs étapes successives, à savoir l'analyse du cadre géodynamique, de la structure géologique régionale, de la sismicité, l'identification des failles actives, le cas échéant leur étude sur le terrain, l'établissement d'un zonage sismotectonique et sismique et, enfin, l'évaluation de l'aléa sismique régionale sensu stricto. Cette analyse s'appuie, dans le cadre de la présente étude, sur les données publiées dont nous disposons à ce jour.

### 2.2. CADRE GÉODYNAMIQUE

La nature des plaques ou micro-plaques en présence et de leurs frontières doivent être identifiées. Les mouvements relatifs sur ces limites doivent être contraints, à l'aide de modèles globaux de dérive des continents et/ou de mesures géodésiques, afin d'identifier les pôles de rotation décrivant leur cinématique. Compte tenu du caractère non-rigide des plaques tectoniques, il est aussi nécessaire d'analyser le partitionnement (distribution) de la déformation sur les différentes structures actives d'échelle régionale. Cette analyse donne accès à la cinématique des déformations et au champ de contrainte locale qui conditionne la réactivation des structures potentiellement sismogéniques.

Les Pyrénées forment une chaîne de montagnes de direction approximative ONO-ESE, longue de 400 km et large de 100 km environ, qui souligne la frontière entre la plaque Eurasie au nord et la microplaque Ibérie au sud. Des mesures géodésiques de la cinématique relative instantanée de ces deux plaques, depuis environ 10 ans, montrent une vitesse de convergence de  $0.5 \pm 1.5$  mm/an (Nocquet, 2002). Bien que cette valeur reste en deçà des limites d'incertitude de la méthode, elle montre que la chaîne pyrénéenne est soumise à de faibles taux de déformations, de l'ordre du mm par an tout au plus.

Les mécanismes au foyer déduits de la sismicité instrumentale montrent deux tenseurs des contraintes distincts le long de la chaîne pyrénéenne (Figure 1) :

- une contrainte horizontale maximale de direction NO-SE dans la partie occidentale de la chaîne (Souriau *et al.*, 2001), qui inclut largement la région de Lourdes ;
- une contrainte horizontale maximale de direction N-S à NNE-SSO dans la partie orientale de la chaîne (Goula *et al.*, 1999).

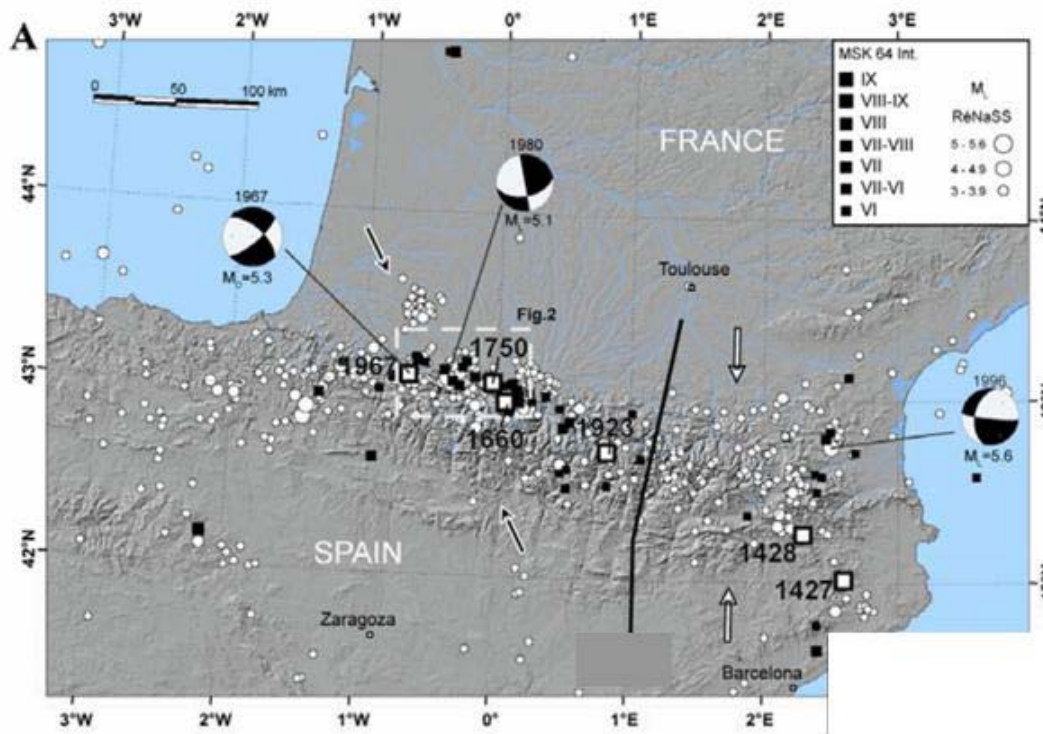


Figure 1 - Localisation de la zone d'étude dans le contexte pyrénéen et axes de contraintes horizontales maximum (modifié d'après Alasset et Meghraoui, 2005).

### 2.3. STRUCTURE GÉOLOGIQUE

La déformation active étant concentrée sur des structures anciennes réactivées dans le champ de contraintes actuel, la compréhension des déformations récentes implique une connaissance préalable de la fabrique de la croûte terrestre et, par conséquent, de l'histoire tectonique de la zone d'étude. La nature et l'orientation des failles héritées et susceptibles d'être réactivées par les contraintes actuelles sont identifiées et servent de base structurale au report des différentes données de la tectonique récente et actuelle. Cette caractérisation de la croûte terrestre permet de déterminer les mécanismes les plus plausibles des déformations actives.

La chaîne pyrénéenne résulte de la collision entre la microplaque Ibérique et la plaque Eurasiatique. Le modèle tectonique de Sibuet *et al.* (2004), basé sur les données du profil ECORS, présente les différentes étapes de la mise en place de la chaîne pyrénéenne:

- entre -118 et -100 Ma aurait eu lieu au sud la subduction vers le nord de la croûte océanique téthysienne ;
- plus au nord, à partir de -65 Ma, la croûte continentale inférieure délamainée s'enfonce vers le nord sous la plaque eurasiatique.

Le paroxysme de la compression a lieu durant l'Eo-Oligocène, il y a 40 Ma environ (Fitzgerald *et al.*, 1999). Plus tardivement (-30 Ma environ) la tectonique méditerranéenne viendra affecter les structures dans la partie orientale de la chaîne (Dubos, 2003).

Le résultat de cette histoire tectonique est la mise en place de la chaîne pyrénéenne selon une direction ONO-ESE. Sa structure interne est dite « en éventail », i.e. composée d'accidents à pendage sud au nord et à pendage nord au sud (Figure 2). Ainsi, les différentes unités et structures qui composent ou bordent la chaîne pyrénéenne sont, du nord au sud :

- le bassin d'avant-pays aquitain ;
- le chevauchement frontal nord-pyrénéen qui marque la frontière entre le bassin aquitain et la zone nord-pyrénéenne ;
- la zone nord-pyrénéenne constituée d'unités mésozoïques et cénozoïques ;
- la faille nord pyrénéenne qui marque la frontière entre la zone nord-pyrénéenne et la zone axiale ;
- la zone axiale constituée d'unités paléozoïques, vestiges de l'orogénèse hercynienne ;
- la zone sud-pyrénéenne constituée d'unités mésozoïques et cénozoïques ;
- le chevauchement frontal sud-pyrénéen qui marque la frontière entre la zone sud-pyrénéenne et le bassin de l'Èbre ;
- le bassin d'avant-pays de l'Èbre, où se retrouve la suture téthysienne.

La région de Lourdes se trouve dans la zone nord-pyrénéenne, bordée par le chevauchement frontal nord-pyrénéen au nord et la faille nord-pyrénéenne au sud.

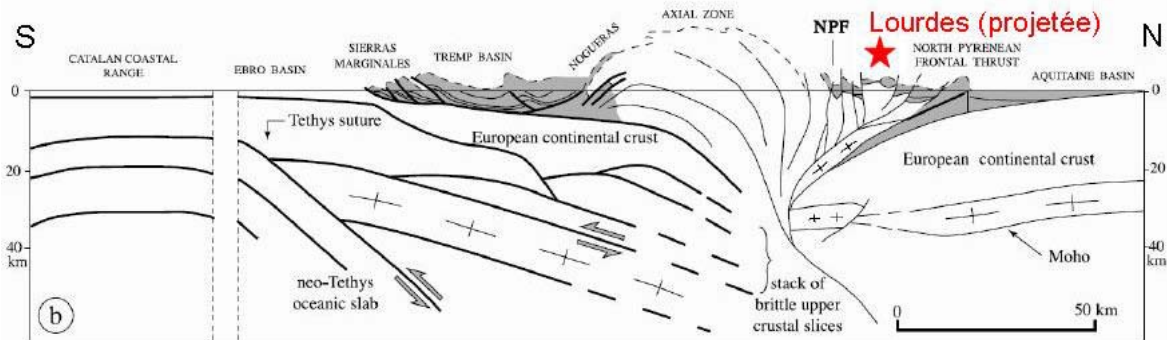


Figure 2 - Structure « en éventail » de la chaîne pyrénéenne le long d'une coupe transversale sud-nord (modifié d'après Sibuet et al., 2004, In Alasset, 2005).

## 2.4. SISMICITÉ

Les catalogues de sismicité comprennent à la fois des informations macrosismiques relatives aux séismes historiques (i.e. antérieur à 1900 et pour lesquels un complément d'investigations est parfois nécessaire) et des données plus précises de la période instrumentale. L'analyse de cette sismicité dans un rayon d'environ 100 km autour de la zone d'étude montre comment les mouvements actuels se distribuent dans le temps et dans l'espace.

La sismicité historique dans la région de Lourdes (Figure 3) se répartit sur une bande de direction approximative ONO-ESE qui passe au sud de la ville. Cinq événements importants ont secoué la région au cours des derniers siècles, qui sont (données SISFRANCE, <http://www.sisfrance.net/>, voir localisation Figure 3) :

- le séisme de Bagnères-de-Bigorre du 21 juin 1660 à 18 km de Lourdes ( $I_0 = \text{VIII-IX}$ ) ;
- le séisme de Juncalas du 24 mai 1750 à 5 km de Lourdes ( $I_0 = \text{VIII}$ ) ;
- le séisme d'Argelès-Gazost du 20 juillet 1854 à 7 km de Lourdes ( $I_0 = \text{VII-VIII}$ ) ;
- le séisme d'Arette du 13 août 1967 à 60 km de Lourdes ( $I_0 = \text{VIII}$ ) ;
- le séisme d'Arudy du 29 février 1980 à 23 km de Lourdes ( $I_0 = \text{VII-VIII}$ ).

Le séisme historique le plus violent ressenti à Lourdes est celui de Juncalas, du 24 mai 1750 ( $I_0 = \text{VIII-IX}$ ). Compte tenu des fortes incertitudes sur la localisation des séismes historiques, il n'est pas possible de relier avec certitude cet événement, ni aucun autre, à une faille active<sup>2</sup> de la région de Lourdes (Chevauchement frontal nord pyrénéen, faille de Lourdes, faille nord pyrénéenne). Ainsi, à l'inverse de ce que suggèrent Alasset et Meghraoui (2005), nous considérons qu'aucun élément ne permet de rattacher le séisme de Bagnères-de-Bigorre du 21 juin 1660 ( $I_0 = \text{VIII-IX}$ ), dont

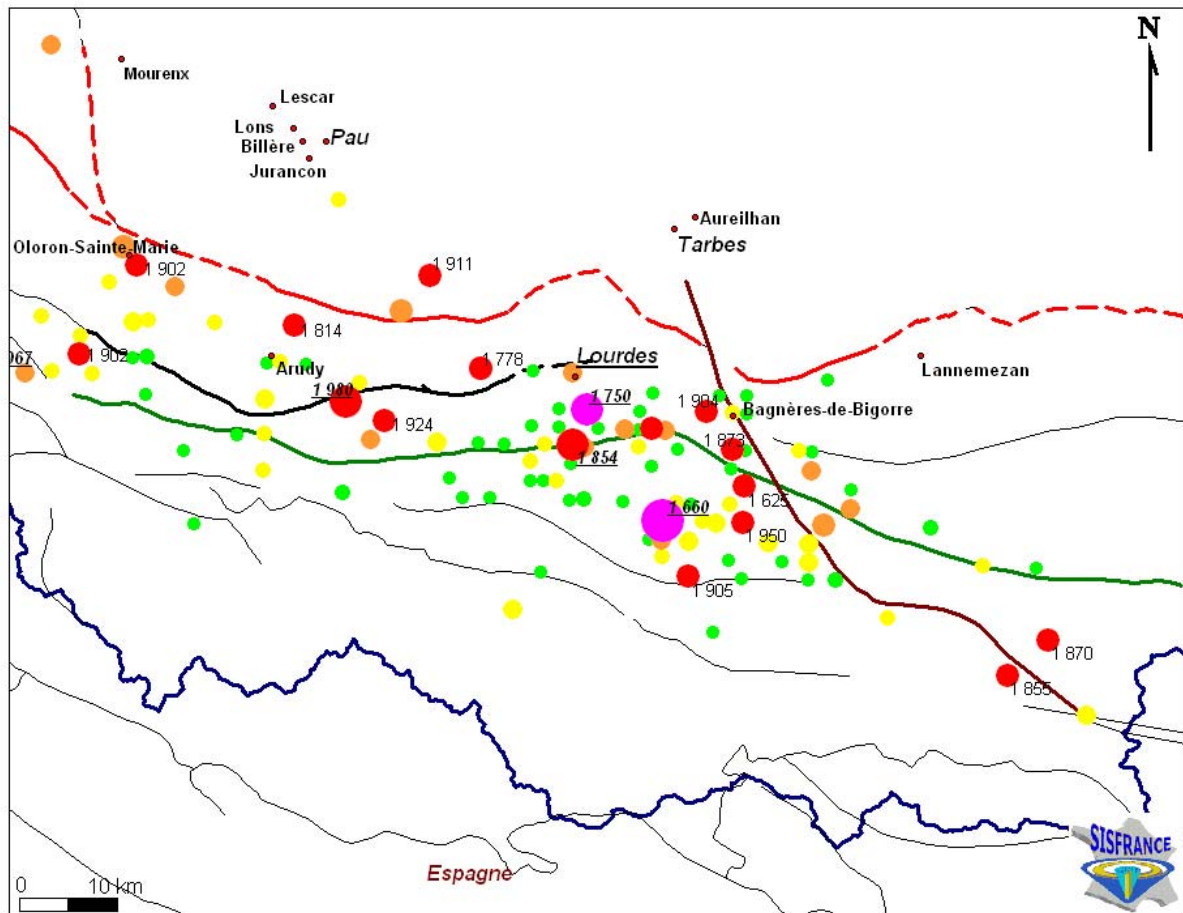
<sup>2</sup> Cf. glossaire.

l'épicentre a été localisé à une vingtaine de kilomètres au SE de Lourdes, à la faille de Lourdes qu'ils décrivent.

La sismicité instrumentale de la région de Lourdes enregistrée notamment par l'Observatoire Midi-Pyrénées de Toulouse depuis 1989 (Figure 4) (Dubos, 2003 ; Dubos *et al.*, 2004) montre une distribution hétérogène des événements le long de la chaîne pyrénéenne en plusieurs groupes. L'expérience Bigorre-2002 (Dubos, 2003) a permis de confirmer et de préciser la distribution hétérogène de la microsismicité. Ainsi, dans la région de Lourdes, les différents groupes de séismes sont les suivants (Figure 4) :

- le groupe d'Arudy montre des événements alignés dans la direction E-O, selon un pendage de 60 à 70° vers le nord, et jusqu'à une profondeur maximale de 17 km ;
- le groupe d'Aucun montre un essaim de séismes plongeant de 30° vers le nord jusqu'à une profondeur de 16 km ;
- le groupe de Lourdes montre un essaim de séismes, de part et d'autre de la faille nord-pyrénéenne, plongeant de 45° vers le nord jusqu'à une profondeur de 17 km ;
- le groupe de Bagnères-de-Bigorre montre des événements alignés dans la direction ONO-ESE, selon un pendage de 35° environ vers le NE, et jusqu'à une profondeur de 17-18 km.





**Intensité épiscoptrale (MSK)**

- VIII-IX
- VIII
- VII-VIII
- VII
- VI-VII
- VI
- V-VI
- V
- IV-V
- IV

**Failles majeures**

- Faille de Lourdes
- Faille de l'Adour
- Chevauchement frontal Nord Pyrénéen
- Faille Nord Pyrénéenne
- Autres failles
- ▭ Frontière

Figure 3 - Sismicité historique de la région de Lourdes (base de données SisFrance, [www.sisfrance.net](http://www.sisfrance.net)) et localisation des failles.

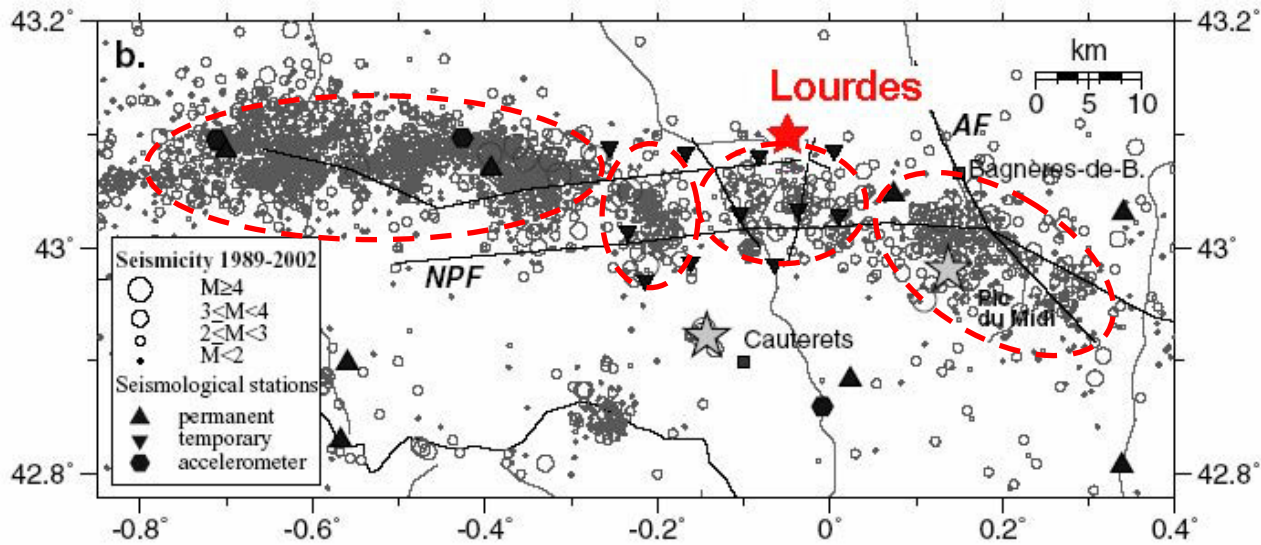


Figure 4 - Sismicité instrumentale de la région de Lourdes (modifié d'après Dubos et al., 2004) ; les zones pointillées délimitent, de la gauche vers la droite, le groupe d'Arudy, le groupe d'Aucun, le groupe de Lourdes et le groupe de Bagnères-de-Bigorre.

Ces données ont permis à Dubos (2003) d'identifier trois zones tectoniques distinctes :

- dans la région d'Arudy et plus à l'ouest, « une structure E-O plongeant à 70°N où les mécanismes au foyer ont une composante normale » ;
- à l'est de Lourdes, « une structure N110°E plongeant entre 30 et 50° vers le nord où les mécanismes ont une composante inverse » ;
- entre les deux, « une zone de transition de sismicité modérée et peu caractéristique ».

## 2.5. IDENTIFICATION DES FAILLES ACTIVES

L'identification des failles actives est généralement fondée sur la sismicité instrumentale et historique, l'interprétation morphostructurale des images satellitaires de type SPOT/Landsat, des photographies aériennes et des modèles numériques de terrain de type SRTM ou autre disponibles sur la région d'étude. Cette approche permet de sélectionner les accidents tectoniques majeurs les plus susceptibles de rejouer dans le futur et d'identifier dans les cas favorables leur extension, leur segmentation, leur géométrie et leur cinématique (e.g. Alasset, 2005 ; Alasset et Méghraoui, 2005). Le cas échéant, des reconnaissances de terrain permettent de préciser la géométrie et de caractériser le comportement sismogénique des failles actives identifiées par l'analyse des déformations des sédiments quaternaires et/ou des perturbations de la morphologie.

Dans le champ de contraintes identifié (compression horizontale maximale de direction NO-SE), les structures régionales majeures, chevauchement frontal nord-pyrénéen et faille nord pyrénéenne, sont susceptibles d'être réactivés en jeu transpressif<sup>3</sup> dextre. De plus, une étude sismotectonique récente réalisée par Alasset et Meghraoui (2005) a permis de mettre en évidence la faille de Lourdes, de direction E-O, de fort pendage (75° vers le nord) et qui s'étend sur 50 à 60 km à l'ouest de la ville (Figure 3). La trace en surface et le pendage de la faille de Lourdes décrite par Alasset (2005) coïncide avec la structure d'Arudy mise en évidence par l'expérience Bigorre-2002 (Dubos, 2003).

Les structures tectoniques régionales susceptibles d'être réactivées dans le tenseur des contraintes actuel à proximité de la ville de Lourdes sont donc (Figure 3) :

- le chevauchement frontal nord-pyrénéen, au nord de la ville ;
- la faille de Lourdes à l'ouest de la ville ;
- la faille nord-pyrénéenne au sud de la ville.

## **2.6. INDICES D'ACTIVITÉ NÉOTECTONIQUE OU PALÉOSISMOLOGIQUE**

### **2.6.1. La base de données NéoPal**

La base de donnée publique NéoPal (<http://www.neopal.net/>) recense les indices d'activité néotectonique et paléosismologique en France et fournit, pour chacun, un avis critique émis par un comité d'experts.

Dans la région de Lourdes, la base de données NéoPal recense un indice d'activité néotectonique, l'indice de Castet (numéro réf. NéoPal : 64175001), sur la commune du même nom (carte topo IGN 1546E au 1/25 000 et carte géologique BRGM 1051 au 1/50 000). Cet indice correspond à un déplacement vertical différentiel de plusieurs cm mis en évidence par comparaison de nivellements, entre 1904 et 1981, dans la région du séisme d'Arudy. Le comité des experts NéoPal note cependant que « l'observation n'est pas discutable mais (...) ne permet pas d'établir un lien précis avec la faille responsable du séisme d'Arudy ou toute autre structure potentiellement active. »

### **2.6.2. Données paléosismologiques**

Les travaux récents de Alasset (Alasset, 2005 ; Alasset et Meghraoui, 2005) fournissent des résultats nouveaux sur l'activité tectonique et paléosismologique de la faille de Lourdes. Des tranchées de paléosismologie montrent des décalages de structure interprétés comme des déformations cosismiques sur les segments central (Capbis) et oriental (Arcizac) de la faille de Lourdes. La datation d'échantillons prélevés

---

<sup>3</sup> Composante de mouvement inverse associée à une composante de mouvement décrochante.

dans ces tranchés a permis aux auteurs de proposer, pour les plus récents séismes observés, des âges compris entre :

- 5388 BC<sup>4</sup> et 2918 BC sur le segment de Capbis ;
- 3094 BC et 2398 BC sur le segment d’Arcizac.

Bien que ces résultats attestent de l’activité tectonique de la Faille de Lourdes, ils montrent que les temps de récurrence des ruptures de surface sur cet accident sont très longs (de l’ordre de plusieurs milliers d’années) au regard de l’échelle de temps du développement urbain (de l’ordre de plusieurs décennies). Par conséquent nous n’envisagerons pas la possibilité d’une rupture de surface le long de la faille de Lourdes dans la suite de cette étude.

## **2.7. STRUCTURE(S) SISMOGÉNIQUE(S) CRITIQUE(S) DANS LA RÉGION DE LOURDES**

Dans la région de Lourdes, trois structures régionales sont susceptibles d’être réactivées dans le champ de contrainte actuel et de produire des séismes importants :

- la faille nord pyrénéenne (FNP) ;
- la faille de Lourdes (FL) ;
- le chevauchement frontal nord pyrénéen (CFNP).

La FNP est une structure E-O de grande dimension, à fort pendage vers le nord, localisée à une vingtaine de kilomètres au sud de la ville de Lourdes. Dans le champ de contraintes actuel, cette structure est susceptible d’être réactivée en jeu inverse à décrochant dextre.

Les travaux récents d’Alasset (2005) et Alasset et Meghraoui (2005) fournissent une description relativement détaillée de la faille de Lourdes. Cette structure, de direction E-O, longue de 50 à 60 km et à fort pendage vers le nord, est constituée de 3 segments dont le plus oriental intersecte la commune de Lourdes. Les données sismotectoniques et paléosismologiques d’Alasset (2005) et Alasset et Meghraoui (2005) sur la faille de Lourdes montrent :

- des mouvements inverses sur des plans de faille à fort pendage vers le nord ;
- des mouvements normaux sur un plan de faille à fort pendage vers le sud, que les auteurs interprètent comme 1) une déformation en « flexural slip<sup>5</sup> » ou 2) un réajustement secondaire en jeux normal lié a une variation de pendage sur une faille inverse en profondeur (Figure 5, A et B respectivement).

---

<sup>4</sup> « Before Christ ».

<sup>5</sup> Verticalisation et inversion du pendage à proximité de la surface entraînant une inversion du jeu de la faille.

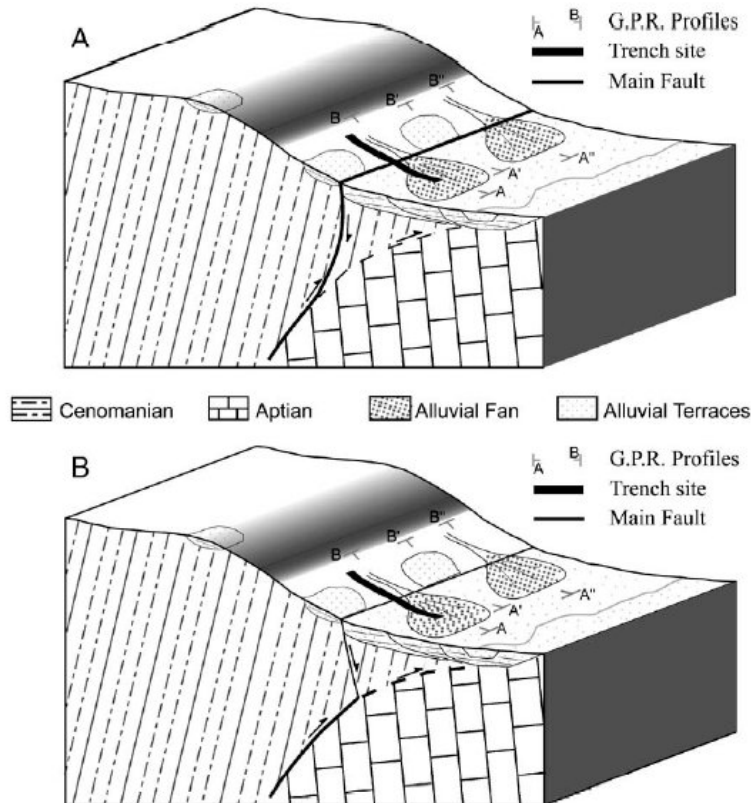


Figure 5 - Interprétation des mouvements normaux observés par Alasset et Meghraoui (2005) sur le segment de Capbis de la faille de Lourdes ; A) déformation de type « flexural slip » ; B) réajustement en faille normale en réponse à la variation de pendage d'une faille inverse en profondeur ; le nord est à gauche et le sud à droite.

En l'état actuel des connaissances, la faille de Lourdes, à fort pendage vers le nord et à jeu inverse, doit donc être considérée comme un rétro-chevauchement connecté sur une structure principale qui est le chevauchement frontal nord pyrénéen. Dans ce contexte, la déformation attendue sur la faille de Lourdes est sensiblement inférieure à celle du CFNP. Ainsi, en raison de son extension géographique (structure de grande dimension s'étendant en profondeur sous la ville de Lourdes) et de son importance probable dans le contexte sismotectonique régional, nous considérons que le CFNP est la structure sismogénique la plus critique pour la ville de Lourdes). D'autres structures actives lui sont associées, que nous considérons moins critiques pour la ville de Lourdes en raison de leur éloignement (faille nord pyrénéenne) ou de leur moindre degré d'activité (faille de Lourdes). Nous déduisons de cette approche un séisme de référence qui sera placé en position la plus pénalisante pour la ville de Lourdes comme nous le verrons à l'issue du paragraphe 2.9. Le séisme de référence pris en compte dans le cadre du microzonage sismique de Lourdes est placé à la connection entre la faille de Lourdes et le chevauchement frontal nord pyrénéen.

## 2.8. APPROCHE STATISTICO-HISTORIQUE

### 2.8.1. Historique des mouvements sismiques dans la région de Lourdes

Pour une analyse statistique des données de sismicité sur la ville de Lourdes, il a été nécessaire de synthétiser l'ensemble des séismes historiques ressentis sur la commune. Les données utilisées pour réaliser cette synthèse sont extraites de la base de données de sismicité historique de la France « SisFrance » ([www.sisfrance.net](http://www.sisfrance.net)) gérée et mise à jour annuellement par le BRGM. A chaque séisme répertorié dans cette base de données sont associés différents paramètres :

- intensité épacentrale selon l'échelle MSK<sup>6</sup> ;
- localisation ;
- intensité ponctuelle ressentie à Lourdes.

Un indice de qualité accompagne chacun de ces paramètres. En ce qui concerne la localisation de l'épicentre, l'indice de qualité peut prendre les valeurs suivantes :

- A : (quelques km) – précise dans une aire d'intensité maximale bien circonscrite par une isoséiste ;
- B : (autour de 10 km) – assez sûre ;
- C : (entre 10 et 20 km) – imprécise ;
- D : (de quelques km à 50 km) – fortement supposée ;
- E : (supérieure à 50 km) – arbitraire ;
- I : épicentre situé sur l'unique observation.

Pour les indices de qualité des intensités, les valeurs possibles sont les suivantes :

- A : sûre ;
- B : assez sûre ;
- C : incertaine ;
- K : assez sûre, issue d'un calcul fondé sur une loi d'atténuation (Sponheuer) ;
- E : arbitraire.

Pour cette étude, nous nous sommes intéressés aux séismes ayant produit une intensité supérieure ou égale à IV MSK sur la commune de Lourdes. Les évènements ainsi répertoriés sont listés dans le Tableau 1 par intensité observée ou extrapolée décroissante, avec, pour chaque séisme, sa date, sa localisation en coordonnées

---

<sup>6</sup> Voir glossaire.

sexagésimales, l'intensité épicentrale  $I_0$ , l'indice de qualité sur la détermination de l'intensité épicentrale, l'intensité observée sur la commune de Lourdes  $I_{obs}$  et l'indice de qualité sur la détermination de  $I_{obs}$ . Pour certains séismes, l'intensité MSK est tirée directement de la base SisFrance alors que, pour d'autres, elle a été évaluée en interpolant les valeurs d'intensité connues sur les communes voisines. Nous différencions ces cas en qualifiant l'intensité  $I_{obs}$  d'intensité « évaluée ».

Certains séismes recensés dans SisFrance ne sont pas mentionnés comme ayant été ressentis sur la commune de Lourdes. Cela ne signifie pas qu'ils n'aient pas été ressentis mais plutôt qu'il n'existe pas de témoignage décrivant les effets de ce séisme sur la population ou le bâti. Ces séismes ont également été pris en compte dans cette étude par le biais d'une recherche sur les événements les plus importants ressentis sur un rayon de 30 km autour de la commune de Lourdes. Cette recherche complémentaire a permis d'extraire 25 séismes additionnels ayant manifestement été ressentis sur la commune au vu des intensités ponctuelles relevées sur les communes voisines : leur intensité a été qualifiée d' « évaluée ».

La qualité de localisation de l'épicentre et de l'intensité épicentrale est très variable (indices allant de A à I), mais la majeure partie des séismes recensés présentent une localisation avec un indice de qualité compris entre A et D. Nous avons tenu à prendre en compte les séismes dont la localisation de l'épicentre est de qualité E ou I car ils peuvent s'appuyer sur des observations sûres même si les caractéristiques du séisme lui-même sont incertaines. Il s'agit généralement des séismes d'intensité inférieure ou égale à V MSK : ils ne sont donc pas essentiels pour le calcul de la période de retour et la détermination du séisme de référence.

La qualité de la détermination de l'intensité ressentie sur la commune de Lourdes, quant à elle, va de A à C, avec une majorité de séismes entre A et B pour les séismes recensés directement par la base SisFrance.

Date	Longitude épicentre (°E) (sexagésimal)	Latitude épicentre (°N) (sexagésimal)	Indice de qualité de localisation de l'épicentre	Intensité observée à Lourdes $I_{obs}$ (MSK) <sup>7</sup>	Indice de qualité $I_{obs}$	Intensité épicentrale $I_0$ (MSK) <sup>7</sup>	Indice de qualité $I_0$	Localisation de l'épicentre
24/05/1750	-0.02	43.04	B	8	B	8	B	Juncalas
21/06/1660	0.04	42.58	B	7.5	B	8.5	C	Bagnères de Bigorre
20/07/1854	-0.03	43.02	A	7	A	7.5	A	Argelès-Gazost
04/02/1665	-0.03	43.06	E	7	C	7	E	Lourdes
17/11/1850	-0.1	43.06	B	6.5	évaluée	7	B	St Pé de Bigorre
07/06/1778	-0.1	43.06	D	6.5	évaluée	7	C	St Pé de Bigorre

<sup>7</sup> L'intensité est une échelle discrète. Cependant, les effets observés se trouvent parfois à la frontière de deux degrés d'intensité consécutifs. L'intensité VI-VII, par exemple, décrit un séisme dont l'intensité est comprise entre VI et VII. Par souci de simplification, cette intensité est notée 6.5 dans ce tableau.

Date	Longitude épicentre (°E) (sexagésimal)	Latitude épicentre (°N) (sexagésimal)	Indice de qualité de localisation de l'épicentre	Intensité observée à Lourdes $I_{obs}$ (MSK) <sup>7</sup>	Indice de qualité $I_{obs}$	Intensité épicentrale $I_0$ (MSK) <sup>7</sup>	Indice de qualité $I_0$	Localisation de l'épicentre
13/07/1904	0.07	43.04	B	6	C	7	A	Bagnères de Bigorre
26/11/1873	0.09	43.02	A	6	évaluée	7	A	Bagnères de Bigorre
26/10/1862	-0.03	43.06	D	6	A	6	C	Lourdes
22/05/1814	-0.24	43.08	C	6	B	7	B	Arudy
24/07/1911	-0.14	43.11	B	5.5	évaluée	7	B	Benejacq-Coarraze
06/05/1902	-0.4	43.06	C	5.5	B	7	B	Lurbe St Christau
17/05/1867	0	43	E	5.5	C	6	E	Bigorre
28/09/1981	-0.13	43.02	B	5	A	5	B	Ferrières
29/02/1980	-0.2	43.04	A	5	A	7.5	A	Arudy
13/12/1973	-0.16	43.09	A	5	B	6.5	B	Nay Bourdettes
14/02/1966	-0.03	43.06	I	5	B	5	I	Lourdes
13/10/1953	0.15	43.01	A	5	B	6	B	Campan
05/04/1952	0.04	42.57	B	5	B	6	B	Argelès-Gazost
25/01/1952	0.04	42.56	B	5	B	5	B	Préchac
31/01/1950	0.1	42.58	C	5	A	7	B	Campan
22/02/1924	-0.17	43.03	A	5	B	7	A	Arthez d'Asson
04/04/1915	-0.03	43.06	I	5	B	5	I	Lourdes
28/07/1905	0.06	42.55	D	5	A	7	E	Bagnères de Bigorre
16/06/1897	-0.03	43.06	D	5	A	5	C	Lourdes
19/05/1897	-0.03	43.06	D	5	A	5	C	Lourdes
08/01/1892	0.04	43.03	D	5	évaluée	6	C	Bagnères de Bigorre
15/01/1870	0.33	42.52	C	5	évaluée	7	C	Luchon
05/12/1855	0.3	42.5	C	5	évaluée	7	B	Neste d'Oueil
31/03/1843	0.09	43.04	I	5	évaluée	6	I	Bagnères de Bigorre
28/10/1835	0.16	42.58	D	5	évaluée	6.5	E	Gèdre
16/05/2002	-0.11	42.58	A	4.5	évaluée	6	B	Aucun
16/10/1990	-0.04	43.02	A	4.5	B	4	A	Argelès-Gazost
19/09/1973	-0.15	43.03	B	4.5	évaluée	5	B	Arthez d'Asson
13/08/1967	-0.47	43.05	A	4.5	B	8	A	Arette
29/08/1964	0.03	42.5	B	4.5	B	5.5	B	Luz St Sauveur
25/11/1958	0.22	43	B	4.5	évaluée	6.5	B	Hèches
03/05/1952	-0.03	43.06	I	4.5	B	4.5	I	Lourdes
26/02/1952	-0.03	43.06	D	4.5	B	4.5	C	Lourdes
16/03/1948	0.01	43.03	B	4.5	B	6	B	Cheust-Juncalas
04/10/1930	-0.07	42.53	D	4.5	A	5	B	Cauterets
13/04/1897	-0.03	43.06	D	4.5	B	4.5	C	Lourdes
19/07/1868	-0.07	42.53	D	4.5	évaluée	5.5	C	Cauterets
11/12/1866	-0.1	43.06	I	4.5	évaluée	5	I	St Pé de Bigorre



Date	Longitude épicode (°E) (sexagésimal)	Latitude épicode (°N) (sexagésimal)	Indice de qualité de localisation de l'épicode	Intensité observée à Lourdes $I_{obs}$ (MSK) <sup>7</sup>	Indice de qualité $I_{obs}$	Intensité épicode $I_0$ (MSK) <sup>7</sup>	Indice de qualité $I_0$	Localisation de l'épicode
22/02/1852	0.38	42.25	E	4.5	évaluée	7	E	Ribagorza (Espagne)
12/12/2002	-0.17	43.04	A	4	évaluée	5	A	Arthez d'Asson
16/05/2002	-0.08	43	A	4	B	5	A	Sireix
28/11/1998	-0.1	43.03	B	4	A	5	A	Argelès-Gazost
06/01/1989	0.12	42.57	A	4	B	5.5	A	Campan
12/11/1987	-0.1	43.03	C	4	B	4	B	Argelès-Gazost
11/11/1987	-0.16	43.03	B	4	B	4	B	Arthez d'Asson
08/02/1985	0.1	42.58	C	4	évaluée	5	C	Beaudan
23/02/1984	0.07	42.58	C	4	B	5	B	Bagnères de Bigorre
19/07/1981	0.11	42.58	B	4	A	5	B	Bagnères de Bigorre
20/05/1966	0.28	42.56	B	4	évaluée	6	B	Gourdan- Polignan
24/09/1964	-0.03	43.06	I	4	B	4	I	Lourdes
15/01/1961	-0.06	43.03	B	4	B	4	B	Salles
05/08/1960	-0.06	43.01	B	4	B	5	B	Argelès-Gazost
26/12/1943	0.15	42.56	B	4	B	5.5	B	Arreau
28/09/1943	0.02	43.02	B	4	B	5	B	Gazost
05/02/1933	0.03	43.01	D	4	A	4	B	Pic du Midi de Bigorre
13/10/1930	-0.02	43.02	B	4	A	6	B	Argelès-Gazost
28/06/1930	-0.05	43.02	D	4	B	5	B	Argelès-Gazost
07/01/1927	0.01	42.59	D	4	B	4	B	Argelès-Gazost
15/06/1925	-0.03	43.01	D	4	B	4	B	Gazost
23/10/1924	0.09	43.04	D	4	B	5	C	Bagnères de Bigorre
19/11/1923	0.5	42.42	C	4	A	8	B	Val d'Aran
10/07/1923	-0.55	42.38	B	4	A	7.5	B	Berdun (Espagne)
29/11/1919	0.5	42.31	D	4	A	6	B	Val d'Aran
15/09/1912	-0.33	42.35	E	4	B	6.5	E	Jaca (Espagne)
31/12/1911	-0.03	42.59	D	4	B	4	B	Argelès-Gazost
28/03/1906	-0.06	43.06	D	4	B	4	B	Lourdes
08/09/1902	-0.36	43.11	D	4	évaluée	7	C	Oloron Ste Marie
28/03/1902	-0.04	43.03	D	4	B	4	C	Lourdes

Date	Longitude épicentre (°E) (sexagésimal)	Latitude épicentre (°N) (sexagésimal)	Indice de qualité de localisation de l'épicentre	Intensité observée à Lourdes lobs (MSK) <sup>7</sup>	Indice de qualité lobs	Intensité épicentrale IO (MSK) <sup>7</sup>	Indice de qualité IO	Localisation de l'épicentre
15/07/1901	0.04	43.03	D	4	B	4	B	Bagnères de Bigorre
05/05/1896	0.06	42.57	D	4	évaluée	5.5	E	Bagnères de Bigorre
08/01/1892	0.03	43.02	D	4	évaluée	5	C	Argelès-Gazost
30/12/1883	-0.06	43	I	4	évaluée	5	I	Argelès-Gazost
11/09/1869	0.05	42.59	D	4	évaluée	5	C	Bagnères de Bigorre
09/05/1867	0.09	43.04	I	4	évaluée	5	I	Bagnères de Bigorre
11/09/1848	0.09	43.04	I	4	évaluée	5	I	Bagnères de bigorre

Tableau 1- Liste des différents séismes ayant été ressentis sur la commune de Lourdes avec une intensité supérieure ou égale à IV. Les latitudes et longitudes sont en degrés sexagésimaux.

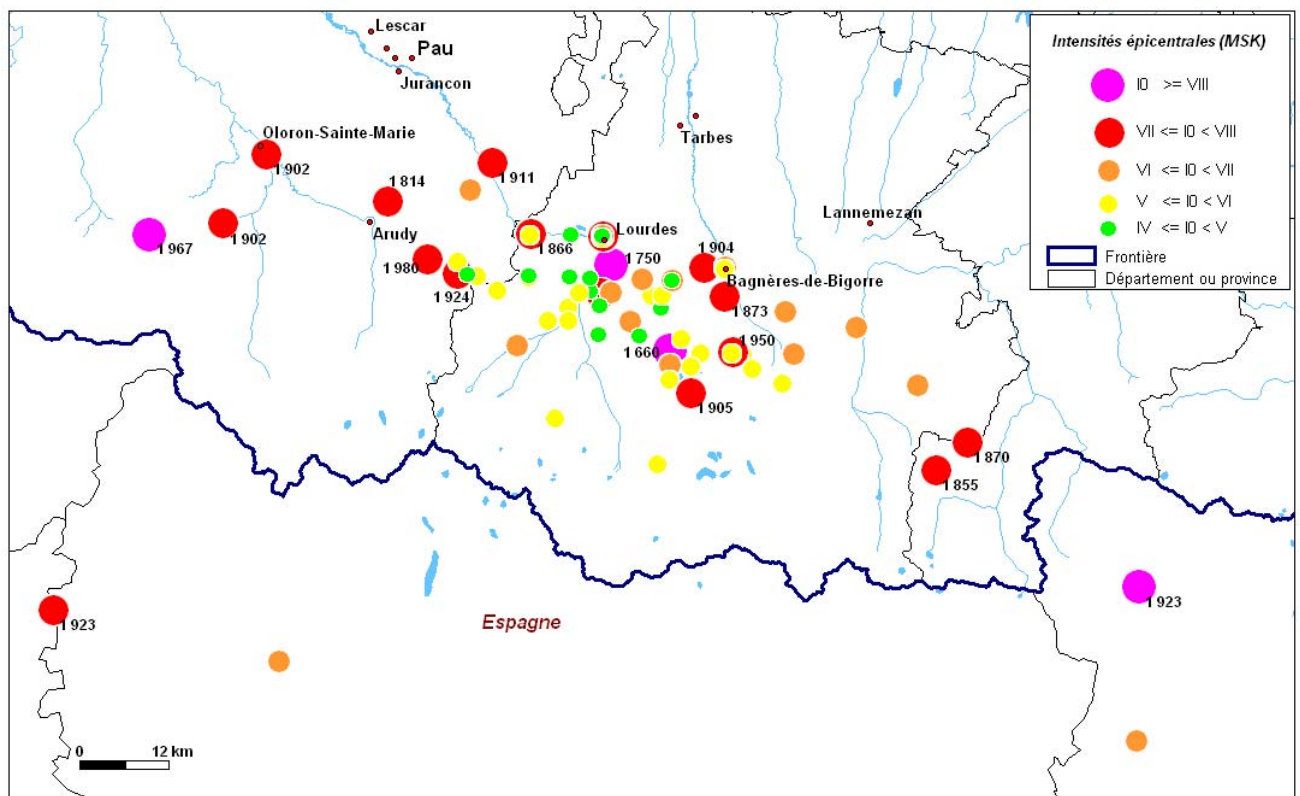


Figure 6 - Localisation et intensité épicentrale des différents séismes ayant été ressentis sur la commune de Lourdes avec une intensité supérieure ou égale à IV (source SisFrance, 2006 ; [www.sisfrance.net](http://www.sisfrance.net) ).

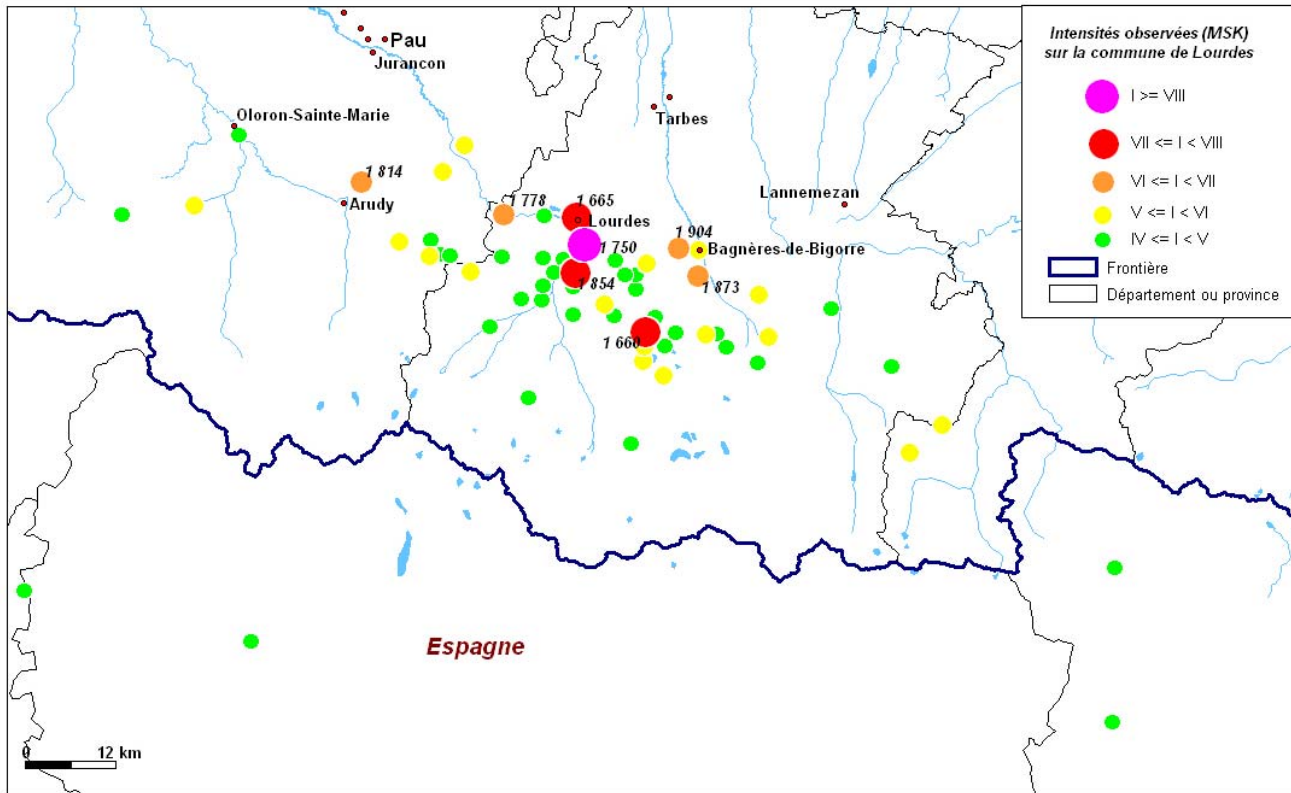


Figure 7 - Intensités observées sur la commune de Lourdes pour les différents séismes listés dans le Tableau 1 et ressentis sur la commune avec une intensité supérieure ou égale à IV (source SisFrance, 2006 ; [www.sisfrance.net](http://www.sisfrance.net)). Les intensités ressenties ont été représentées au niveau de l'épicentre du séisme correspondant pour une meilleure lecture de la carte.

### 2.8.2. Détermination des périodes de retour pour chaque intensité seuil

L'analyse des données de la base SisFrance montre qu'au moins 81 séismes ont induit une intensité supérieure ou égale à IV MSK (Tableau 2) et au moins un séisme, le séisme de Juncal du 24 mai 1750, a induit une intensité supérieure ou égale à VIII MSK sur la commune de Lourdes. Le Tableau 2 synthétise le nombre de séismes ressentis avec une intensité supérieure ou égale à une intensité seuil  $I_{seuil}$  sur la commune de Lourdes pour des intensités allant de IV à VIII MSK.

Cette analyse permet de déduire une période de retour pour chaque classe d'intensité. Pour cela, il est nécessaire de définir une date d'exhaustivité à partir de laquelle on peut considérer que l'échantillon d'événements est complet. En effet, la période de retour  $T$  d'une intensité  $I_{seuil}$  sera d'autant plus fiable que le recensement des événements d'intensité supérieure ou égale à  $I_{seuil}$  est exhaustif, c'est-à-dire que l'on dispose de toutes les données. Par conséquent, si le nombre d'événements est faible sur la période considérée, comme c'est le cas ici pour les séismes d'intensité supérieure ou égale à VII MSK, la valeur obtenue pour la période de retour sera entachée d'une forte incertitude.

$I_{\text{seuil}}$ (MSK)	Nombre de séismes induisant une intensité supérieure ou égale à $I_{\text{seuil}}$
IV	81
V	31
VI	10
VII	4
VIII	1

Tableau 2 - Nombre de séismes ayant induit une intensité supérieure ou égale à  $I_{\text{seuil}}$  sur la commune de Lourdes.

Dans le cadre du projet européen ISARD, une analyse historique de la sismicité des Pyrénées a permis de définir des dates d'exhaustivité pour les seuils d'intensité IV à VIII MSK (Secanell *et al.*, 2006) adaptées au contexte pyrénéen. Ces dates ont été utilisées dans le cadre du microzonage sismique de Lourdes et ont permis de calculer les périodes de retour et les incertitudes associées indiquées dans le Tableau 3. Pour l'intensité seuil de VIII MSK, nous ne disposons que d'un seul séisme (séisme de Juncalas du 24 mai 1750) : le calcul de la période de retour n'a donc pas de sens dans ce cas.

$I_{\text{seuil}}$ (MSK)	IV	V	VI	VII	VIII
Date d'exhaustivité	1965	1880	1830	1750	1420
Période de retour T (ans)	$2.25 \pm 0.15$	$7 \pm 0.4$	$36.8 \pm 7.4$	$170.6 \pm 85.4$	-

Tableau 3 - Périodes de retour sur la commune de Lourdes pour des seuils d'intensité compris entre IV et VII MSK calculées à partir des données SisFrance et des dates d'exhaustivité retenue pour la région pyrénéenne (Secanell *et al.*, 2006)

À partir de ces résultats, nous avons pu obtenir la distribution de la probabilité de dépassement annuel (soit l'inverse de la période de retour T) en fonction de l'intensité ressentie sur la commune de Lourdes (Figure 8). Sur cette figure, nous voyons que, pour une période de retour de 475 ans (soit une probabilité annuelle de dépassement de  $1/475 = 0.0021$  ou, autrement dit, une probabilité de dépassement de 10 % sur 50 ans), une intensité ressentie de l'ordre de VIII MSK paraît tout à fait raisonnable, ce qui correspond à l'intensité observée pour le séisme de Juncalas de 1750.

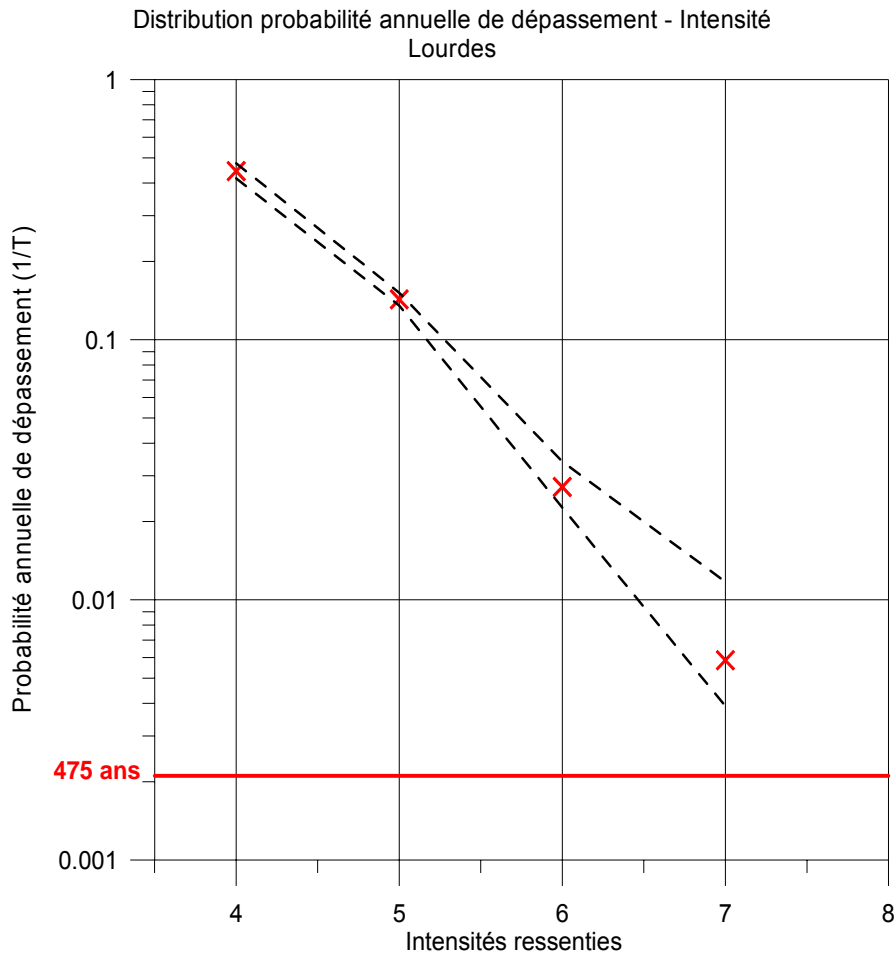


Figure 8 - Distribution de la probabilité annuelle de dépassement en fonction de l'intensité sur la commune de Lourdes (croix rouges). Les lignes pointillées indiquent les incertitudes associées aux valeurs obtenues et la droite rouge correspond à une période de retour de 475 ans.

## 2.9. COMPARAISON AVEC LES ÉTUDES PROBABILISTES

Nous avons comparé les niveaux d'accélération obtenus avec les études probabilistes réalisées dans le cadre du projet ISARD (Secanell *et al.*, 2006 ; Figure 9) et dans le cadre de l'établissement du nouveau zonage d'aléa sismique probabiliste français (Le Brun et Imbault, 2003 ; Figure 10). Pour ces deux études, les valeurs d'accélération obtenues sont de l'ordre de 0,2 g sur la ville de Lourdes pour une période de retour de 475 ans, soit la valeur obtenue pour les spectres de réponse de la Figure 12.

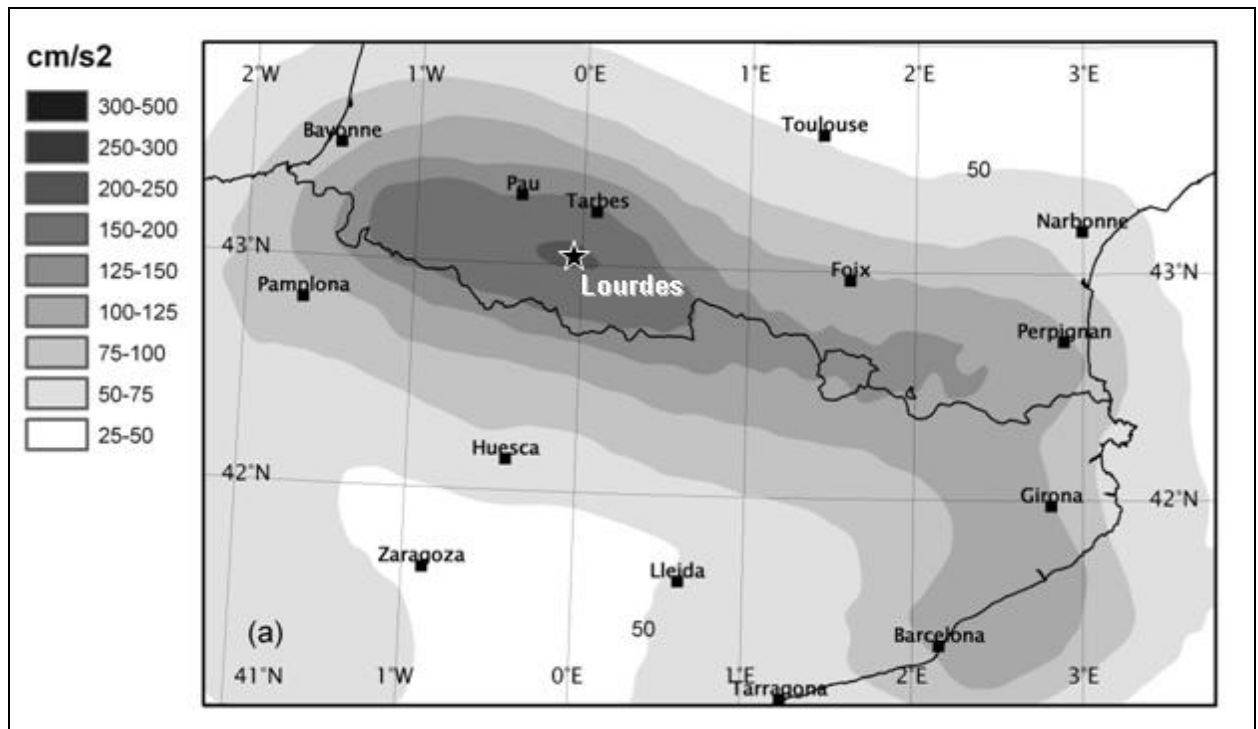


Figure 9 - Aléa sismique probabiliste sur la région pyrénéenne d'après Secanell et al., 2006. PGA médian pour une période de retour de 475 ans.

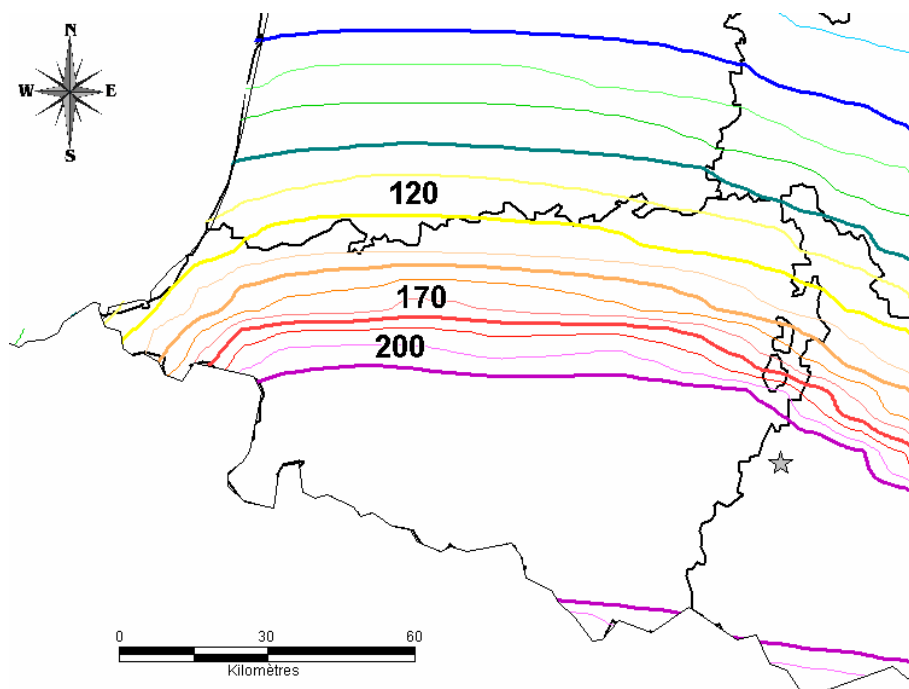


Figure 10 - Carte des isovaleurs médianes des accélérations en  $\text{cm/s}^2$  pour une période de retour de 475 ans (d'après Le Brun et Imbault, 2003). L'étoile symbolise la ville de Lourdes.

À titre comparatif, le zonage sismique de la France actuel donné par l'annexe du décret du 14 mai 1991, indique que la commune de Lourdes est classée en zone de sismicité II. Cela correspond, d'après l'arrêté du 29 mai 1997 relatif aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la catégorie dite « à risque normal », à un niveau d'accélération nominale de 0,25 g pour les bâtiments de classe B. La différence notable entre le niveau d'accélération forfaitaire de 0,25 g et l'accélération de 0,2 g obtenue à partir de la définition d'un séisme de référence (Figure 12) peut s'expliquer par différents facteurs. Tout d'abord, cette valeur de 0,25 g correspond à un niveau forfaitaire défini par la puissance publique dans les recommandations AFPS90 puis repris dans les règles parasismiques PS92 (AFNOR, 1995). C'est donc un niveau d'accélération conservatif et non calculé. D'autre part, les données de base ayant conduit à ces niveaux forfaitaires ont largement évolué depuis lors puisque le zonage sismique définissant les zones de sismicité en vigueur repose sur des données antérieures à 1984 alors que les travaux récents (Le Brun et Imbault, 2003) sont basés sur le catalogue de sismicité SisFrance prenant en compte des données allant jusqu'en 2002.

## 2.10. DÉFINITION DU SÉISME DE RÉFÉRENCE

L'analyse du contexte sismotectonique régional, l'analyse statistico-historique de la sismicité sur la commune de Lourdes et les travaux d'évaluation probabiliste de l'aléa sismique indiquent qu'un séisme similaire au séisme de Juncalas du 24 mai 1750 en termes d'intensité épiscopale et de mouvements associés, relié au chevauchement Nord-Pyrénéen, présenterait la source sismogénique à prendre en compte pour le microzonage sismique de la commune de Lourdes.

Pour la suite de l'étude, nous considérerons donc comme séisme de référence un séisme localisé sur le chevauchement frontal Nord-Pyrénéen avec une intensité épiscopale  $I_0$  de VIII MSK. Ce séisme est placé à l'aplomb de la ville, à la jonction entre la faille de Lourdes et le chevauchement frontal nord-pyrénéen, soit à 12 km de profondeur.

Formellement, la distance épiscopale ou distance au tracé supposé de la rupture de la faille en surface prise en compte pour les calculs des mouvements sismiques de référence varie en fonction du lieu où l'on se trouve sur la commune de Lourdes. Cependant, pour simplifier la carte qui découlera de cette étude, il a été décidé de ne définir qu'un seul mouvement sismique de référence au rocher horizontal affleurant, valable sur l'ensemble de la commune. **La projection supposée de la faille de Lourdes en surface étant localisée autour de la gare, c'est-à-dire en plein centre ville, nous avons considéré pour la suite de l'étude une distance épiscopale de 3 km correspondant au déport dû au pendage de la faille de Lourdes (75° vers le Nord selon Alasset et Meghraoui, 2005) par rapport à ce point central.**

L'estimation de la magnitude macrosismique  $M$  pour ce séisme de référence a été faite à l'aide de l'équation de Levret *et al.* (1994) :

$$M = 0.44I_0 + 1.48\log_{10}R + 0.48$$

où  $R$  représente la distance focale.

On obtient alors une magnitude macrosismique de 5.8. Les caractéristiques du séisme de référence ainsi défini sont synthétisées dans le Tableau 4.

	Séisme de référence
Intensité épiscoptrale $I_0$ (MSK)	VIII
Magnitude ( $M_s = M_I$ )	5.7
Magnitude ( $M_w$ )	5.8
Profondeur focale (km)	12
Distance épiscoptrale (km)	3
Distance focale (km)	13

Tableau 4 - Source retenue pour la détermination des mouvements sismiques au rocher horizontal affleurant sur la commune de Lourdes.

## 2.11. SPECTRE DE RÉPONSE ÉLASTIQUE AU ROCHER

La combinaison de l'étude du contexte sismotectonique régional, de l'analyse statistico-historique de la sismicité et des travaux d'évaluation probabiliste de l'aléa sismique nous ont amenés à considérer comme séisme de référence un séisme de magnitude  $M_s = 5.7$  sur le chevauchement nord-pyrénéen, à la jonction avec la faille de Lourdes, à une distance épiscoptrale de 3 km et à une profondeur de 12 km.

Le calcul du spectre de réponse est entrepris au rocher horizontal affleurant, c'est-à-dire pour des conditions standard de sols, c'est-à-dire sans atténuation ni amplification du mouvement du sol. Pour ces calculs spectraux, nous avons utilisé différentes lois d'atténuation adaptées au contexte sismotectonique local et avec des domaines de validité correspondant aux paramètres retenus pour le séisme de référence, à savoir :

- RFS 2001 : cette loi utilise 965 enregistrements provenant de divers pays européens et de Californie. Les paramètres pris en compte sont les suivants :
  - la magnitude locale,  $M_l$ , variant de 4.0 à 7.3,
  - la distance focale,  $R_h$ , variant de 5 à 100 km,
  - la catégorie de sol (rocher altéré/sol raide ; ou sol) ;
- Sadigh *et al.*, 1997 : cette loi utilise 964 enregistrements de séismes superficiels enregistrés en Californie. Les paramètres pris en compte sont les suivants :
  - la magnitude de moment,  $M_w$ , variant de 3.8 à 7.4,
  - la plus courte distance au plan de faille,  $R_z$ , variant de 3 à 200 km,
  - la catégorie de sol (rocher altéré/sol raide ; ou sol),
  - le type de faille (décrochement/normal ; inverse) ;



- Campbell et Bozorgnia, 2003 : cette loi utilise 1403 enregistrements mondiaux. Les paramètres pris en compte sont les suivants :
  - la magnitude de moment,  $M_w$ , variant de 4.7 à 7.7,
  - la plus courte distance au plan de faille,  $R_z$ , variant de 1 à 60 km,
  - la catégorie de sol (rocher ; rocher altéré ; sol raide ; ou sol),
  - le type de faille (décrochement ; chevauchement ; faille inverse).

Les spectres au rocher horizontal affleurant calculés à partir de ces trois lois d'atténuation, pour le séisme de référence (Tableau 4), sont présentés sur la Figure 11. Le spectre au rocher horizontal affleurant qui en est déduit pour la suite du microzonage sismique de Lourdes est présenté sur la Figure 11 pour un amortissement de 5 % et sur la Figure 12 pour des amortissements de 2 %, 5 %, 10 % et 20 %. Le pga (Peak Ground Acceleration) obtenu par cette méthode est de 0,2 g. Les valeurs de déplacement, vitesse et accélération sont donnés pour des amortissements de 2 %, 5 %, 10 % et 20 % dans le Tableau 5.

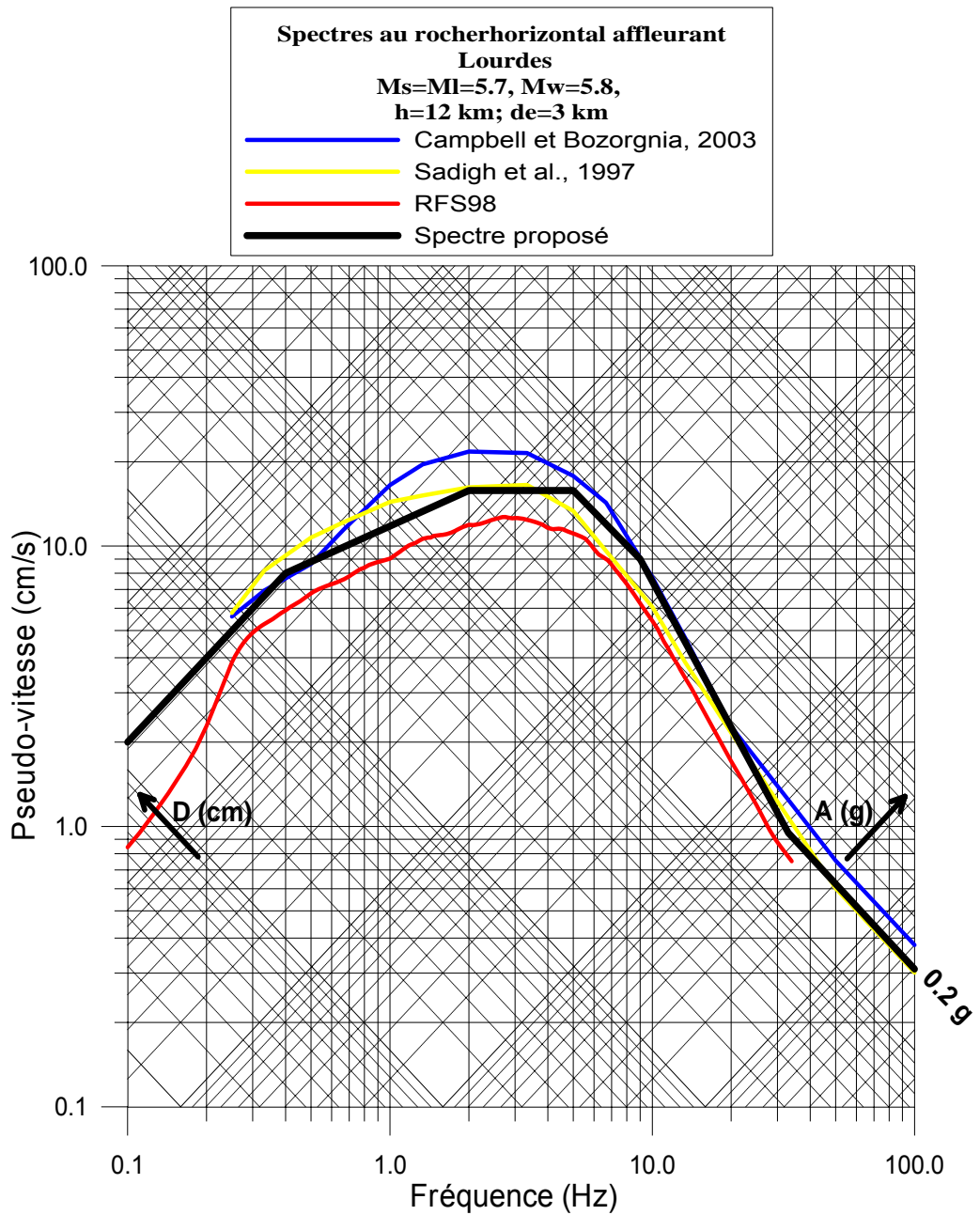


Figure 11 - Spectre de réponse au rocher horizontal affleurant proposé pour le microzonage sismique de Lourdes à 5 % d'amortissement. Comparaison avec les spectres de réponse calculés à partir des lois d'atténuation citées dans le paragraphe précédent.

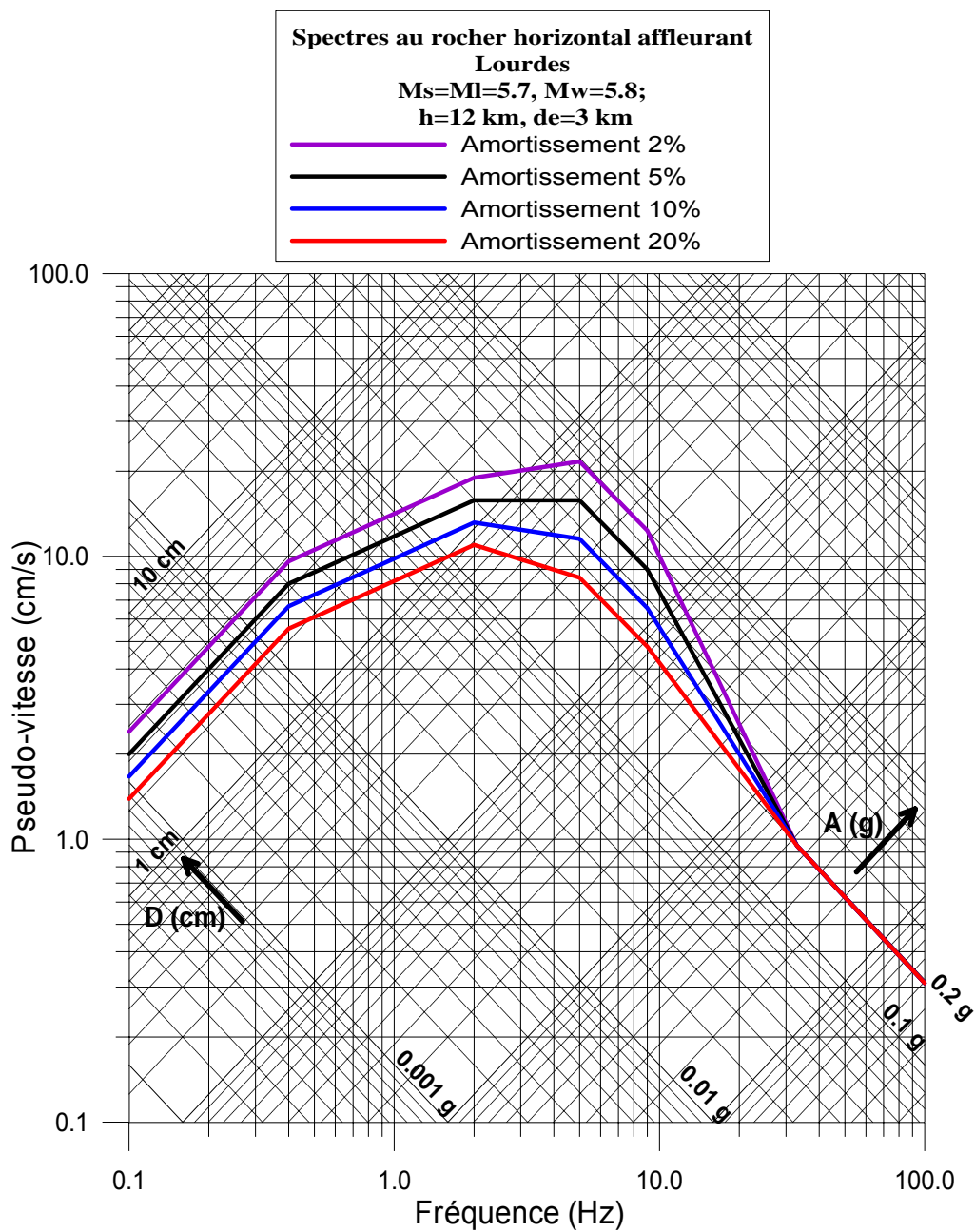


Figure 12 - Spectre de réponse au rocher horizontal affleurant utilisé pour le microzonage sismique de Lourdes pour différents amortissements.

Fréquence (Hz)	Amortissement (%)	Accélération (g)	Vitesse (cm/s)	Déplacement (cm)
0.1	2	0.0015	2.4	3.8
	5	0.0013	2	3.2
	10	0.0011	1.7	2.6
	20	0.00089	1.4	2.2
0.4	2	0.025	9.6	3.8
	5	0.02	8	3.2
	10	0.017	6.7	2.6
	20	0.014	5.5	2.2
2	2	0.24	19	1.5
	5	0.2	15.8	1.3
	10	0.17	13.2	1
	20	0.14	11	0.87
5	2	0.69	21.6	0.69
	5	0.5	15.8	0.5
	10	0.37	11.5	0.37
	20	0.27	8.4	0.27
9	2	0.71	12.3	0.22
	5	0.52	9	0.16
	10	0.38	6.6	0.12
	20	0.28	4.8	0.08
33	2	0.2	0.95	0.0046
	5	0.2	0.95	0.0046
	10	0.2	0.95	0.0046
	20	0.2	0.95	0.0046
100	2	0.2	0.31	0.00049
	5	0.2	0.31	0.00049
	10	0.2	0.31	0.00049
	20	0.2	0.31	0.00049

Tableau 5 - Spectre de réponse élastique horizontal du séisme de référence au rocher horizontal affleurant. Valeurs de A, V et D.



## 3. Contexte géologique

### 3.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE DE LA COMMUNE

#### 3.1.1. Les formations anciennes

La ville de Lourdes est située au pied des Pyrénées, au sein des formations calcaires et marneuses du Jurassique et du Crétacé. Ces dernières sont limitées au sud par les formations de schistes métamorphiques et de granites du Primaire de la zone axiale et au nord par les formations plus récentes des molasses tertiaires qui forment le plateau de Lannemezan (Figure 13).

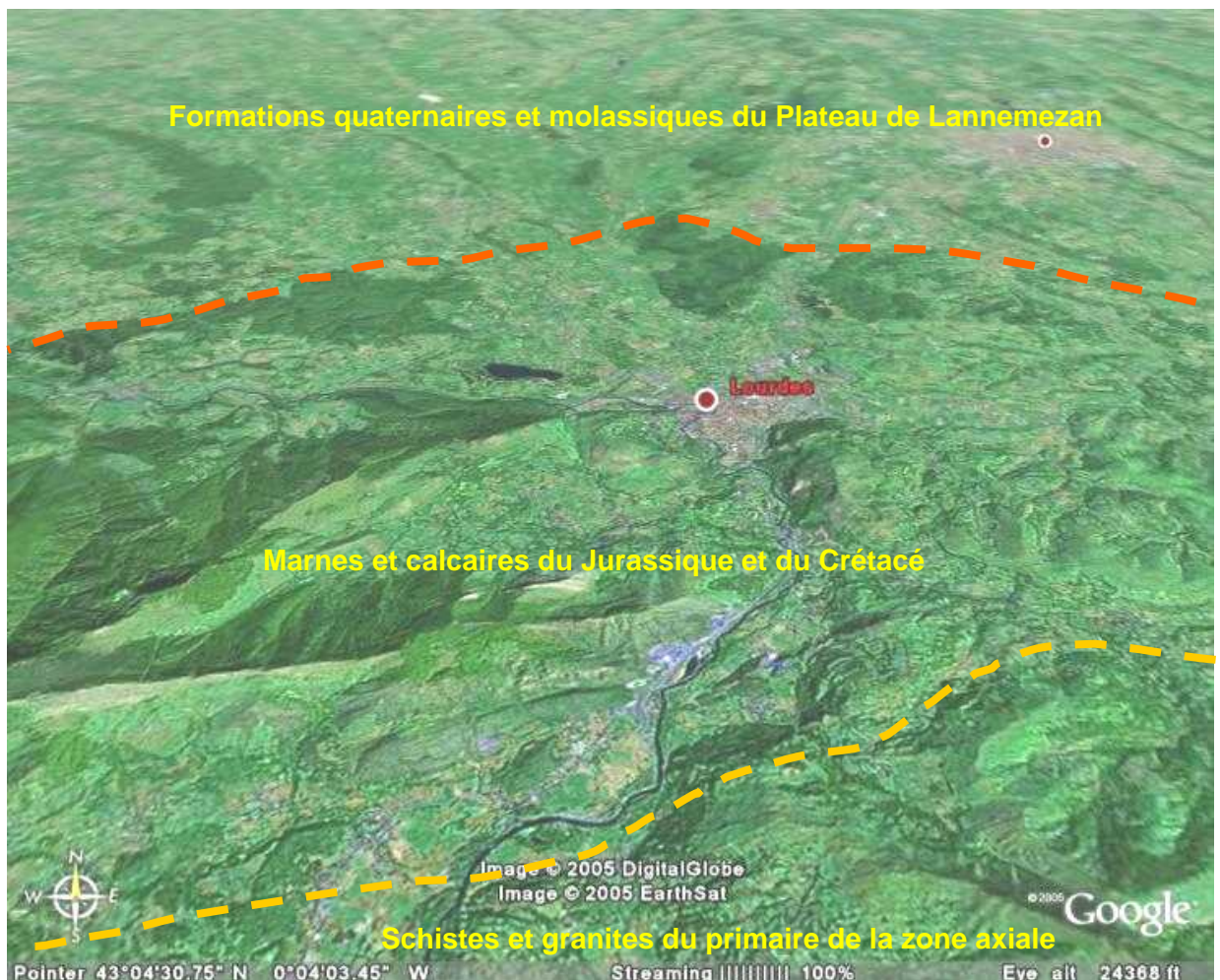


Figure 13 - Paysage géomorphologique de la région de Lourdes.

En outre, le territoire de la commune est encadré par les grandes failles qui structurent la chaîne des Pyrénées sur une bonne part de sa longueur :

- au nord ouest de la commune (Figure 14) passe en effet le chevauchement frontal nord-pyrénéen, qui est orienté globalement O-E et marqué par la présence de roches anciennes comme on peut en observer en bordure NO de la forêt de Mourle ou à l'ouest d'Ossun (hors carte) ;
- au niveau de la commune puis au sud passent également de grands accidents de même direction, globalement O-E qui séparent les formations nord-pyrénéennes des formations de la zone axiale. Toutefois, il semble que ces grandes failles ne soient pas à prendre en compte dans la présente étude dans la mesure où, selon l'OMP, elles ne montrent pas d'activité sismique marquée. On peut simplement noter que celle qui passe au niveau de la gare et de la basilique coïncide géographiquement avec un seuil de creusement du substratum par les glaciers. Au niveau de la gare, la remonté de ce substratum se traduit par un passage de - 45 à -18 m et au niveau de la basilique, de -40 à 0 m (flysch affleurant).

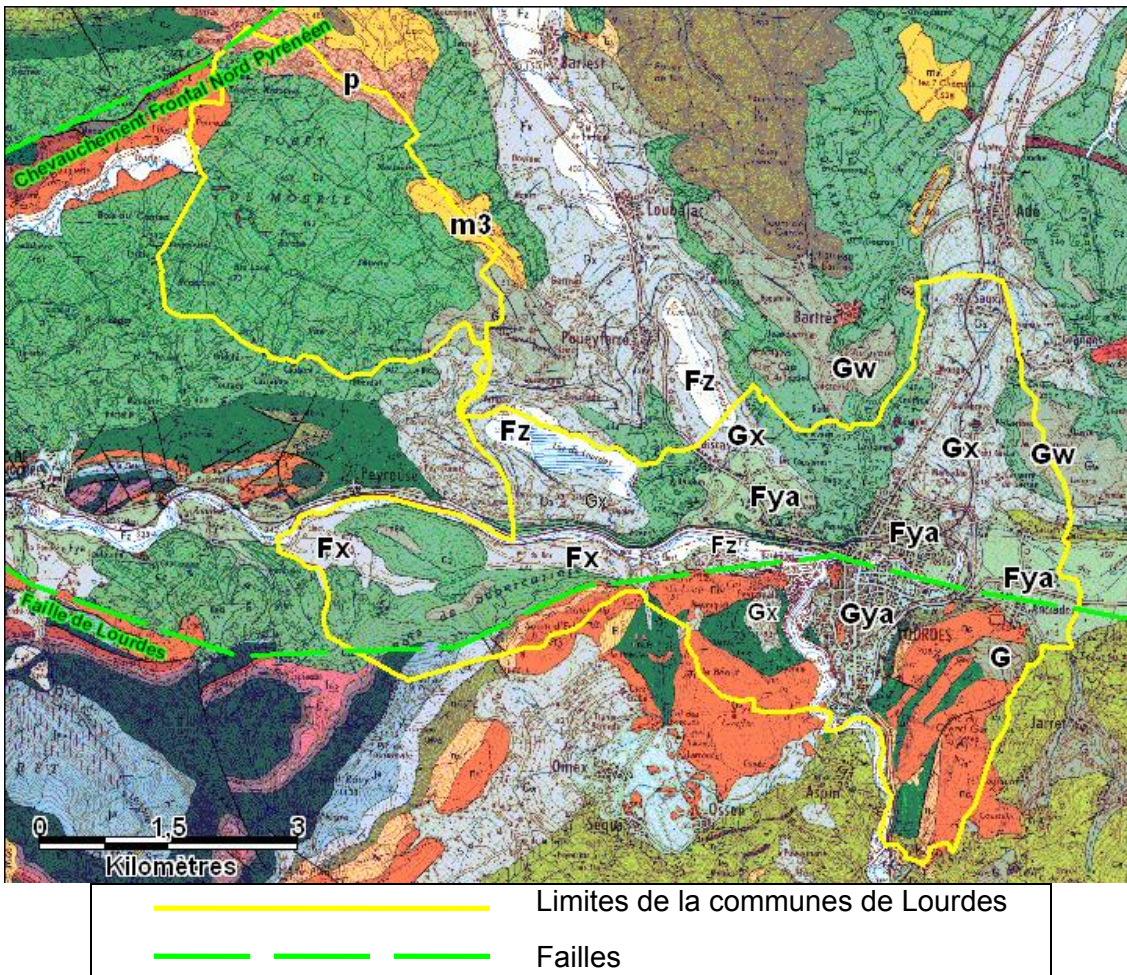


Figure 14 - Extrait de la carte géologique n° 1052 de la commune de Lourdes.

Les formations géologiques anciennes qui affleurent au niveau de la commune sont principalement constituées par les flyschs cénomaniens (Crétacé supérieur : C2 sur la carte géologique) et par les marnes et calcaires de l'Aptien (Crétacé inférieur : n5, n6, n6M sur la carte géologique). L'ensemble de ces roches peut être considéré comme globalement compétent (dur).

### 3.1.2. Les formations récentes

Les formations anciennes servent de substratum à des formations récentes qui les recouvrent (Figure 14). Selon la carte géologique, elles sont composées des trois différents faciès suivant :

- *les molasses*, formations du Miocène et du Pliocène, m3 et p sur la carte géologique, sont citées pour mémoire. Il s'agit en effet de lambeaux, vraisemblablement de faible épaisseur, plaqués sur les flyschs crétacés. Leur composition argileuse prépondérante les rend a priori peu instables sauf si elles sont gorgées d'eau. Leur situation géographique, en bordure du bois de Mourle, et la quasi absence de bâti sur cette partie de la commune leur confère un intérêt secondaire dans le cadre de l'étude ;
- *les moraines* (G –non datées-, Gx –Mindel-, Gw –Riss-, Gya –Würm-, sur la carte géologique) correspondent à des accumulations de matériaux très hétérogènes résultant de l'action des glaciers qui ont recouvert cette région à différentes époques du Quaternaire. Cette action a eu pour effet d'arracher à la montagne des matériaux rocheux de taille très variable, allant du grain de sable ou d'argile au bloc de plusieurs m3, et de les déposer en aval lors de la fonte du glacier. Ils sont réputés globalement grossiers. De fait, les moraines décrites sur la feuille de Bagnères-de-Bigorre à la hauteur de Bourréac montrent nettement du matériel constitué de gros blocs de granite, mélangés à des produits de remaniement qui ont été déposés postérieurement par des torrents proglaciaires qui s'écoulaient de part et d'autre de la langue centrale ou aboutissaient dans des lacs (argiles, sables et galets à stratification oblique). Il est vraisemblable que le matériel glaciaire présent sur la feuille de Lourdes, quoique n'affleurant en coupe jamais aussi clairement, ait une composition proche de celle-ci, même si les matériaux constitutifs des blocs peuvent avoir des origines plus variées (schistes, granites, etc.).

Selon la carte et la notice géologiques de la feuille de Lourdes, les glaciers descendant des Pyrénées ont dépassé la commune en se digitant, d'ouest en l'est, vers les vallées du Lac de Lourdes, de Poueyferré, de Saux et de Bourréac, comme en témoignent les moraines frontales rissiennes qui ont finalement fermé ces vallées qui coulaient préalablement vers le nord.

Il est enfin important de noter que l'épaisseur des moraines a pu être considérable avant érosion postérieure : 250 m de matériel morainique peuvent être au minimum escomptés entre le point le plus profond observé en sondage (environ 360 m) et le point topographique le plus haut de la commune où affleurent des formations morainiques (607 m au Turonnet).



- les alluvions (Fx –Riss-, Fz –Würm-, Fya –actuel-, sur la carte géologique) qui correspondent elles aussi à des matériaux d'accumulation, mais déposées cette fois par les cours d'eau. Elles sont plus fines que les précédentes (argiles, sables, graviers, galets) et constituent des corps moins hétérogènes. En outre des épisodes lacustres se sont produits à cette période comme en témoignent de nombreuses accumulations de vase.

Il est intéressant de noter que les descriptions lithologiques données dans les sondages effectués au droit des moraines indiquent la plupart du temps la présence de matériaux fins (sables et graviers, parfois même vases) superposés aux blocs et galets. Compte tenu de leur granulométrie très proche de celle des alluvions, elles correspondent vraisemblablement à des dépôts torrentiels et lacustres, qui se sont déposés sur les corps morainiques sensu stricto et introduisent une hétérogénéité en grand qui ne pourra que compliquer l'interprétation géotechnique des formations correspondantes.

Les formations récentes sont globalement très peu cohérentes et susceptibles d'avoir un effet amplificateur certain des mouvements sismiques. En outre, leur épaisseur peut être importante dans la mesure où, au cours de leur déplacement, les glaciers peuvent avoir localement une action érosive intense. La glace, chargée de blocs rocheux plus ou moins volumineux, va avoir un effet abrasif très fort. Ainsi, alors que la profondeur du substratum des alluvions du Gave est de l'ordre de 15 m, celle du substratum des formations morainiques au droit du centre ville atteint 40-45 m. Il est toutefois vraisemblable qu'une action érosive des glaciers ait pu par place affecter le cours du Gave, comme le suggèrent les « puits » alluviaux observés par exemple au droit de la basilique où des matériaux de type alluvial sont rencontrés jusqu'à 45 m ou, en aval de la commune, à Rieulhes, jusqu'à 30 m.

Ce sont donc ces formations récentes qui font l'objet d'une étude plus approfondie dans ce rapport.

## **3.2. ÉTUDE DÉTAILLÉE DES FORMATIONS RÉCENTES**

### **3.2.1. Recherche d'information existante**

Dans le contexte de la présente étude qui cherche à déterminer le degré de stabilité des formations géologiques en cas de séisme, il importe de reconstituer, dans la mesure du possible, la géométrie des formations récentes selon 3 dimensions. Si les cartes géologiques disponibles permettent d'estimer leur emprise horizontale sur le territoire de la commune, il est nécessaire de rechercher des sources d'information qui donnent accès à leur évolution en profondeur. Le seul moyen à la disposition du géologue correspond à l'étude des sondages disponibles sur le territoire de la commune, sondages effectués antérieurement à l'occasion de travaux d'aménagement ou de recherche d'eau, par exemple. L'analyse de ces coupes de terrain permet en

effet de reconnaître la nature, la qualité et l'épaisseur des matériaux traversés, voire la profondeur du substratum qui les supporte lorsque le sondage est assez profond pour l'atteindre. Dans le cas de Lourdes, les sondages qui apportent cette dernière information sont malheureusement très rares.

Ce type d'information a été recherché auprès de certaines administrations publiques et bureaux d'étude susceptibles de détenir de l'information. Peu de réponses ont été obtenues de cette enquête et elles ont toutes été négatives quant à disponibilité d'information. Finalement, seuls les services techniques de la ville de Lourdes et le LRPC ont mis à disposition les informations en leur possession.

Finalement, les informations préalables utilisables viennent de trois sources :

- les sondages, accompagnés ou non de rapports techniques et d'essais divers, extraits de la banque des données du sous-sol du BRGM (BSS), au nombre de 71, qui seront appelés « sondages BSS » dans la suite du rapport ;
- les sondages ne figurant pas dans la BSS, accompagnés ou non de rapports techniques et d'essais divers et fournis par la ville de Lourdes, au nombre d'une vingtaine. Ils seront appelés « sondages Mairie » dans la suite du rapport ;
- les sondages fournis par le LRPC, au nombre d'une vingtaine, relatifs en particulier à l'étude effectuée sur le marais du Monge, lors de la réfection de la RN 21, à l'entrée nord de Lourdes.

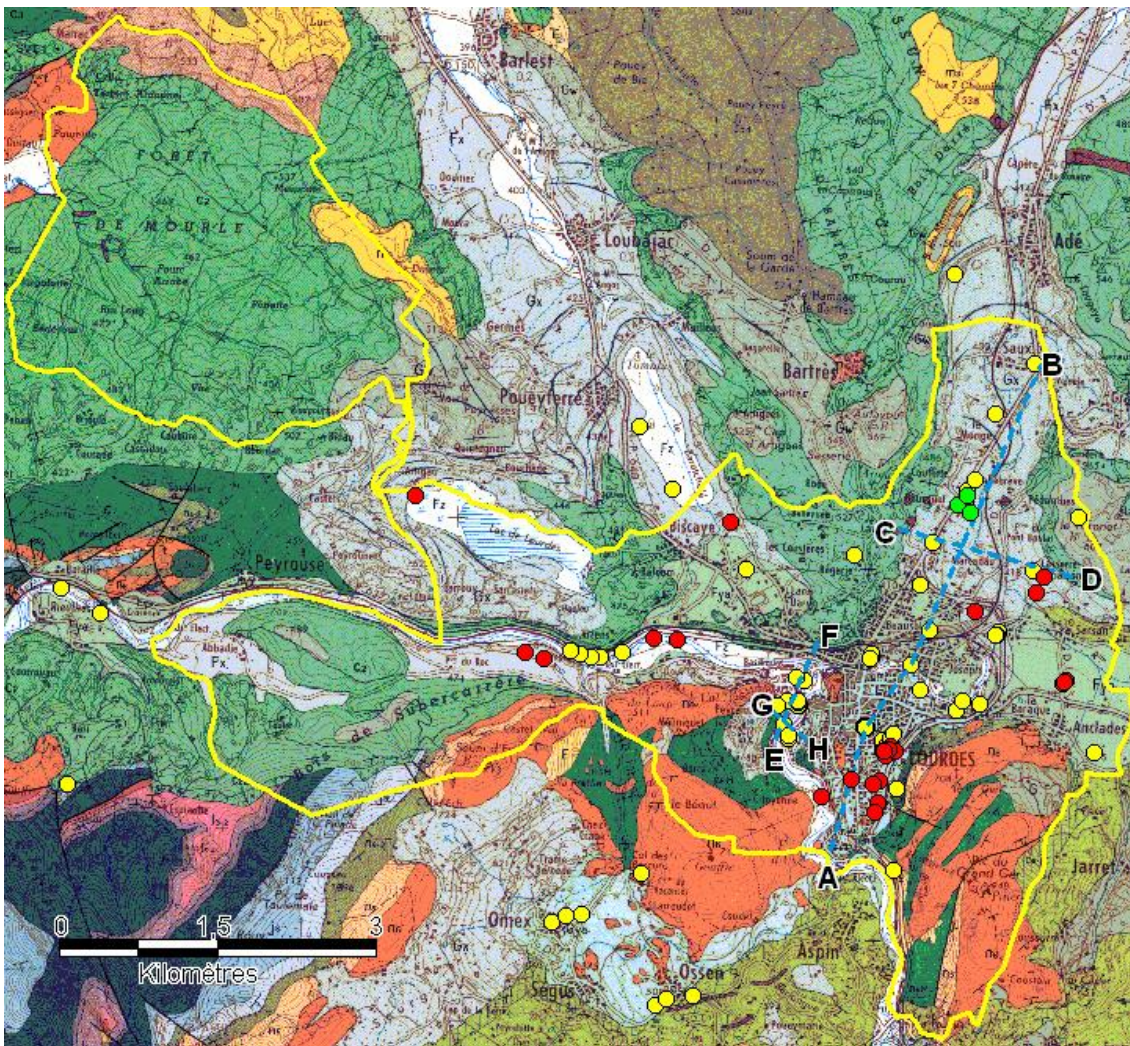
### **3.2.2. Travaux de terrain**

Les travaux de terrain réalisés au cours du projet ont été exploités pour partie au niveau géologique. Il s'agit principalement des coupes réalisées à la pelle mécanique (17 points) et à la tarière (3 points) et, dans une moindre mesure, les essais pénétrométriques (3 points).

### **3.2.3. Localisation et sélection des informations**

L'information relative aux sondages est importée dans une table Mapinfo qui, superposée aux cartes géologiques et topographiques scannées, permet de visualiser les points et de les localiser avec une précision qui dépend exclusivement, hormis pour les travaux effectués dans le cadre du projet, de celle des déclarations faites par les maîtres d'œuvre des sondages (Figure 15). Il est alors possible de sélectionner les points en fonction de leur appartenance à telle ou telle formation géologique.

À l'issue de cette opération, et pour chacune des 9 formations récentes (moraines, alluvions et éboulis) présentes sur l'emprise de la commune, les informations correspondant aux sondages ont été extraites des dossiers disponibles en BSS, en particulier les logs ou coupes qui décrivent la lithologie et l'épaisseur des matériaux traversés.



Sondages	● BSS	● LRPC, Mairie	● Projet
----------	-------	----------------	----------

Coupes : - - - - -

Figure 15 - Localisation des sondages utilisés et des coupes synthétiques.  
Extrait de la carte géologique n° 1052.

### 3.2.4. Fiabilité des informations

L'interprétation des sondages, et en particulier sa fiabilité, dépend dans un premier temps de la qualité et de la précision des informations délivrées qui sont, par essence très hétérogènes. En effet, les trois principales raisons suivantes contribuent à cette hétérogénéité :

- l'objectif de sondage : la précision de l'information géologique est très différente selon qu'il s'agisse d'un sondage géotechnique ou d'un sondage de simple repérage de l'épaisseur alluviale ;
- le type de sondage : la précision de la description des matériaux traversés est très variable selon qu'il s'agisse d'un sondage carotté, d'un sondage destructif, ou d'un log pressiométrique ;
- la diversité des intervenants : à l'exception des travaux effectués dans le cadre du projet et décrits par un géologue du BRGM, plusieurs entreprises de forage ont réalisé les sondages et le type de description est souvent différent d'un sondage à l'autre, allant d'une description normalisée à une simple indication de profondeur.

Il est donc nécessaire d'interpréter les données disponibles avec prudence pour restituer une certaine homogénéité aux informations qui en sont issues.

### 3.2.5. Description des formations par interprétation des sondages

L'interprétation des sondages a été réalisée par groupes décrivant les différentes unités géologiques rencontrées sur la commune de Lourdes. La synthèse des différentes interprétations a permis ensuite de réaliser des coupes interprétatives, localisées sur la Figure 15, selon les vallées principales dans lesquelles les formations récentes, glaciaires ou alluviales, se sont accumulées.

Compte tenu du nombre limité de sondages et du fait que très peu traversent la totalité des formations jusqu'au substratum, la grande majorité des limites proposées sur les coupes sont hypothétiques. En outre, soit regroupés (travaux sur un site ponctuel) soit alignés (travaux sur réseau), ils ne permettent que mal, une vision spatiale des formations, dont la cartographie reste donc très interprétative.

Tous les sondages étant situés sur la carte géologique de Lourdes (n° 1052), seule la partie finale de leur numérotation sera utilisée, à savoir, le huitième de carte et le n° d'ordre). Ainsi au lieu de 10524 X 0001 seuls apparaîtront 4 X 0001.

#### 3.2.5.1. *La formation morainique Gw-aval (Zone du point haut du Turonnet)*

Cette formation, localisée à l'est de la vallée de Saux, est datée de la glaciation d'âge Mindel (Figure 16) et n'est connue que par un seul sondage (4X0007). Elle correspond, sur une épaisseur de 3 m, à du matériel argilo-tourbeux et sableux qui s'enrichit en cailloutis vers la profondeur. Le passage à des marnes sableuses jaunâtres à cailloutis

pourrait signaler le contact avec des formations de flysch crétacé altéré. Latéralement, cette formation s'enrichit en gros blocs non altérés, comme signalé vers Bourréac.

Il faut noter que des venues d'eau sont signalées dans les marnes, au jour de réalisation du sondage.

Comme déjà évoqué, l'extension de cette formation a sans doute été très importante si l'on considère les placages restants sur les zones morphologiquement élevées comme Le Turonnet-Bourréac ou Bartrès et Barlest à l'ouest de la vallée de Saux.

### **3.2.5.2. La formation morainique Gx-aval (glaciation d'âge Riss)**

Onze sondages BSS (4X0002, 4X0005, 4X0006, 4X0016, 4X0017, 8X001, 8X0027, 8X0071, 8X0072, 8X0073, 8X0074), 3 sondages Mairie-INGESOL (SP2, SP6, SP10), 8 sondages LRPC (1, 1'-marqué 11 sur carte-, 2, 2'-marqué 21 sur carte, 3, 4, 5, 6) et 2 sondages pelle du projet (p-7-1 et p-7-2) ont été utilisés sur cette zone qui occupe l'essentiel de la vallée de Saux (Figure 16). Les commentaires suivant peuvent être formulés :

- les sondages BSS sont pour l'essentiel alignés le long de la nationale 21 et n'autorisent pas une vision spatialisée de cette formation. A noter que les 4 derniers de la liste BSS sont formellement situés dans les limites de la formation alluviale Fz du ruisseau des Graves. Toutefois, situés à l'extrémité nord de cette formation et compte tenu de l'importance faible de ce cours d'eau, il est vraisemblable que les matériaux traversés soient plus représentatif de la formation morainique Gx-aval que de celle des alluvions actuelles ;
- la grande majorité des sondages BSS reste dans des matériaux meubles sablo-graveleux à argilo-tourbeux et même vaseux. De tels matériaux dont les derniers déposés dans des conditions d'énergie très faible à nulle évoquent, en contexte glaciaire, des formations morainiques fluvio-lacustres ;
- un seul (4X0005) atteint des matériaux morainiques s.s. (blocs) à 7,20 m, même si localement certains montrent des galets ;
- le plus profond à 17,50 m (4X0017) ne permet pas d'atteindre le substratum crétacé. En revanche, 3 des sondages-mairie (étude INGESOL pour aménagement), très proches l'un de l'autre et profonds de 8,5 à 22 m, l'atteignent tous, montrant ainsi que la surface du substratum est très accidentée. Les matériaux traversés, outre les fréquents remblais, profonds parfois jusqu'à 6 m, montrent la présence de matériel fin, argiles et vases, ce qui est logique puisqu'ils sont tous situés dans les limites du marais de Monge,
- les sondages pénétrométriques du LRPC réalisés le long de l'actuelle RN 21, traversent pratiquement tous des épaisseurs conséquentes (jusqu'à 10 m) de matériaux tourbeux parfois sursaturés en eau avec des teneurs proches de 1000% (LRPC 1977), qui suggère que le marais du Monge a pu être plus étendu qu'il n'apparaît actuellement ;
- enfin les deux sondages à la pelle réalisés sur les terrains de sport du lycée de Sarsan (p-7-1 et p-7-2), tout comme le sondage à la tarière foré sur le rond point du

Lotissement Mozart (t-9), montrent du matériel argilo-vaso-limoneux à graves et galets, qui confirme bien la variabilité lithologique de cette formation.

L'organisation générale de cette unité morainique pourrait enfin correspondre à celle de terrasses emboîtées, en particulier à l'est de la vallée, comme le suggère la coupe ONO-ESE de cette zone (cf. § 2.5.2). En effet, tant au nord qu'au sud, deux sondages, 4X0006 et 8X0027, qui pénètrent directement la moraine à gros blocs, sont situés sur une zone haute qui domine la vallée de quelques 30 m au sud (vers Lasserre de Sarsan) et de 3 à 5 m vers le nord (à Saux). A ce niveau d'ailleurs, il semble que la terrasse à blocs ferme la vallée puisque des blocs sont observés en continu le long du chemin qui se poursuit à l'ouest de Saux, au-delà de la ligne de chemin de fer, pour disparaître à la ferme « la Métairie », comme le montre la limite tracée sur la carte de la Figure 16. Cette terrasse morainique ferme d'ailleurs la vallée puisque c'est au niveau du village de Saux que passe la limite de partage des eaux.

Sur cette terrasse, toutefois, il faut encore compter avec une forte variabilité lithologique si l'on tient compte des sondages à la pelle réalisés pour le projet (p-7-1 et p-7-2) : à 130 m environ du sondage 8X0027, où seuls des blocs sont signalés, ces sondages montrent du matériel argilo-limoneux majoritaire à cohésion moyenne à forte dans lequel sont envoyés des blocs pluri décimétriques et ce, à des altitudes équivalentes, au moins pour p-7-1. Cette variabilité est confirmée par les profils SASW : LOU17 (500M SE de Saux) montre 7 m de blocs avant le substratum alors que LOU19 (250 m O de Saux) et LOU21 (Lycée de Sarsan) débutent dans un niveau sablo-graveleux (10-15 m) avant de traverser un niveau à blocs (20-25 m).

De l'observation de ces deux premières formations morainiques (Gw aval et Gx aval), il ressort que leur lithologie est contrastée, avec la succession théorique suivante venant reposer sur le substratum de flysch créacé :

- un niveau grossier à blocs qui correspondrait à des moraines *sensu stricto* ;
- un niveau de granulométrie moyenne, sablo-graveleux, qui correspondrait à des dépôts de torrents glaciaires ;
- un niveau fin à très fin (argilo-limono-vaseux et tourbes), qui sont l'indice d'un épisode lacustre final.

Une telle séquence est susceptible de se répéter, en particulier pour les deux derniers termes, ce qui est montré par l'observation de dépôts vaseux et sablo-graveleux intercalés.

Il est important d'insister sur le caractère théorique de cette succession puisque les matériaux à blocs ne sont pas systématiquement observés au contact du substratum, les rares fois où il est atteint, et que les séquences de matériaux plus fins, graves, sables et vases ou tourbes peuvent se répéter et se sont mises en place en conditions torrentielles proglaciaires chenalisantes.



Figure 16 - Formations GW et GX aval. Extrait de la carte géologique n° 1052.

### 3.2.5.3. La formation morainique Gx (glaciation d'âge Riss) et alluviale Fz (ruisseau de Barachelé-Lac de Lourdes)

La formation morainique Gx et la formation alluviale Fz sont exceptionnellement associées ici (Figure 17) dans la mesure où elles paraissent très imbriquées et où elles suggèrent ce que pourrait être la cartographie au niveau de la vallée du ruisseau des Graves et, plus particulièrement, du marais de Monge.

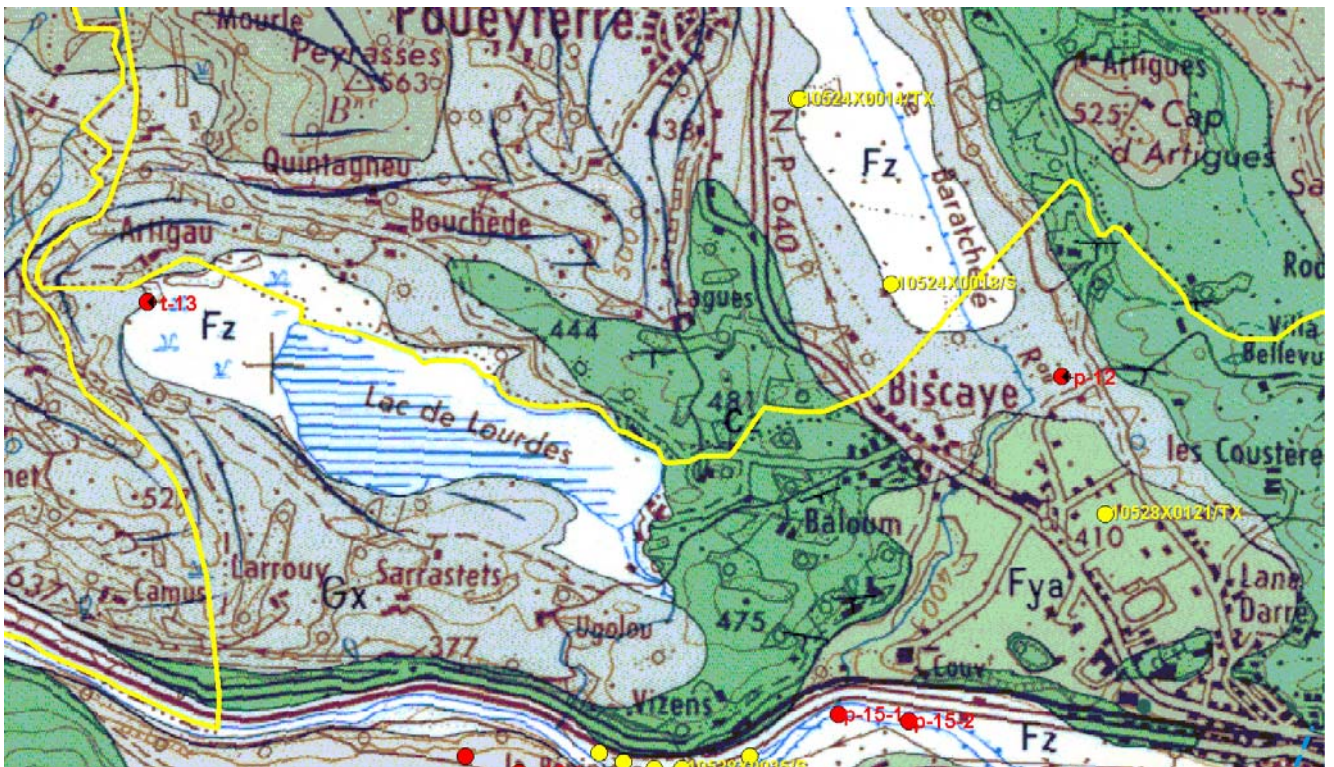
Les formations morainiques (Gx) se sont en effet déposées dans ces vallées qu'elles ont comblées jusqu'à inverser localement le cours des ruisseaux : Il en est ainsi du ruisseau de Baratchelé, au sud de Loubajac, qui coule vers le sud alors que le ruisseau de l'Ousse dont la source se situe au S-E du Cap d'Artigues matérialise, à partir de Loubajac le cours anté-glaciaire.

Les formations alluviales (Fz) sont localisées au centre des vallées glaciaires et sont grossièrement ellipsoïdales. Leur forme évoque plus d'anciennes zones de dépôts lacustres qu'une réelle sédimentation fluviale, ce que l'analyse des sondages confirmera.

Trois sondages BSS, situés hors de la commune, ont été utilisés (4X0014, 4X0015, 4X0018), ainsi qu'un sondage pelle (p-12) et un sondage tarière (t-13) réalisés pour le projet :

- les deux premiers, proches du centre géométrique du dépôt (S-E de Poueyferré), traversent 6,5 m de tourbe et 5 m de limon sableux avant de toucher le flysch crétacé. Ces matériaux sont donc bien l'indice, au centre du petit bassin, d'une sédimentation fine et calme qui se termine par la persistance d'un marais. Cette observation montre que les importants dépôts morainiques, qui ont formé les vallums glaciaires et ont fermé la vallée vers le nord, ont perturbé l'évolution de cette zone en la transformant en environnement lacustre et marécageux ;
- le troisième sondage, situé entre les précédents et Biscaye, a traversé 3,5 m de tourbes et argiles avant d'atteindre des galets polygéniques. Plus en accord avec un transport de forte énergie, au moins fluviale, ce dernier sondage montre toutefois que la présence d'un marais a été bien réelle sur ce site dans une période récente ;
- le sondage pelle p-12, à 500 m à l'est de Biscaye, montre une succession comparable à celle du précédent, à ceci près qu'un niveau de sable est rencontré à la suite des argiles, au lieu de galets polygéniques. Ce niveau de sable est en outre totalement saturé en eau ;
- le sondage tarière t-13, réalisé à la limite des formations marécageuses du lac de Lourdes, montre une composition exclusivement argileuse des alluvions. Les niveaux rencontrés montrent une assez forte à forte compacité tout en étant plutôt saturés en eau.





— — Coupes      ● Sondages BSS      ● Sondages projet

Figure 17 - Formation Fz-Lac de Lourdes – Ruisseau de Baratchelé.  
Extrait de la carte géologique n° 1052.

Les matériaux rencontrés ici sont globalement de même nature, en moins grossiers toutefois, que ceux rencontrés dans la vallée du ruisseau des Graves et il semble qu'un épisode marécageux ait été général à cette région en fin d'époque glaciaire puisque les mêmes matériaux sont rencontrés sur les 3 vallées avortées situées au nord de Lourdes.

#### 3.2.5.4. La formation morainique Gya-centre-ville (Glaciation d'âge würm)

Quinze sondages BSS (8X0006, 8X0014, 8X0023, 8X0028, 8X0030, 8X0032, 8X0033, 8X0029, 8X0040, 8X0066, 8X0067, 8X0068, 8X0069, 8X0078, 8X0079, 8X0080) et dix sondages du projet (pelle et tarière : p-10-1, p-10-2, t-10, p-11, p-19-1, p-19-2, p-20-1, p-20-2, p21-1, p21-2) ont été utilisés sur cette zone (Figure 18) qui correspond à la majeure partie de l'agglomération. Les sondages fournis par la mairie étaient tous ici déjà intégrés à la BSS. Les observations suivantes peuvent être formulées :

- un seul sondage (8X0040) atteint le substratum crétacé à 41,40 m en ne montrant que du matériel fin à très fin (limon principalement et sables) sans rencontrer de niveaux à blocs ;

- ces sondages sont, pour la plupart, localisés au centre de cette zone et malheureusement concentrés sur deux sites principaux, le Palais des Congrès et les Jardins de l'You, comme le montre la Figure 18 (à noter qu'il n'a pas été possible de faire apparaître sur cette figure les noms de tous les sondages, dans la mesure où ils sont très rapprochés) ;
- la formation Gya occupe un espace grossièrement triangulaire et est localement interrompue par des émergences rocheuses crétacées, comme celle qui supporte le Château ou celle correspondant au lieu dit « Le Rocher » ;
- cette zone paraît géologiquement et morphologiquement complexe pour plusieurs raisons :
  - elle correspond à une zone de surcreusement brutal liée à l'activité glaciaire,
  - sur moins de 2 km en effet, du SSO au NNE, le substratum crétacé affleurant au sud de la ville doit se trouver à une profondeur nettement supérieure à 45 m, puisque le sondage 8X0033 s'arrête à cette profondeur dans du matériel fin morainique argilo-sableux, sans avoir atteint de niveau à blocs. Ce substratum remonte ensuite à 18 m, à la hauteur du ruisseau des Graves, au sud de la gare (sondage 8X0014 qui atteint le substratum crétacé). Cette remontée coïncide avec le passage de la faille régionale figurée en vert sur la Figure 15,
  - sur moins de 750 m, du NO au SE, la profondeur du substratum crétacé subit les mêmes variations que ci-dessus, variation d'ailleurs beaucoup plus rapide puisque le même sondage 8X0033 est situé à moins de 250 m de l'émergence « Le Rocher ». Une telle rapidité semble également de mise sur le bord est de la formation,
  - d'après les deux descriptions qui précèdent, cette zone de surcreusement pourrait correspondre à un couloir allongé du SSO au NNE, limité par l'alignement des émergences rocheuses de Crétacé à l'ouest et par les affleurements d'ophite et de calcaires crétacés à l'est,
  - la surface du fond de ce surcreusement doit être très irrégulière. Par exemple, à 10 m à l'est du sondage 8X0033 qui, à 45 m ne traverse que des matériaux fins, le sondage 8X0028 montre des blocs et rochers à 32 m et le 8X0040 qui jouxte ce dernier touche le socle à 41,40 m puis, à 10 m encore à l'est de ce dernier, le sondage 8X0029 montre des blocs et rochers à 40 m ;
- comme observé sur les formations morainiques précédentes, Gya, qui supporte le centre ville de Lourdes, est constitué essentiellement de matériaux fins, sablo-graveleux, sur une épaisseur importante, surmontant des matériaux plus grossiers formés de blocs, non continus si l'on en croit le sondage 8X0040. L'examen des logs de sondage laisse ainsi supposer une forte hétérogénéité de ces matériaux ;
- l'étude du CEBTP concernant le Jardin de l'You (1975) confirme la nature alluviale, ou au moins torrentielle, de ces dépôts fins évoquée pour la formation Gx-aval et justifie par là-même leur hétérogénéité : les coupes de détail réalisées à l'occasion de ces travaux montrent bien leur structuration en forme de chenal.

Ainsi les observations effectuées sur les moraines du centre-ville confirment l'organisation de ces formations constituées d'une épaisse accumulation de matériaux argilo-sablo-graveleux (30-45 m) surmontant un niveau grossier à blocs dont l'épaisseur exacte n'est pas connue puisque aucun sondage n'atteint le substratum.



- — Coupes
- Sondages projet
- Sondages BSS

Figure 18 - Formation Gya centre ville. (Extrait de la carte géologique n° 1052).

### 3.2.5.5. La formation alluviale Fya-Gare-Biscaye-Anclades (âge würm)

Sur la carte géologique, cette unité grossièrement bi-trapézoïdale s'étend au nord de l'agglomération, entre Gx-aval et Gx-Biscaye, au nord, et Gya-centre-ville, Fz-gare et Fz-Baratechelé, au sud.

Dix sondages ont été utilisés sur cette zone (8X0005, 8X0081, 8X0082, 8X0083, 8X0092, 8X0121, 8X0064, 8X0015, p-5-1 et p-5-2). Ils sont, comme pour les formations précédentes, mal répartis sur la zone (Figure 19) :

#### - côté Gare

- Le sondage central (8X0083), *a priori* le plus représentatif de la formation, traverse 13,5 m de matériaux meubles sablo-vaseux (4 m de vase cumulée). Il ne recoupe pas le socle crétacé mais atteint à cette profondeur des graviers, galets et gros blocs qui pourraient correspondre à du matériel morainique (Gya ou Gx) sur lequel il est susceptible de s'être déposé. Le matériel traversé rappelle dans sa partie fine celui rencontré plus au nord dans beaucoup de sondages, du fait de la présence de vase (épisodes lacustres),
- Le sondage nord (8X0005), en limite cartographique de la formation, présente au début des caractères assez proches du précédent puisqu'il signale des argiles bleutées, donc riches en matière organique et déposées en conditions hydromorphes, qui rappelle les vases. En revanche apparaissent, dès 3,4 m, des matériaux beaucoup plus grossiers qui pourraient correspondre du matériel morainique (GX),
- Les trois sondages sud (8X0081, 8X0082, 8X0092) montrent des matériaux plutôt grossiers (sables, graviers, voire blocs) sur des épaisseurs de 10 à 15 m avant d'atteindre le substratum calcaire ;

#### - côté Biscaye

- Le seul sondage disponible (8X0121) montre que la formation est plutôt grossière, composée de galets emballés dans de l'argile plus ou moins limoneuse. Le matériel rencontré pourrait être comparé à celui observé au niveau des 3 sondages sud décrits ci-dessus mais en aucun cas avec celui rencontré au niveau du sondage central. Toutefois une étude réalisée dans le quartier de Lanne Darré (collecteur de la station de relevage) fait état de 4 petits sondages, de profondeur <4m, qui ne sont pas localisés précisément et qui montrent des matériaux beaucoup plus fins, où vases, tourbes, argiles et limons sont prépondérants. Selon le rapport, «il s'agit de matériaux fluants (vases) très fragiles et compressibles». Il paraît donc important de garder à l'esprit le caractère très inhomogène et donc changeant des matériaux qui composent les formations superficielles de cette région ;

- côté Anclades

- La formation alluviale est traversée par 2 sondages BSS (8X0064 et 8X0015) et 2 sondages pelle du projet (p-5-1 et p-5-2),
- Les deux sondages BSS, présentent un caractère globalement grossier, même si des tourbes sont observées dans les premiers mètres du premier, situé en limite des formations morainiques du centre-ville. Il est toutefois impossible d'en conclure une généralité pour cette zone. L'information la plus pertinente est sans doute donnée par la profondeur enregistrée par le premier, qui n'atteint pas le substratum crétacé à près de 29 m, ce qui peut s'expliquer par le fait que ce sondage est proche de la zone surcreusée du centre ville,
- Les deux sondages pelle montrent une granulométrie plutôt fine (sables légèrement argileux à sables graveleux) avec toutefois présence de galets centimétriques à décimétriques.



- Coupes
- Limite de terrasse morainique
- Sondages BSS
- Sondages projet

Figure 19 - Formations Fya-Gare-Biscayes-Anclades.  
Extrait de la carte géologique n° 1052.

### **3.2.5.6. La formation alluviale Fz (âge subactuel)**

Cette formation correspond aux alluvions actuelles et subactuelles des rivières. Elle est présente évidemment le long du Gave de Pau mais également au niveau des vallées de Baratchélé et du lac de Lourdes dont les cours ont été inversés du fait du dépôt des vallums glaciaires du Riss en particulier (cf. terrasse de Saux évoquée ci-dessus). Enfin elles accompagnent, en partie nord de l'agglomération, au sud de la ligne SNCF, le ruisseau des Graves.

Les alluvions subactuelles sont formées des matériaux arrachés par les rivières aux formations géologiques composant le bassin versant dans lequel elles coulent. De ce fait il est aisé de concevoir que leur composition pourra être très variable d'une rivière à l'autre, tant au niveau de la lithologie que de la granulométrie.

#### **3.2.5.6.1. Fz-sud gare (aval du ruisseau des Graves)**

Sur la carte géologique, cette unité correspond à un ruban de 50 à 100 m de large et de 1800 m de long (Figure 20). Il sépare principalement Fya-gare de Gya-centre-ville.

Deux sondages ont été utilisés sur cette zone (8X0017 et 8X0018) :

- les deux sondages ont été réalisés jusqu'à des profondeurs de 9 et 10 m. Il est possible, compte tenu de la largeur de ce ruisseau, de 50 à 100 m et de la position excentrée des sondages sur le lit, que du matériel des formations Fya (pour 8X0018) et Gya (pour 8X0017) soit atteint sans que le passage ne soit clairement marqué ;
- le matériel traversé par le sondage 8X0018 est tout à fait ressemblant aux dépôts alluviaux rencontrés par ailleurs sur la commune (succession de sables et graviers avec parfois, intercalation d'argiles). En revanche, celui traversé par le sondage 8X0017 montre deux niveaux de sables, séparés par des argiles imperméables avec ceci de particulier qu'à la date du sondage, les niveaux sableux correspondaient à des aquifères dont le plus profond était jaillissant.

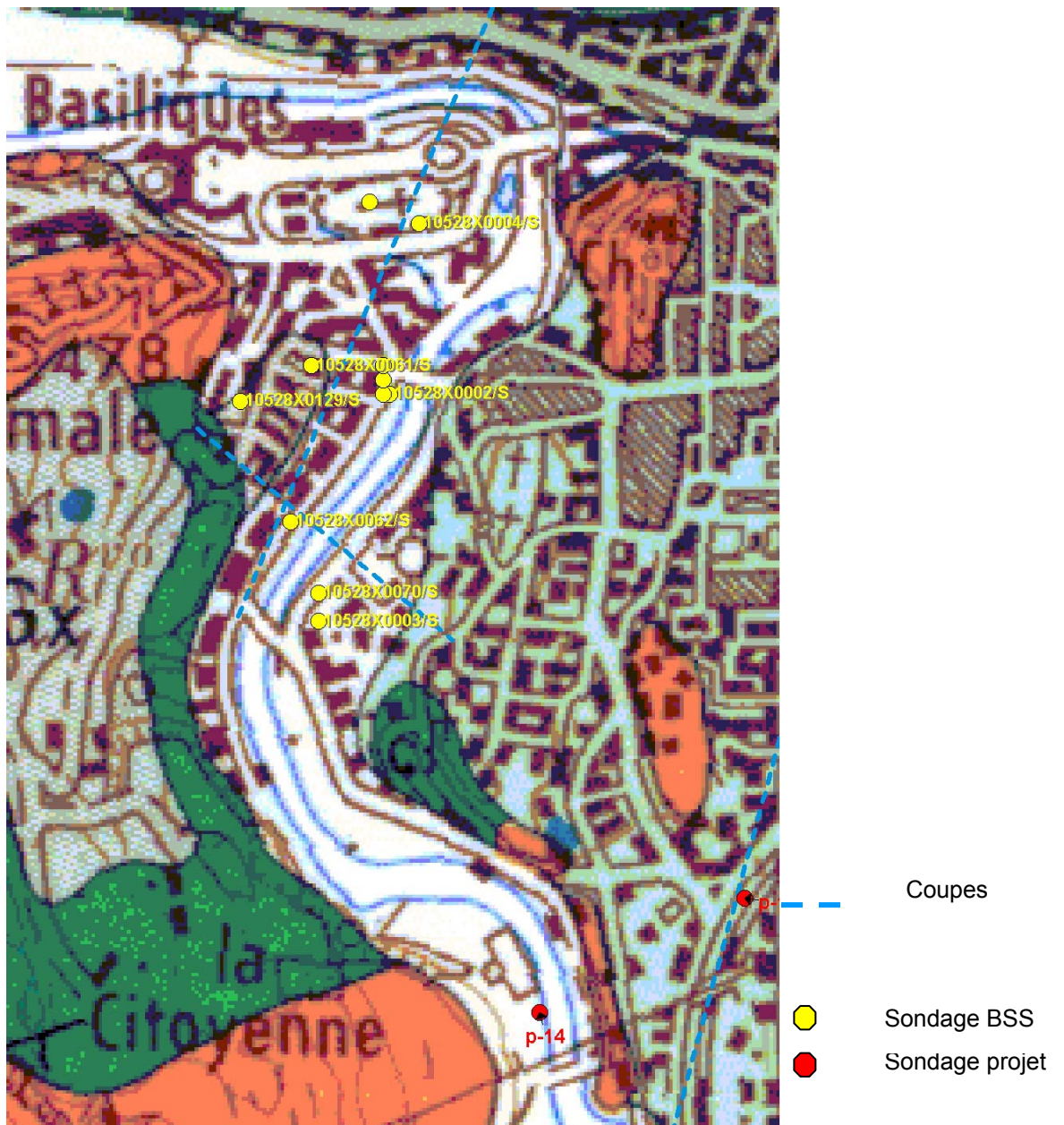
#### **3.2.5.6.2. Fz-gave de Pau**

Cette unité correspond à un ruban large de 100 m à 500 m, en particulier au niveau de la basilique, sur une longueur totale de l'ordre de 11 km. Les sondages BSS disponibles traversant ces formations sont situés au niveau du centre-ville, entre le pont Peyramale et la basilique et, en aval de cette dernière, au niveau de l'usine électrique et de la station d'épuration. Les travaux de terrain réalisés pour le projet ont permis d'étendre l'échantillonnage depuis les jardins familiaux, en amont, jusqu'au terrain sportif de la Pépinière, en aval.

Entre le pont Peyramale et la basilique (Figure 21)

Du sud au nord, dix sondages sont utilisés sur cette zone (8X0003, 8X0070, 8X0063, 8X0002, 8X0060, 8X0093, 8X0130, 8X0004, 8X0013, p-14) :







Au niveau de l'usine électrique et de la station d'épuration (Figure 22)

D'ouest en est, 7 sondages sont utilisés sur cette zone (8X0039, 8X0035, 8X0036, 8X0037, 8X0038, p-15-1, p-15-2). Deux groupes, qui ont des profondeurs comparables (10-15 m) peuvent être distingués du fait des matériaux rencontrés :

- le premier groupe concerne les sondages 8X0039, p-15-1 et p-15-2. Le matériel rencontré est exclusivement de type alluvial plutôt fin, comprenant argiles, vases, sables fins, graviers et quelques galets ;
- le second groupe concerne les autres sondages dont l'un atteint le substratum crétacé à près de 13 m. Le matériel rencontré est d'abord alluvial, lithologiquement comparable au précédent, avec des épaisseurs de 2 à 10 m, puis à tendance glaciaire, avec présence systématique de blocs.



- Sondages BSS                      ● Sondages projet

Figure 22 - Fz-usine électrique-station d'épuration.  
Extrait de la carte géologique n° 1052.

Pour conclure cette description des formations alluviales récentes, il est difficile de préciser, avec le nombre réduit de sondages disponibles, la géométrie de ces accumulations résultant d'un transport de type torrentiel sur une topographie très liée à

l'activité glaciaire et donc sujette à des variations relativement brusques de profondeur entre 10 et 40 m.

Y a-t-il une relation entre les variations de profondeur et le passage des grandes failles qui structurent le domaine nord-pyrénéen et qui auraient pu fragiliser le substratum pour le rendre localement plus hétérogène (fracturé) et donc plus sensible à l'abrasion? Ce pourrait être le cas pour la structuration de la zone d'accumulation morainique et alluviale du centre ville et de la basilique où s'enregistrent les plus fortes profondeurs avant une remontée rapide au niveau des flyschs crétacés. Ce pourrait également être le cas, en aval de la commune de Lourdes, vers l'ouest (Rieulhes) où deux sondages montre des accumulations alluviales importantes (> 30 m) au niveau du passage d'une autre faille régionale.

### **3.3. BASE DE DONNÉE GÉOLOGIQUE TRIDIMENSIONNELLE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES MEUBLES**

#### **3.3.1. Généralités**

Une base de données géologique tridimensionnelle consiste à rassembler toute la documentation géologique disponible sur un territoire donné. Si les cartes géologiques forment, dans ce domaine, la référence en 2 dimensions, c'est surtout l'information accessible par les sondages qui ici est recherchée. Elle permet en effet d'accéder à la vision en 3 dimensions des formations géologiques, par le biais de coupes et de cartes 3D, et ainsi de mieux percevoir les conséquences d'un éventuel séisme, thème du présent projet. De façon plus générale, les services techniques d'une agglomération pourront utiliser une telle source d'information pour mieux prendre en compte les caractéristiques du sous-sol dans la gestion de l'aménagement.

Ainsi, proposer la réalisation d'une telle base, s'intéressant aux formations superficielles meubles, à l'occasion de la cartographie du microzonage sismique d'une commune, paraît aller de soi. Toutefois, elle nécessite, pour être pleinement efficace, que les sondages pris en compte soient nombreux, géologiquement bien décrits et répartis de façon homogène sur le territoire considéré. De ce fait l'information ponctuelle rassemblée à l'origine pourra être interpolée, à une maille adaptée, pour constituer une information continue sur tout le territoire considéré, avec un degré de précision compatible avec son utilisation potentielle.

Ces dernières conditions constituent le point le plus faible dans le cas de la commune de Lourdes puisque les sondages disponibles résultant de la consultation des archives du BRGM, du LRPC, de la Mairie ou de la réalisation des travaux au cours du projet sont relativement peu nombreux (165 en tout) et surtout concentrés sur certains points, sièges de grands travaux (basilique, palais des congrès, jardin de l'You en particulier). De surcroît, ils n'atteignent que rarement le substratum de roches consolidées, comme les calcaires et marnes noires crétacés, ce qui ne permet pas d'avoir une vision claire de la topographie de la surface d'érosion glaciaire servant de surface de base aux dépôts plus récents.

Il a donc été décidé, comme coutumier en pareil cas, de compléter les données existantes, qui constituent la référence terrain, par des sondages interprétés qui résultent d'hypothèses appuyées sur des éléments géologiques par ailleurs disponibles.

### **3.3.2. Intégration des sondages disponibles (Figure 15)**

#### **3.3.2.1. Origine des sondages**

Il est bien évident que les premiers sondages mis en place dans la base sont les sondages réellement effectués qui ont pu être collectés dans différentes archives et qui étaient représentatifs du site considéré en évitant les sondages redondants parce que trop proches et sans montrer d'évolution géologique. Ainsi 49 sondages provenant de la BSS, dans lesquels sont inclus ceux provenant de la mairie et 4 sondages provenant du LRPC ont été conservés, auxquels ont été ajoutés 21 sondages qui ont été réalisés pendant le projet.

#### **3.3.2.2. Codage des formations lithologiques**

Les informations disponibles (logs de sondages existants) présentent une forte hétérogénéité, en termes de longueur et de précision de description et montrent une forte variabilité des faciès lithologiques en présence. Une codification de cette information s'est avérée impérative, pour uniformiser les appellations différentes utilisées pour décrire un même terrain et pour synthétiser certaines descriptions trop détaillées et ce, malgré la perte d'information initiale qu'elle peut impliquer.

Le travail a consisté à regrouper les différentes descriptions d'une même entité au sein d'un code générique qui insiste sur les caractères lithologiques, dans une perspective d'applications, tout en ménageant une approche stratigraphique simplifiée. L'instruction d'un tel référentiel permet tout à la fois d'homogénéiser des dénominations disparates et, en simplifiant les appellations, d'éviter de donner une fausse impression de précision que les données de base de l'étude ne permettent pas d'atteindre.

Cette codification a été élaborée, à dire d'expert, en l'état actuel des connaissances mais pourra être ajustée ultérieurement, au fur et à mesure que la base sera actualisée par intégration de sondages éventuels qui seront réalisés par la Mairie à l'occasion de futurs travaux d'aménagement.

La codification établie est présentée dans le tableau suivant :

<b>Code</b>	<b>Lithologie</b>
<b>SORE</b>	Sols et remblais
<b>EBOU</b>	Eboulis
<b>VASE</b>	Vase
<b>TOUR</b>	Tourbe
<b>ALAG</b>	Alluvions argilo-sablo-graveleuses
<b>MFAG</b>	Moraine fine argilo-sablo- graveleuse
<b>MGGB</b>	Moraine grossière à galets et blocs
<b>SUBS</b>	Substratum

De la sorte, et avec une précision en accord avec la densité des informations de référence disponibles, les formations récentes et leurs relations mutuelles pourront être représentées.

La codification des sondages est faite dans un fichier au format Excel directement récupérable par le logiciel Geological Data Management (GDM) du BRGM. Un des feuillets du fichier comporte le numéro des sondages, accompagné des coordonnées X, Y et Z, cette dernière valeur étant fournie par le modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN. Le second feuillet du fichier comporte la description proprement dite de chaque sondage, faite de la forme suivante :

<b>INDR</b>	<b>PROF_MUR</b>	<b>CODE_LITHO</b>
10524X0002	4,5	MFAG
10524X0002	20	MGGB
10524X0002	21	SUBS

où INDR correspond au numéro d'identification (ici BSS), PROF\_MUR indique la profondeur du mur du niveau décrit et CODE\_LITHO fait référence à la composition lithologique. L'exemple ci-dessus correspond à un site de 4,5 m de moraine fine (MFAG) surmontant 15,5 m de moraine grossière (MGGB) et un substratum (SUBS) reconnu sur 1 m d'épaisseur.

### **3.3.3. Description des sondages interprétés**

La description de ces sondages passe par les deux étapes majeures suivantes :

- la définition d'un schéma géologique interprétatif des formations superficielles sur la base de grandes coupes interprétatives effectuées en appui sur les sondages existants et une représentation en 3 dimensions de la carte géologique ;

- la description proprement dite des sondages qui consiste à proposer une séquence stratigraphique (lithologie et épaisseur), géologiquement compatible avec le schéma général évoqué ci-dessus et avec les données voisines connues. L'indication, pour chaque sondage interprété, d'une profondeur du substratum vise à décrire la topographie supposée de la surface de base des formations superficielles (moraines et alluvions) en fonction des constatations effectuées lors de la définition du schéma géologique.

### **3.3.3.1. Définition du schéma géologique interprétatif**

Ce schéma est approché par le biais de coupes longitudinales et transversales des vallées glaciaires où se sont déposées des principales formations superficielles qui voient se concentrer le bâti de la ville. La Figure 15 permet de localiser la trace au sol de ces coupes.

Cette représentation synthétique du sous sol et donc les limites des formations représentées restent, en très grande part hypothétiques, du fait du faible nombre de sondages disponibles, dont en outre très peu ont atteint le substratum crétacé. De ce fait, l'épaisseur et la composition exacte des formations superficielles ne sont connues qu'aux points où les sondages les traversent. C'est en particulier le cas des sondages qui, au sein des formations cartographiées comme morainiques, restent dans du matériel fin de type fluvio-lacustre et n'atteignent que rarement le niveau à blocs qui permet de diagnostiquer vraiment une origine morainique.

Dans la pratique, les coupes ont été réalisées en projetant sur leur trace au sol les sondages significatifs les plus proches.

#### **3.3.3.1.1. Coupe A-B (Figure 23)**

La coupe s'attache à montrer la répartition générale des faciès des formations morainiques qui sont prépondérantes, avec, en particulier, les « moraines à blocs », qui correspondraient à des moraines sensu stricto, reposant sur le substratum crétacé, suivies par les « moraines fines » dont la composition évoque fortement du matériel fluvio-lacustre glaciaire (présence de vase et d'argile).

Une telle organisation entre dans la logique du déroulement d'une séquence glaciaire : le glacier transporte des blocs hétérogènes arrachés à la montagne et les particules plus fines, transportées par les torrents proglaciaires contemporains à postérieurs, ennoient ensuite les blocs d'abord par dépôt d'alluvions puis à la faveur de lacs créés par le fonctionnement du glacier.

Sur la présente coupe seuls deux forages réalisés dans les formations glaciaires (Gx et Gya) ont atteint les niveaux à blocs et 4, réalisés dans les alluvions Fya et GX, le substratum. Ces derniers permettent de mettre en évidence l'aspect très accidenté de la surface d'érosion du substratum.

La coupe montre enfin le creusement important qui se produit au droit du centre ville puisque le sondage 8X0033 s'arrête, à 45 m de profondeur, dans les « moraines fines »

de Gya. Ce surcreusement se termine au nord, au niveau du cours E-O du ruisseau des Graves.

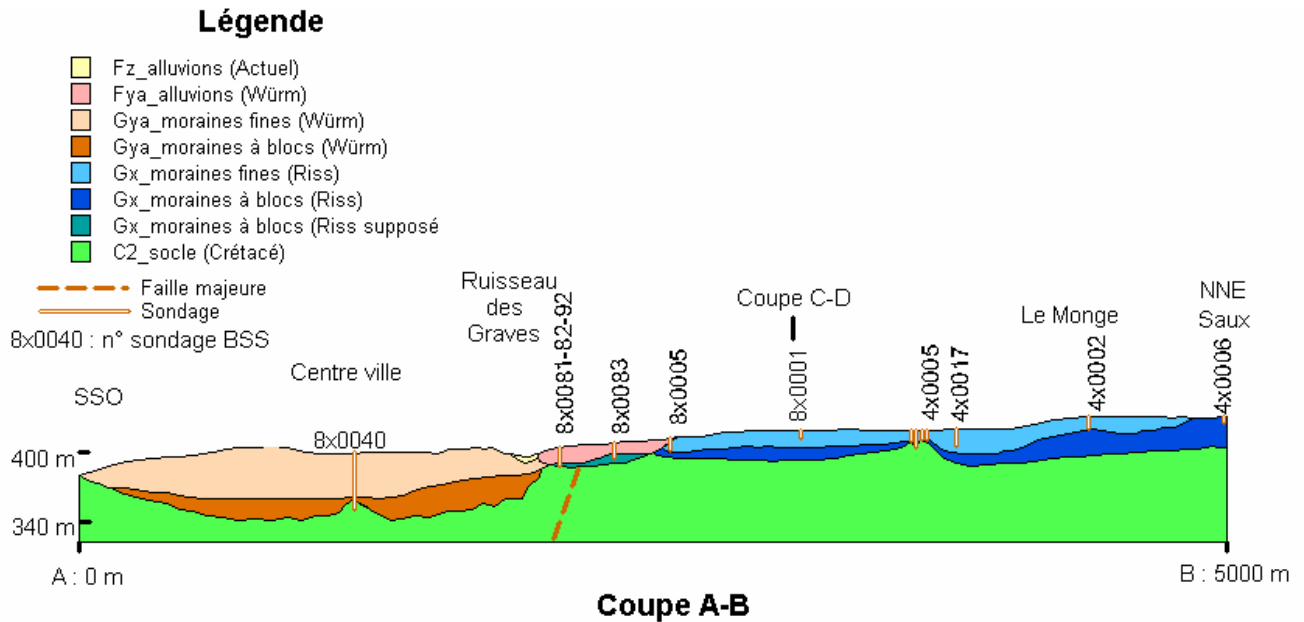


Figure 23 - Coupe SSO-NNE des formations morainiques du ruisseau des Graves et du centre-ville.

### 3.3.3.1.2. Coupe C-D (Figure 24)

Cette coupe transverse à la précédente suggère une limite entre des « moraines à blocs », observées à l'est dès le début du forage 8X0027, et le centre de la vallée où seules des « moraines fines » ont été observées. Il semble que cette limite corresponde à une limite morphologique qui évoque une disposition en terrasse, dont la coupe fait l'hypothèse qu'elle est emboîtée. Les observations de terrain vont dans le sens d'une telle hypothèse, même si un travail de cartographie plus détaillé serait nécessaire pour la confirmer. Bien que l'échelle des altitudes soit amplifiée, le tracé des limites tâche de traduire la morphologie glaciaire d'une vallée en auge.

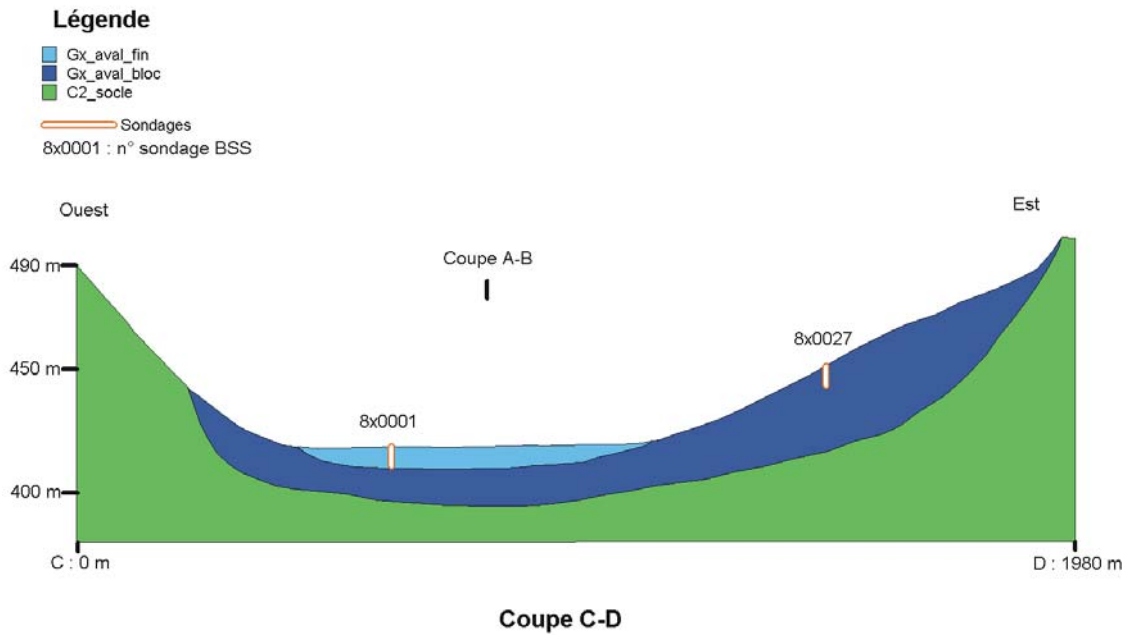


Figure 24 - Coupe O-E des formations morainiques du ruisseau des Graves.

### 3.3.3.1.3. Coupe E-F (Figure 25)

La coupe propose un schéma d'organisation des dépôts alluviaux du Gave entre le pont Peyramale et le village de Piqué au nord. Cette coupe montre une limite de brusque approfondissement du substratum créacé légèrement en amont du Pont Vieux, approfondissement qui s'accroît au niveau de la basilique où le substratum est atteint à environ 45 m. Plus au nord, le substratum remonte rapidement pour arriver à l'affleurement. Ce surcreusement est comparable à celui cité dans la coupe A-B au niveau des moraines Gya du centre-ville. Ces deux surcreusements sont séparés par l'alignement des émergences rocheuses (le Château et le Rocher), noyaux durs de calcaires créacés ayant pu jouer le rôle de « soc de charrue » séparant le glacier en deux parties, nord est, vers le village de Saux, et nord ouest, vers le village de Biscaye.

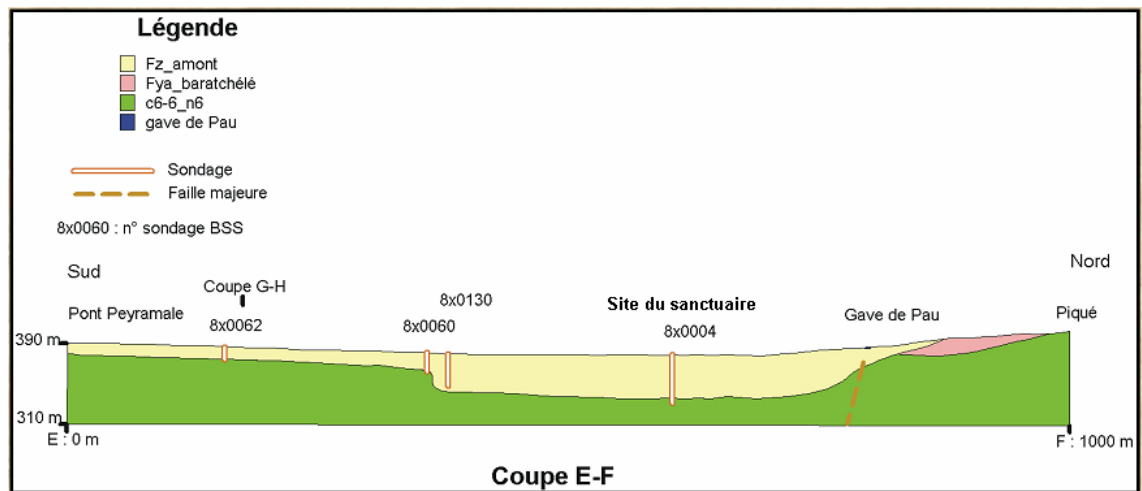


Figure 25 - Coupe SSO-NNE des formations alluviales du Gave à la hauteur du centre ville.

### 3.3.3.1.4. Coupe G-H (Figure 26)

Cette coupe, transversale à la précédente, montre, bien que les limites en soient imprécises à l'ouest, le phénomène de chenalisation assez brutal qui affecte le substratum calcaire des alluvions. Il traduit vraisemblablement le début de surcreusement glaciaire qui s'amplifiera vers le nord.

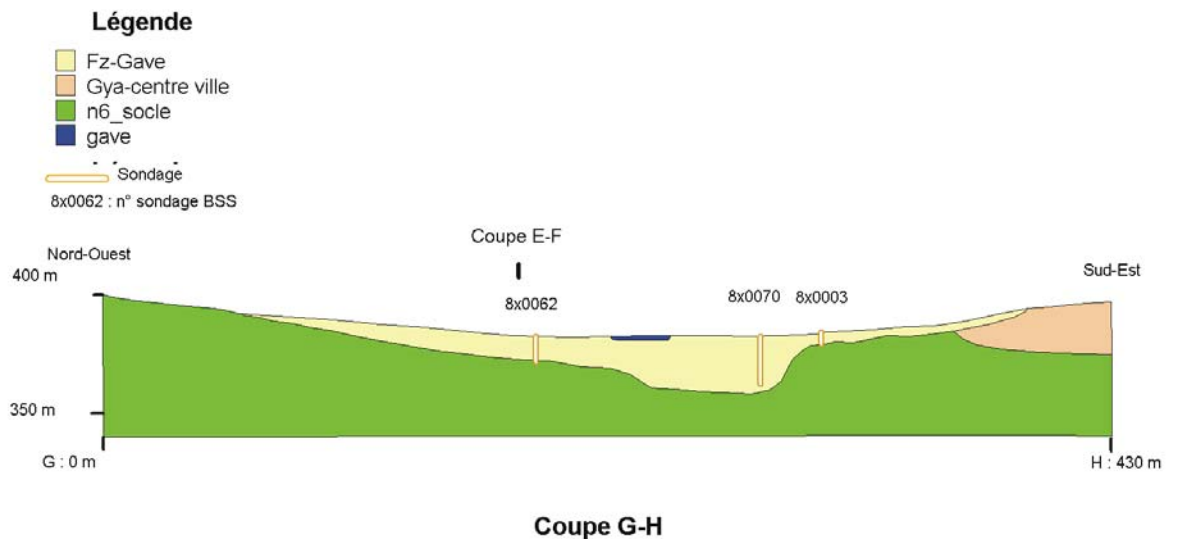


Figure 26 - Coupe ONO-ESE des formations alluviales du Gave de Pau (place de la Merlasse-rue Sainte-Marthe).



### 3.3.3.1.5. Représentation 3D de la carte géologique

La représentation 3D de la carte géologique consiste à draper l'information géologique sur le MNT disponible. Orientable en toutes directions de façon interactive lors de l'interprétation, elle permet de mettre en perspective les différentes unités constitutives de la zone étudiée et de mieux visualiser leurs relations mutuelles (Figure 27).

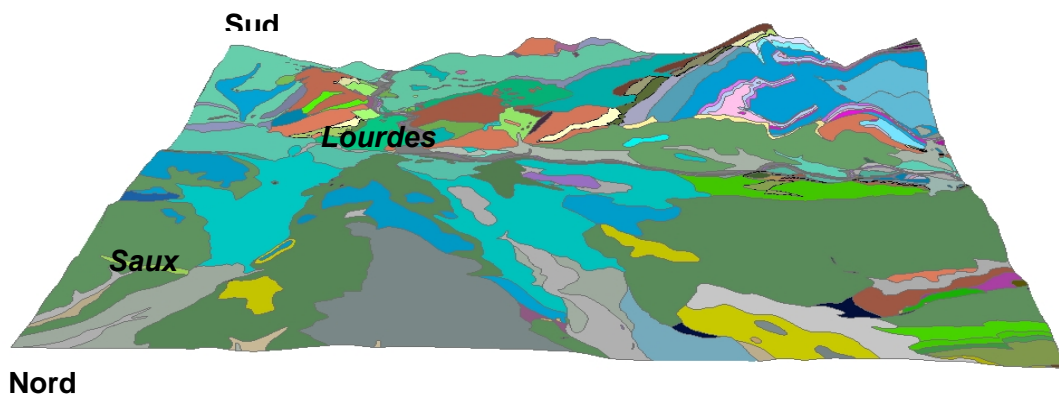


Figure 27 - Vue en perspective de la carte géologique de la région de Lourdes.

### 3.3.3.2. Description des sondages interprétés

Cette description a été réalisée selon la même méthode et avec les mêmes codes lithologiques que pour les sondages réels. Bien évidemment ils ne traduisent que les hypothèses lithologiques et géométriques déduites, par le géologue, de la connaissance du milieu, elle-même acquise par l'étude des cartes géologiques des sondages existants et des observations de terrain réalisées au cours du projet.

456 sondages ont été ainsi construits, qui permettent de présenter une vision 3D des formations récentes qui remplissent les vallées glaciaires dans lesquelles l'essentiel du bâti lourdaise est établi.

### 3.3.3.3. Structuration de la base

L'ensemble des 530 points obtenus au final a permis de mettre en place une base de données géologiques autorisant, selon les nécessités, une vision générale des formations lithologiques ou la mise à disposition de coupes plus précises adaptées aux problématiques variées de l'aménagement. Cette base a été réalisée à partir du logiciel Geological Data Management (GDM) développé par le BRGM (logiciel de traitement et de valorisation des données géologiques).

Un traitement géostatistique des informations a été nécessaire. Celui-ci a permis d'une part de caractériser la variabilité spatiale du phénomène étudié, notamment par le biais de variogramme, et d'autre part d'interpoler les données de manière optimale à partir d'un krigeage.

Les interpolations effectuées ont abouti à des représentations cartographiques de la géométrie des formations suivantes :

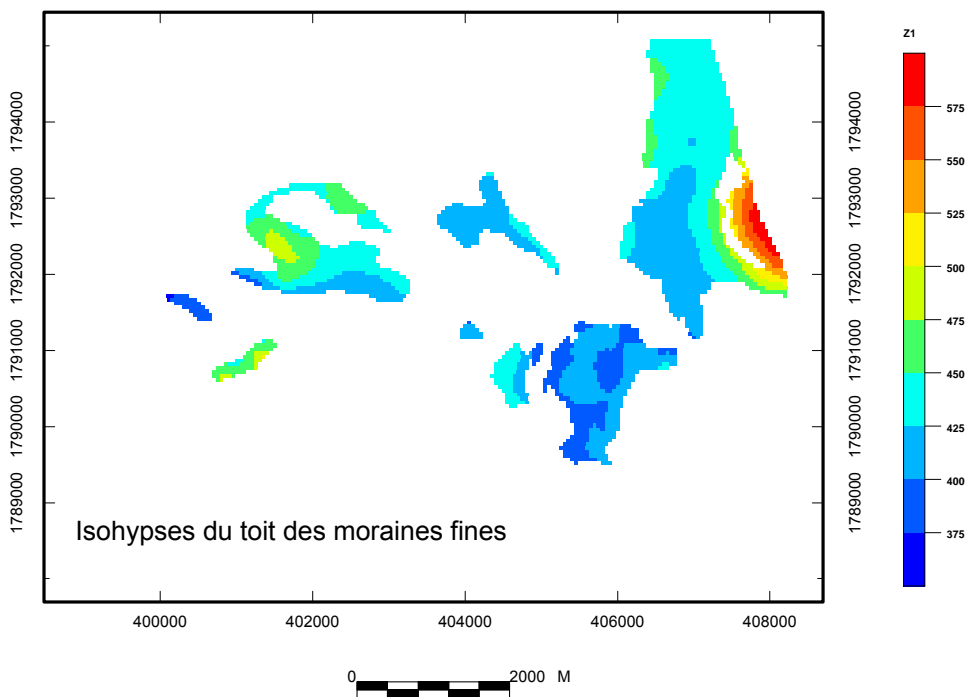
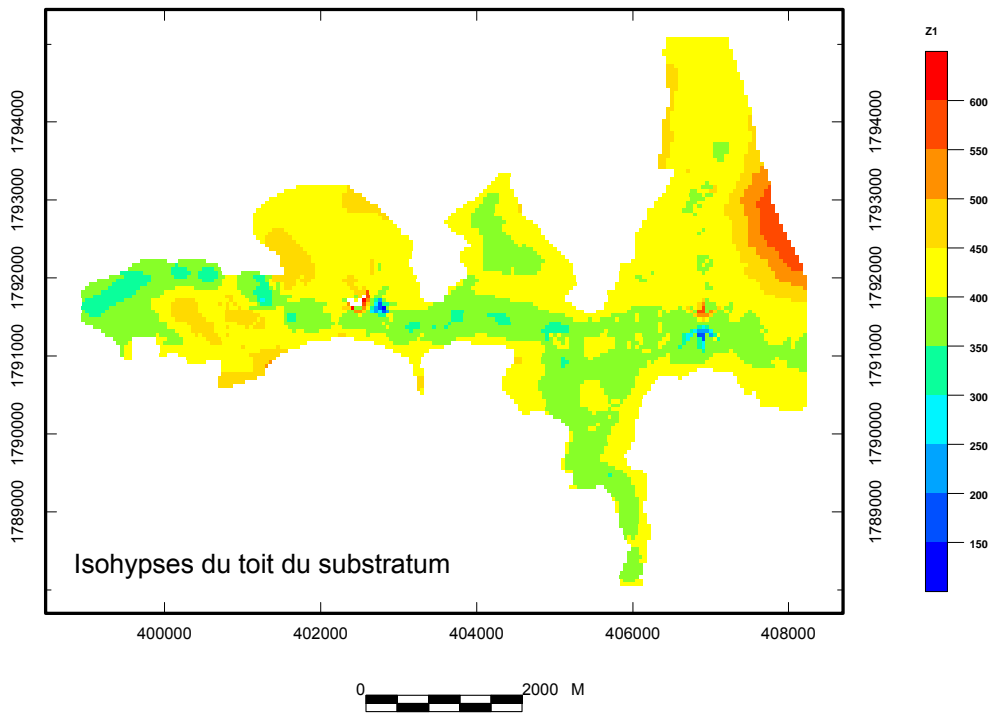
- le toit du substratum correspondant à la surface de base des formations récentes susceptibles d'amplifier les mouvements sismiques. Ce substratum est essentiellement composé de formations crétacées indurées, flyschs au nord puis calcaires massifs ou calcaires marneux au centre et au sud ;
- le toit et le mur des alluvions, des éboulis, des tourbes, des vases, des moraines fines et des moraines grossières. Compte tenu de leur très faible représentation dans les sondages, les sols et remblais n'ont pas été traités dans un premier temps mais leur prise en compte est toujours possible si la densité de l'information est ultérieurement augmentée.

Les interpolations ont été réalisées par krigeage sur la base d'analyses variographiques. Les sondages de la base de données géologiques ont servi de points de référence et ont obligatoirement été respectés. Le modèle géologique a été généré pour un maillage de 50 mètres de côté en adéquation avec le modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN. Ainsi, pour chaque nœud de la grille, le krigeage fournit une valeur estimée et une erreur de krigeage correspondant à l'incertitude associée à toute valeur interpolée.

La Figure 28 illustre la cartographie en isohypses de la côte du toit, du substratum, des moraines fines et des alluvions.

À partir du modèle, il est également possible de réaliser des coupes donnant un aperçu de la structuration des formations et des couches. Un exemple de ce type de représentation est fourni par la Figure 29. Celle-ci a été établie selon une direction SO-NE à la hauteur du château. Elle recoupe au sud-ouest du château les moraines fines du quartier de la place de la Merlasse, les alluvions du gave et au nord-est du château les moraines fines de la zone centrale de la vallée glaciaire. Une telle coupe montre les limites actuelles du modèle géologique actuel selon deux aspects :

- un aspect lithologique, par manque de précision liée à la faible densité d'informations disponibles au départ et à leur mauvaise répartition spatiale, même si le niveau de tourbe enregistré au sein des alluvions est bien visible ;
- un aspect morphologique, puisque le pic rocheux correspondant au château est gommé par l'utilisation du MNT IGN, seul disponible à ce jour, dont la résolution relativement faible (50 m) est peu adaptée à l'échelle d'une commune.



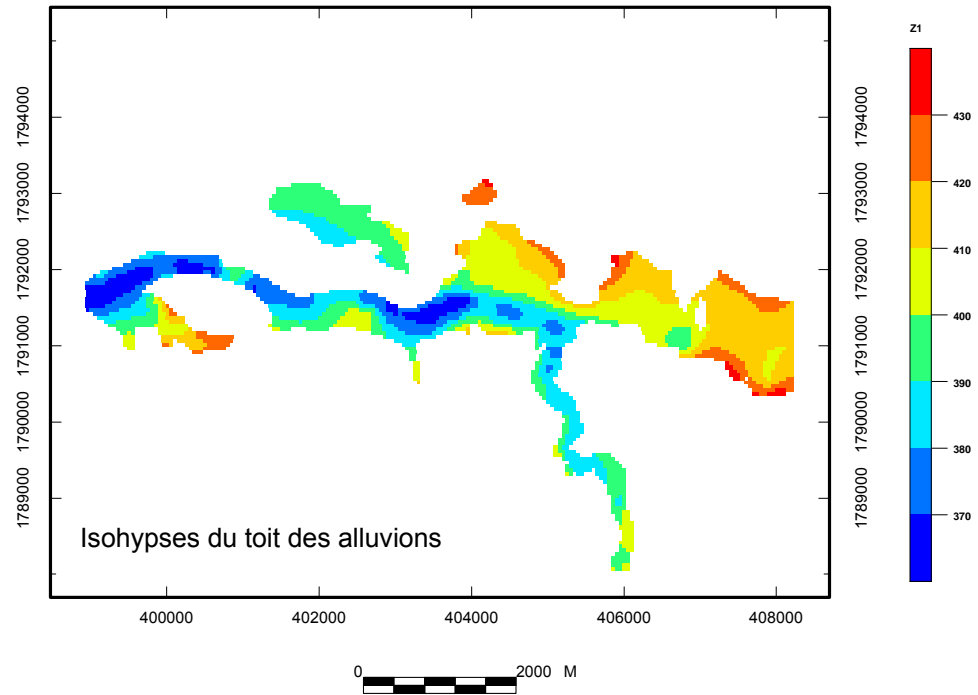


Figure 28 - Exemples de surfaces générées à partir de la base de sondages.

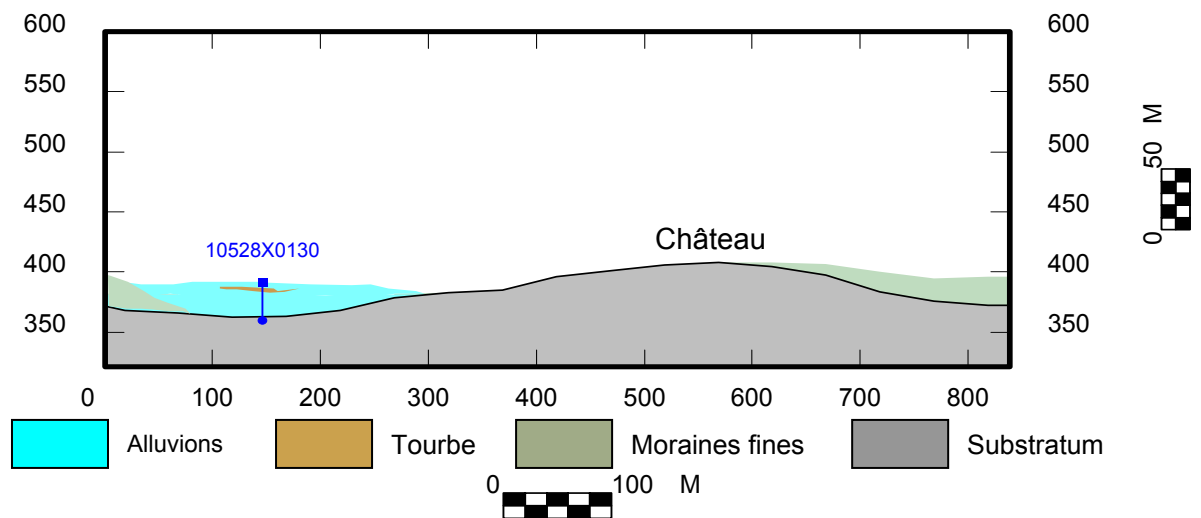


Figure 29 - Exemple de coupe réalisé à partir des surfaces des formations.

Il reste à rappeler qu'en l'état actuel des connaissances, le modèle généré devra être nécessairement amélioré compte tenu du faible nombre de sondages réels le composant. Son utilisation sera limitée à l'acquisition d'informations globales quant à la géométrie des formations géologiques. En revanche, l'intégration, dans l'avenir, de nouveaux sondages venant remplacer les sondages interprétés permettra de transformer cette première approche en un outil d'aide à la décision adapté aux problématiques d'aménagement urbain.



## 4. Zonage géotechnique

### 4.1 MÉTHODOLOGIE

Le zonage géotechnique consiste à identifier les zones présentant des caractéristiques géologiques, géomécaniques, et une réponse sismique homogènes et de fournir, pour chaque zone, des mouvements sismiques adaptés.

Ce zonage se fait en plusieurs étapes :

- compilation des données géologiques, géophysiques et géotechniques existantes, *le référencement de l'ensemble des reconnaissances est donné en rapport d'annexe ;*
- prospections géophysique et géotechnique pour compléter les données existantes, *le référencement de l'ensemble des reconnaissances est donné en rapport d'annexe ;*
- définition des zones géotechniques homogènes ;
- pour chaque zone, définition d'une ou plusieurs colonnes de sol type ;
- pour chaque zone, calcul d'un spectre de réponse adapté à partir du spectre de référence au rocher horizontal affleurant défini à partir de l'aléa sismique régional et des colonnes de sol type définies précédemment.

Ce chapitre décrit le travail réalisé pour la définition des zones géotechniques homogènes. Le calcul des spectres de réponse spécifiques pour chaque zone est décrit dans le chapitre suivant.

### 4.2. PROSPECTION GÉOPHYSIQUE

En complément de l'analyse géologique et géotechnique réalisée à partir des données existantes (carte géologique au 1/25 000, logs géologiques de la Base de Données du Sous-Sol –BSS- et rapports géotechniques fournis par la mairie), il est apparu nécessaire de compléter les données existantes par des mesures géophysiques afin de définir en particulier l'épaisseur des formations rencontrées et leur vitesse de propagation d'ondes de cisaillement Vs. Pour cela, deux techniques ont été mises en œuvre : la méthode SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) qui permet de définir ponctuellement un profil de vitesse Vs et la méthode H/V qui permet de définir la fréquence de résonance d'un site.

#### 4.2.1. La méthode SASW

Cette méthode est basée sur la dispersion des ondes de surface pour la détermination des vitesses des ondes de cisaillement Vs dans les premières dizaines de mètres du

sous sol (Bitri *et al.*, 1997 ). Elle permet d'obtenir un profil de vitesse, en plusieurs points, pour un coût largement inférieur aux méthodes destructives habituellement utilisées en géotechnique (*cross-hole*). La vitesse des ondes de cisaillement  $V_s$  intervient dans l'évaluation des modifications du signal sismique à la surface par rapport au mouvement au rocher (effets de site). C'est donc un paramètre déterminant dans une étude d'aléa sismique local ou de microzonage sismique.

Le matériel nécessaire pour effectuer des mesures sismiques des ondes de surface est composé d'une centrale d'acquisition sismique, de géophones (Figure 30) et d'une source impulsionnelle (ici une chute de marteau).

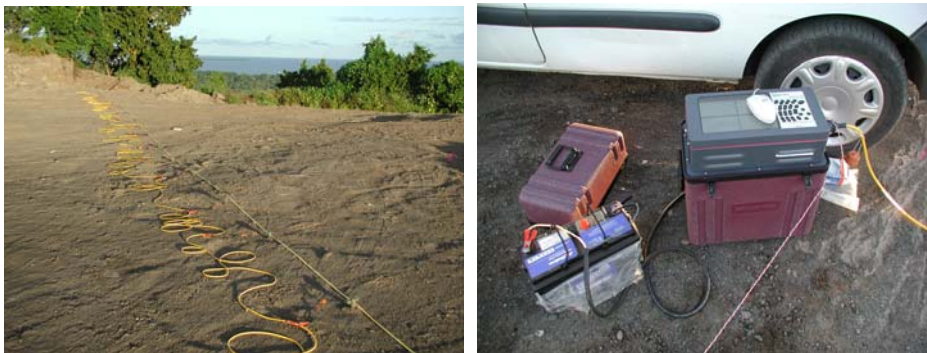


Figure 30 - Dispositif SASW utilisé à Mayotte (à gauche : « flûte » de géophones, à droite : station d'acquisition).

Les ondes de surface se propagent parallèlement à la surface de la terre. Dans le cas d'un milieu dont les propriétés élastiques varient avec la profondeur, la vitesse des ondes de surface varie avec la longueur d'onde, et donc avec la fréquence. Cet effet est appelé dispersion. Suivant la fréquence considérée, les ondes de surface contiennent de l'information sur les milieux traversés entre la surface et la profondeur maximale de pénétration des différents modes. En analysant la dispersion de ces ondes, il est donc possible d'obtenir des informations sur les valeurs des paramètres physiques à différentes profondeurs. Le maximum d'énergie dans le diagramme de dispersion donne les courbes de dispersion. Ces courbes, ainsi que les barres d'erreurs associées, sont ensuite inversées à partir d'un modèle de vitesse *a priori*, dans le but de retrouver le profil vertical de vitesse des ondes S.

#### 4.2.2. La méthode H/V bruit de fond

De nombreuses techniques théoriques, numériques ou instrumentales ont été développées pour estimer les effets de site lithologiques (Sabourault, 1999). Les techniques expérimentales font généralement appel à un site de référence, c'est-à-dire un site rocheux n'amplifiant pas le mouvement sismique. Ce site rocheux n'est pas toujours présent sur les zones d'études, ce qui peut engendrer des erreurs dans les estimations des effets de site. C'est pourquoi des techniques plus récentes, ne faisant pas intervenir de site de référence, ont été mises au point. L'une de ces techniques consiste, à partir de l'enregistrement du bruit de fond ambiant, à calculer le rapport spectral entre les composantes horizontales et la composante verticale : c'est la

méthode appelée couramment H/V (Nogoshi, 1971, Nakamura, 1989 et 1996). Le dispositif expérimental est constitué d'un sismomètre trois composantes et d'une station d'acquisition (Figure 31).



*Figure 31 - Dispositif H/V utilisé à Mayotte (à gauche : la station d'acquisition et à droite : le sismomètre tridimensionnel 5 secondes).*

Les principes physiques sous-tendus par cette méthode ne sont actuellement pas tous bien cernés. Cependant, de nombreuses expériences ont comparé cette méthode avec des méthodes classiques et ont montré sa capacité à évaluer la fréquence propre du site puis, en conjonction avec d'autres éléments, les effets de site proprement dits. L'explication la plus communément admise est la suivante : soit un modèle très simple constitué d'une couche meuble (souvent sédimentaire) surmontant un demi-espace homogène. Le bruit de fond est engendré par des sources proches comme le trafic urbain et donc composé d'ondes de surface. Seules les composantes horizontales sont amplifiées par les réflexions sur les interfaces des couches sous-jacentes. La composante verticale du bruit de fond contient, elle, la signature des sources de bruit. On suppose également que la base de la couche sédimentaire n'est pas affectée par les ondes de surface.

Pour obtenir une pseudo-fonction de transfert à l'aide du bruit de fond, en s'affranchissant de l'effet de source, on divise donc le spectre d'une composante horizontale par le spectre de la composante verticale (d'où l'appellation H/V). Ce rapport donne avec une bonne précision la fréquence de résonance fondamentale du site (ou fréquence propre), mais également une amplification spectrale relative qui dépend notamment du mode de traitement du signal. Les différentes amplifications relatives peuvent être comparées entre elles à condition d'avoir été établies avec les mêmes traitements.

En définitive, la réalisation d'une campagne de mesures ponctuelles H/V permet, en première approche, de déterminer en chaque point de mesure la fréquence propre du sol.

Lorsque la géométrie du site peut être assimilée à un milieu mono-dimensionnel, On peut relier l'épaisseur d'une couche sédimentaire meuble (ayant un fort contraste



d'impédance avec le substratum rocheux) à sa fréquence de résonance fondamentale  $f_0$  par l'expression :

$$H = \frac{V_s}{4f_0}$$

avec  $H$  : épaisseur moyenne de la couche meuble,

$V_s$  : vitesse moyenne de propagation des ondes S dans la couche meuble,

$f_0$  : fréquence de résonance fondamentale de la couche meuble.

La connaissance de deux paramètres permet donc d'estimer le troisième :  $V_s$  et  $f_0$  connues donnent  $H$  par exemple (Sabourault et Bitri, 2001).

### 4.3. MESURES GÉOPHYSIQUES DISPONIBLES ET RÉALISÉES

Un travail préliminaire avait ainsi été réalisé par Dubos *et al.*, (2003) précisément sur la ville de Lourdes. Cette étude visait à comparer les spectres de Fourier obtenus à partir des enregistrements de séismes en chaque site à une station de référence située sur le rocher. Cette comparaison permet de mettre en évidence la présence d'effets de site et de les quantifier sur la ville. Les valeurs d'amplification ainsi obtenues sur des mouvements faibles générés par des séismes de faible magnitude ont ainsi pu atteindre un facteur 10 sur les bords du Gave, et des variations géographiques extrêmement rapides, à l'échelle de quelques centaines de mètres.

Ces résultats ont été pris en compte et intégrés dans le cadre de cette étude.

### 4.4. MESURES GÉOTECHNIQUES DISPONIBLES ET RÉALISÉES

Les données géotechniques dont nous disposons sont issues des rapports suivants :

- mars 1964 - Foncapsol - « Lourdes - Salle Polyvalente - Sondages de reconnaissance » dossier n° 8144/1 ;
- 28 Janvier 1974 - CEBTP - « Lourdes - Palais des Congrès - Etude géotechnique complémentaire » - n° SF73 / 222.8.518 ;
- 6 Juin 75 - CEBTP - « Jardin de l'You à Lourdes » - n° 333.6.007 ;
- 1<sup>er</sup> Juillet 1977 - LRCP de Toulouse - « Elargissement à 2 x 2 voies de la RN21 à Lourdes - Reconnaissance géotechnique du tracé - Etude spécifique de la compressibilité des sols dans la zone du marais du Monge » - n° 65.L.6 - MS/GT. 16876 ;

- 12 Juillet 1979 - LRCP de Toulouse - « RN21 - Etude hydrogéologique du Marais de Monge à Lourdes » - n° 65.L.31 - MS 17889 ;
- décembre 1979 - LRPC de Toulouse - « Utilisation d'une plateforme d'essai comme moyen d'étude des remblais sur sols compressibles - Application au remblai du Monge à Lourdes » - n° FAER 1.06.15.8 ;
- 28 Octobre 1982 - Soletco - « Lourdes 65 - Assainissement - Quartier de Lannedarré » - n° 7747BX ;
- 15 Septembre 1983 - LRCP de Toulouse - « Elargissement à 2 x 2 voies de la RN21 au droit du marais de Monge - Notice de synthèse géotechnique » - courrier n° MS/CM/AB-2417/83 ;
- 17 Août 1984 - Soletco - « Lourdes 65 - Trinquet - Gymnase » - n° 9423BX ;
- 30 Septembre 1988 - Soletco - « Lourdes 65 - Trinquet - Gymnase - Reconnaissance complémentaire sur le site n° 2 » - n° 13604 ;
- 25 juillet 1996 - LRPC de Toulouse - « RN21 - Remblai du Monge à Lourdes » - Courrier 65/11-96/100 ;
- juillet 1997 - LRPC de Toulouse - « RN21 - Lourdes - Le remblai des Monges - Etude des dispositions constructives pour réduire les déformations de la RN21 à l'entrée de Lourdes » - Dossier n° 65/11-99/013 ;
- 1999 - LRPC de Toulouse - « RN21 - Lourdes - Le remblai des Monges - Etude des dispositions constructives pour réduire les déformations de la RN21 à l'entrée de Lourdes - Dossier préliminaire » - n° 65/11-99/013 ;
- mars 1999 - LRCP de Toulouse - « Reconnaissance géotechnique d'un terrain en bordure du Marais du monge - Résultats des sondages - Analyse de la constructibilité du terrain » - n° 65/11 - 91/153 ;
- 14 Avril 1999 - Ingesol - « Marais du Monge à Lourdes - Etude de sol » - n° 99.607 ;
- novembre 1999 - LRPC de Toulouse - « RN21 - Lourdes - Le remblai des Monges - Etude des dispositions constructives pour réduire les déformations de la RN21 à l'entrée de Lourdes » - n° 65/11-99/013.

Ces données sont localisées sur la Figure 32.

De plus, pour réaliser cette étude géotechnique, nous avons utilisé des données de sondage issues de la BSS (10528X0071/S, 10528X0001/S, 10528X0005/S, 10528X0014/S, 10528X0017/S, 10528X0074/S, 10528X0006/S, 10528X0083/S/GB, 10528X0018/S, 10528X0082/S, 10528X0081/S, 10528X0092/S, 10528X0039/S, 10528X0035/S, 10528X0036/S, 10528X0037/S, 10528X0038/S, 10528X0032/S, 10528X0033/S, 10528X0029/S, 10528X0028/S, 10528X0004/S, 10528X0013/S, 10528X0064/F, 10528X0031/S, 10528X0092/S, 10528X0082/S, 10528X0027/S, 10524X0005/S, 10524X0020/S, 10524X0017/S, 10524X0008/L, 10524X0002/S, 10524X0007/S, 10528X0015/S, 10528X0071/S).

Par ailleurs, une campagne d'essais géotechnique a été réalisée par la société 2GH pour cette présente étude, dans des zones pour lesquelles nous avons peu de données :

- 18 sondages à la pelle ;
- 3 sondages à la tarière.

Ces sondages ont fourni la lithologie ainsi que l'état de saturation des sols.

Dans les sondages à la tarière, 9 échantillons ont été prélevés à différentes profondeurs, et sur lesquels une analyse granulométrique, la mesure de teneur en eau, la mesure de l'indice de plasticité, et l'essai de valeur de bleu ont été réalisés.

Ces données sont également localisées sur la Figure 32. Le référencement de l'ensemble des reconnaissances est donné en rapport d'annexe.

#### **4.4.1. Mesures réalisées à Lourdes**

Une campagne de plus de 150 mesures H/V a été réalisée en collaboration avec l'Observatoire Midi-Pyrénées sur l'ensemble de la commune (voir rapport OMP en annexe + courbes H/V). Cette campagne a été complétée par la réalisation de 25 profils SASW par le BRGM. L'ensemble des données géophysiques et géotechniques finalement disponibles pour ce microzonage est représenté sur la Figure 32. Le référencement de l'ensemble des reconnaissances est donné en rapport d'annexe.

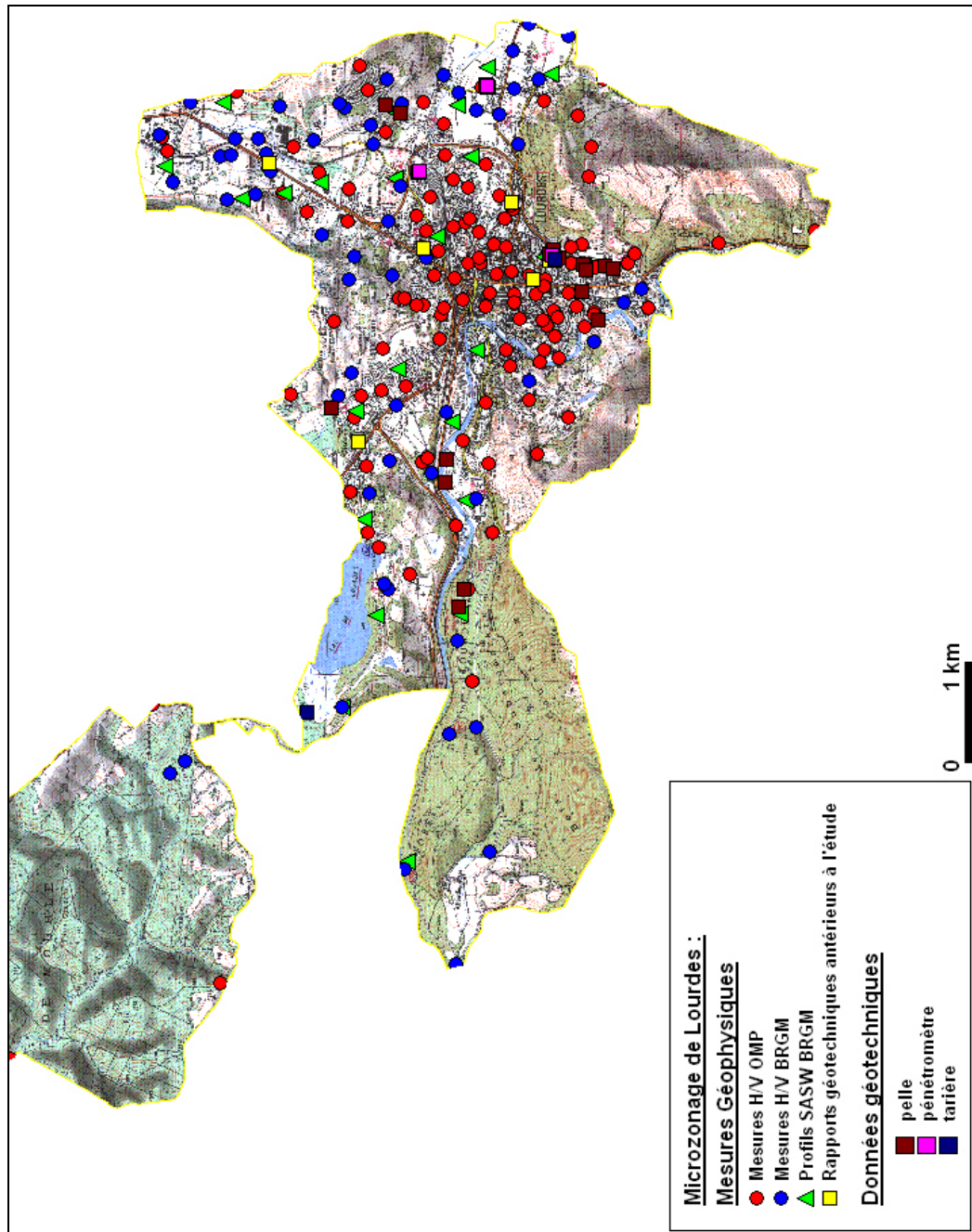


Figure 32 - Localisation des données géophysiques et géotechniques disponibles pour le microzonage sismique de Lourdes.

#### 4.5. ZONAGE GÉOTECHNIQUE

L'analyse conjointe des données géologiques, géophysiques et géotechniques disponibles a permis de définir 14 zones distinctes décrites dans la suite de ce paragraphe et cartographiées dans la Figure 33. Par souci de simplification, nous appelons cette figure « zonage géotechnique ».

#### **4.5.1. Zone 0 : Rocher**

Cela correspond à toutes les zones où se trouvent des formations rocheuses affleurantes ou sub-affleurantes, à savoir :

- les flyschs cénomaniens (Crétacé Supérieur) présents principalement à Lanne Daré et Biscaye et dans la forêt de Lourdes à l'Ouest ;
- les marnes et calcaires de l'Aptien (Crétacé Inférieur) présents principalement au niveau du Pic du Ger au Sud-Est de la commune et au niveau du Béout et de la grotte du Loup au Sud de la Basilique.

Cette zone ne présente pas d'effet de site lithologique.

#### **4.5.2. Zone 1 : Gave Sud**

Cette zone correspond aux formations alluviales récentes (Fz) situées le long du Gave de Pau, dans sa partie Sud, à savoir entre le centre de Lourdes et le sud de la commune.

Cette zone à effet de site se caractérise par des rapports spectraux H/V assez homogènes avec une fréquence de résonance comprise entre 1.0 et 2.7 Hz, ce qui correspond à une couche de matériaux mous assez épaisse (de l'ordre de 25 à 35 m pour une vitesse d'onde S de l'ordre de 300 m/s d'après la SASW). Au Sud de la zone, à la limite avec la commune d'Aspin en Lavedan; on note une fréquence de résonance beaucoup plus haute (11 Hz) qui correspond à une diminution de l'épaisseur de la couche superficielle d'alluvions en limite de zone.

#### **4.5.3. Zone 2 : Lac de Lourdes**

Cette zone correspond aux unités d'alluvions actuelles ou de dépôts lacustres (Fz) situées en bordure du lac de Lourdes et au niveau du ruisseau du Baratchélé au Nord de Biscaye.

Nous avons peu d'informations géophysiques sur cette zone hormis les quelques points H/V réalisés autour du lac de Lourdes et les deux profils SASW réalisés au niveau du golf, près du lac. Les mesures H/V présentent des réponses très variées allant de points sans effet de site apparent (point 59 par exemple) à des points caractérisés par des fréquences de résonance très basses (de l'ordre de 1.5 Hz pour le point n°1 de l'OMP), en contradiction avec le profil SASW réalisé dans la zone et indiquant la présence d'une couche molle de faible épaisseur en surface (de l'ordre de 15 m) et une augmentation régulière des caractéristiques mécaniques des sols en profondeur. La variabilité des résultats observée est peut-être due à une grande hétérogénéité des caractéristiques mécaniques des sols dans cette zone. Nous nous sommes donc basés essentiellement sur la carte géologique pour définir les contours de cette zone qui peut présenter de forts effets de site du fait des caractéristiques mécaniques potentiellement médiocres des sols résultant de dépôts lacustres récents (ancienne zone marécageuse).

#### **4.5.4. Zone 3 : Gave Basilique**

Cette zone à effet de site correspond aux formations alluviales récentes (Fz) situées le long du Gave de Pau, au niveau de la Basilique. Elle a été distinguée de la zone 1 dite du « Gave Sud » en raison de la présence d'un surcreusement local mis en évidence par les sondages de la BSS. La profondeur maximale du substratum (45 m) est atteinte au niveau de la Basilique pour revenir à 0 (rocher affleurant) quelques 300 m plus au Nord. Ce surcreusement peut difficilement s'expliquer par une simple érosion alluviale : il pourrait correspondre à une action glaciaire même si les matériaux décrits sur les logs de sondage ne traduisent pas la présence de matériel morainique (pas de niveau à blocs).

#### **4.5.5. Zone 4 : Gave Ouest**

Cette zone correspond aux formations alluviales récentes (Fz) situées le long du Gave de Pau, entre la Basilique et l'usine électrique à l'Ouest de la Basilique. Elle englobe également les alluvions et un petit pointement de moraines présentes au Sud du gave au niveau du couvent et du château épiscopal dans la mesure où les résultats H/V obtenus ne permettent pas de les distinguer des alluvions récentes.

Cette zone se caractérise par des effets de site marqués avec des fréquences de résonance de 4 à 5 Hz, ce qui coïncide avec les épaisseurs de couche indiquées dans les logs géologiques de la BSS. Les fréquences de résonance deviennent plus hautes (8 à 13 Hz) en limite de zone, là où la couche superficielle molle s'amincit.

#### **4.5.6. Zone 5 : Alluvions Abbadie**

Cette zone correspond aux formations alluviales datées du Riss (Fx) situées à l'Ouest de la commune de Lourdes, au niveau de la forêt de Lourdes. Elle se caractérise par la présence d'alluvions en surface puis par une couche de moraines à blocs caractérisée par une augmentation régulière de la vitesse Vs, avant d'atteindre le substratum sismique.

Les rapports spectraux H/V indiquent des effets de site faibles pour des fréquences de l'ordre de 4 à 6 Hz.

#### **4.5.7. Zone 6 : Alluvions du Centre**

Cette zone correspond à la formation morainique du centre ville (Gya) d'âge Würm. La formation Gya est constituée essentiellement de matériaux sablo-graveleux d'épaisseur importante (pouvant aller jusqu'à 45 m) surmontant le substratum. Elle correspond à une zone de surcreusement brutal liée à l'activité glaciaire. Des études géotechniques existantes (étude technique du CEBTP) réalisées dans le jardin d'You indique la nature alluviale (ou au moins torrentielle) de ces dépôts fins, qui semblent très hétérogènes.

Les résultats H/V obtenus dans cette zone sont denses mais assez homogènes avec des effets de site importants et des fréquences de résonance basses (entre 1 et 2 Hz en général, ce qui correspond à des épaisseurs de couche de l'ordre de 30 à 45 m pour une vitesse  $V_s$  de l'ordre de 300 m/s).

#### **4.5.8. Zone 7 : Alluvions Anclades**

Il s'agit de la zone Est constituée d'alluvions würmiennes (Fya). Elles ont été distinguées des alluvions Fya situées au niveau de la gare dans la zone 6 du fait de la différence de réponse sismique observée sur les rapports spectraux H/V et de la séparation physique de ces deux zones par le ruisseau des Graves. Les résultats indiquent de forts effets de site avec une couche molle superficielle de forte épaisseur vers le centre de la zone (fréquence de résonance comprise entre 1.1 et 1.5 Hz) et une nette diminution de l'épaisseur de cette couche vers les bords de la zone (au Sud vers le Pic du Ger et au Nord vers Sarsan) qui se traduit par une augmentation de la fréquence de résonance (5 à 8.5 Hz).

#### **4.5.9. Zone 8 : La Citoyenne**

Cette zone correspond à la petite étendue de moraines du Riss (Gx), potentiellement génératrices d'effets de site, présente à l'ouest du Gave, entre la Peyramale et la Citoyenne.

#### **4.5.10. Zone 9 : Flyschs Biscaye**

Cette zone correspond aux alluvions du Würm (Fya) présents autour de Biscaye, au Nord de la commune. Les résultats H/V obtenus pour cette zone sont très hétérogènes, avec des fréquences de résonance allant de 2 Hz au centre de la zone à 7.5 Hz en bord de zone, près de la zone rocheuse de Lanne Daré.

Cette zone comprend également les formations morainiques d'âge Mindel (Gw) et les formations du Miocène et du Pliocène (m3 et p) de composition essentiellement argileuse plaquée sur flyschs du Crétacé, situées en limite de la forêt de Mourle au Nord-Ouest de la commune. Les fréquences de résonance de ces formations sont du même ordre de grandeur à celles obtenue pour les alluvions du Würm.

#### **4.5.11. Zone 10 : Moraines de Saux**

Cette zone occupe l'essentiel de la vallée de Saux, au Nord de la ville. Elle est constituée de moraines d'âge Riss (Gx). Les logs géologiques ainsi que les résultats H/V obtenus au Nord de la zone indiquent la présence de deux couches distinctes : des moraines fines en surface surmontant des moraines à gros blocs puis le substratum sismique. Les résultats obtenus par la méthode H/V sont très hétérogènes pour cette zone avec des fréquences de résonance généralement comprises entre 3.3 et 6 Hz et une grande variabilité spatiale des résultats. Cela peut s'expliquer d'une part par l'hétérogénéité des propriétés mécaniques des moraines et d'autre part par la

possible variabilité de la profondeur du substratum sismique. Il est à noter la présence d'argiles vasardes au Sud de la zone (lotissement Mozart) qui seront à prendre en compte lors de l'établissement des colonnes de sol.

#### **4.5.12. Zone 11 : Terrasses de Sarsan**

Cette zone correspond principalement aux parties Est et Nord des moraines du Riss (Gx) situées au Nord de la ville (vallée de Saux). Elle correspond à des terrasses morainiques caractérisées par la présence de moraines à gros blocs reposant directement sur le substratum. La limite de cette zone a été définie à partir de la carte géologique et d'observations faites sur le terrain. Les résultats des quelques mesures H/V réalisées sur ce secteur sont très hétérogènes. L'effet de site semble peu marqué. Leur caractérisation géologique particulière a nécessité leur individualisation.

#### **4.5.13. Zone 12 : Marais de Monge**

Cette zone correspond à l'extension maximale du marais de Monge caractérisé par la présence de tourbes en surface. Ces tourbes se caractérisent par de très faibles vitesses d'onde S (inférieures à 200 m/s). Les limites de cette zone ont été définies à partir des données géotechniques existantes.

#### **4.5.14. Zone 13 : Alluvions Gare**

Cette zone correspond à la formation alluviale Fya d'âge Würm située au Nord du Centre, à la hauteur de la gare. La formation Fya correspond à des matériaux sablo-gravelaux similaires à ceux décrits pour la formation Gya de la zone 6 mais avec un socle qui remonte vers le Nord donc des épaisseurs de couche alluviales inférieures.

Les fréquences de résonance obtenues à partir des mesures H/V sont comprises entre 2.5 et 5.5 Hz et variables dans l'espace, indiquant probablement une variabilité spatiale importante de la profondeur du substratum.



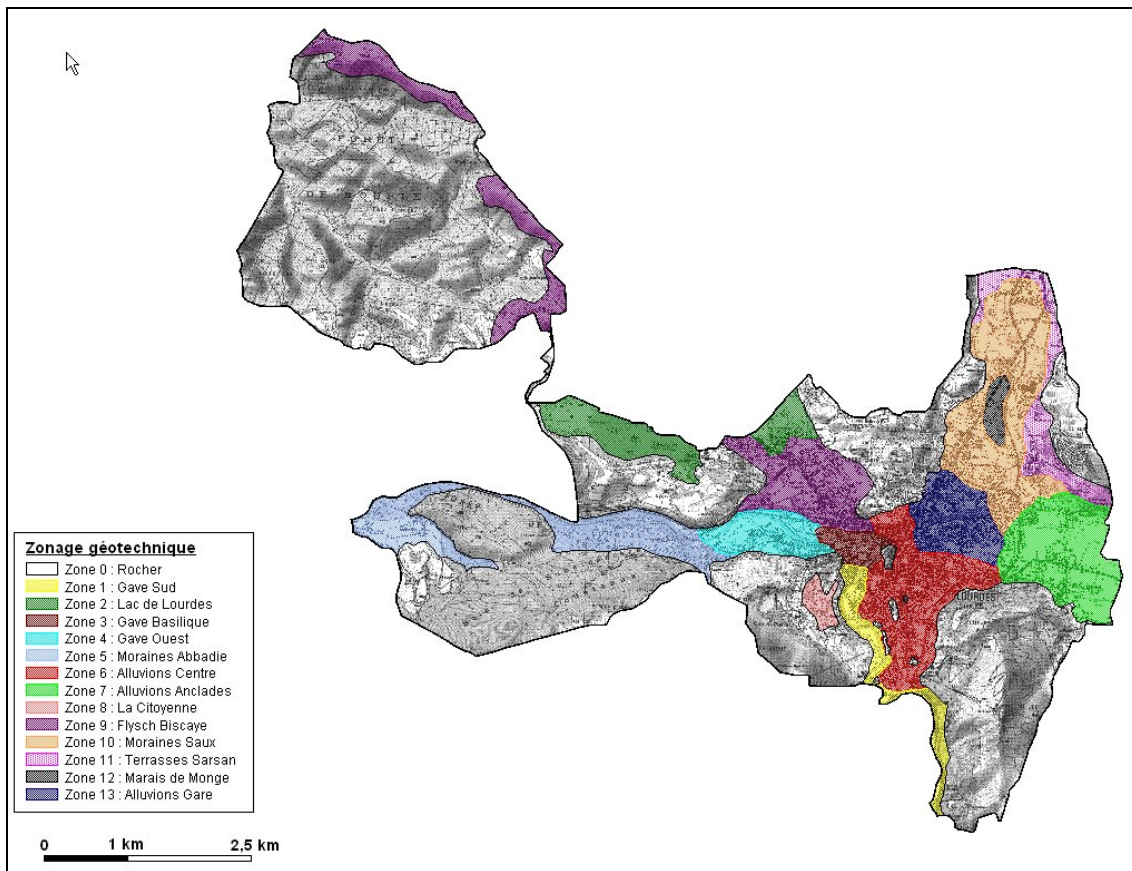


Figure 33 - Zonage géotechnique de la commune de Lourdes.

## **5. Synthèse géologique, géophysique et géotechnique : détermination des colonnes de sol**

### **5.1. PRÉAMBULE**

L'objectif de cette analyse géotechnique est d'identifier et de caractériser une ou plusieurs colonnes de « sol » (formations géologiques) représentatives de chaque zone définie dans le chapitre précédent en dehors des zones où le rocher est affleurant ou sub-affleurant, afin de calculer le spectre de réponse tenant compte des conditions de site.

### **5.2. CARACTÉRISATION DES UNITÉS GÉOMÉCANIQUES POUR CHAQUE ZONE**

#### **5.2.1. Zone Gave Sud**

##### ***5.2.1.1. Données géotechniques***

Les données disponibles pour cette zone sont les suivantes :

- 1 profil de SASW ;
- 1 sondage à la pelle ;
- plusieurs sondages BSS.

##### ***5.2.1.2. Caractéristiques des formations***

###### ***a. Alluvions***

###### ***- Lithologie***

Les sondages à la pelle montrent la présence de limons argileux fins jusqu'à 1.5 m de profondeur, puis des graves sableuses avec des galets centimétriques à décimétriques jusqu'à 4 m. Des sables limoneux sont rencontrés dans les sondages BSS.

La carte géologique indique que nous sommes en présence d'alluvions et moraines du Würm 3 (Fz).

- Vs

Les données issues du profil SASW fournissent une vitesse Vs moyenne de 245 m.s<sup>-1</sup>.

- *Épaisseur*

Les mesures de SASW montrent une interface à 10 m de profondeur.

### **b. Limons schisteux**

- *Lithologie*

Des sondages montrent la présence de limons schisteux, avec des matériaux sablo-graveleux.

- Vs

Les données issues du profil SASW montrent la présence d'une interface dans cette formation. Nous définissons ainsi deux couches :

- une couche de 10 m d'épaisseur, avec une vitesse Vs moyenne de 428 m.s<sup>-1</sup>,
- une couche de 15 m d'épaisseur, avec une vitesse Vs moyenne de 681 m.s<sup>-1</sup>.

- *Épaisseur*

Selon les sondages BSS leur épaisseur est d'environ 18 m. Mais d'après les mesures de H/V, la limite entre la couche de sol superficielle et le substratum est de 35 m. Ainsi nous considérons une épaisseur totale de 25 m avec les deux sous-couches précédemment définies.

### **c. Substratum**

- *Lithologie*

Le substratum est constitué de schistes.

- Vs

Nous considérons une valeur de vitesse Vs de 800 m.s<sup>-1</sup>.

- *Profondeur*

D'après les sondages BSS, le substratum semble peu profond dans cette zone, situé à 18 m de profondeur. Mais les mesures de H/V situent le substratum à 35 m de profondeur.

### 5.2.1.3. Récapitulatif

Le Tableau 6 synthétise les données géotechniques et géophysiques exploitées.

Formation	Épaisseur	Vs (m/s)	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Alluvions	10 m	245	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Limons schisteux	10 m	428	Sols de bonne résistance mécanique (groupe a)
Limons schisteux	15 m	681	Sols de bonne résistance mécanique (groupe a)
Substratum	-	800	Sol de type rocher sain

Tableau 6 - Caractéristiques des formations géologiques.

### 5.2.1.4. Hydrogéologie

Les sondages à la pelle ont mis en évidence de fortes arrivées d'eau, étant donné que la zone est située en bordure du gave. Ainsi le milieu est saturé.

## 5.2.2. Zone Lac Lourdes

### 5.2.2.1. Données géotechniques

Les données disponibles pour cette zone sont les suivantes :

- 1 profil de SASW ;
- un sondage à la tarière a été réalisé lors de l'étude géotechnique menée par 2GH pour cette étude de microzonage sismique ;
- des échantillons ont été prélevés de ce sondage à 2 profondeurs différentes : 1.5 - 2.4m et 2.4 - 5.8 m, sur lesquels une analyse granulométrique, une mesure de teneur en eau, de l'indice de plasticité et de valeur de bleu ont été réalisés.

### 5.2.2.2. Caractéristiques des formations

#### a. Argiles

- *Lithologie*

Le sondage à la tarière montre la présence d'argiles pouvant être compactes.

*- Essais laboratoires*

Des essais laboratoires ont été réalisés sur des échantillons prélevés à 2 profondeurs : 1.5 - 2.4 m et 2.4 - 5.8 m.

Le Tableau 7 fournit les résultats des essais réalisés :

Formation	Teneur en eau (en %)	VBS	Ip	D <sub>max</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>60</sub>	C <sub>u</sub>	D <sub>50</sub>	Cat.NFP11-300
Argile	37.7	0.55	< 5	13	0.002	0.08	40	0.048	A <sub>1</sub>
Argile compacte	41.2	0.7	< 5	20	0.001	0.3	300	0.1	A <sub>1</sub>

*Tableau 7 - Résultats des essais en laboratoire.*

Ces deux formations correspondent à des limons peu plastiques.

*- Vs*

Les données issues du profil SASW LOU12 mettent en évidence une couche superficielle de 9 m d'épaisseur environ. La valeur de vitesse Vs moyenne sur cette épaisseur est de 306 m.s<sup>-1</sup>.

*- Épaisseur*

Leur épaisseur est d'environ 9 m.

**b. Limons**

*- Lithologie*

En absence d'informations concernant cette couche, nous considérons que cette formation est la même que la couche superficielle, i.e. limoneuse, mais plus compacte, montrant ainsi une vitesse Vs plus importante.

*- Vs*

Les données issues du profil SASW LOU12 fournissent une valeur de vitesse Vs de 560 m.s<sup>-1</sup>.

*- Épaisseur*

L'épaisseur de cette couche est déterminée selon le profil de SASW, soit environ 13 m.

### **c. Substratum**

#### *- Lithologie*

Le substratum est constitué de flyschs.

#### *- Vs*

Les données issues du profil SASW LOU12 fournissent une valeur de vitesses Vs de 825 m.s<sup>-1</sup> sous la deuxième couche.

#### *- Epaisseur*

Le substratum est considéré à 22 m de profondeur.

### **5.2.2.3. Récapitulatif**

Le Tableau 8 synthétise les données géotechniques et géophysiques exploitées.

<b>Formation</b>	<b>Épaisseur</b>	<b>Vs (m/s)</b>	<b>Consistance du terrain (cf. classement PS 92)</b>
Argiles	9 m	306	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Limons	13 m	560	Sols de bonne résistance mécanique (groupe a)
Substratum	-	825	Sol de type rocher sain

*Tableau 8 - Caractéristiques des formations géologiques.*

### **5.2.2.4. Hydrogéologie**

Le sol est saturé sur l'ensemble de l'épaisseur.

### **5.2.3. Zone Gave basilique**

#### **5.2.3.1. Données géotechniques**

Peu de données sont disponibles pour cette zone :

- 1 profil de SASW ;
- plusieurs sondages BSS.

### **5.2.3.2. Caractéristiques des formations**

#### **a. Alluvions**

##### *- Lithologie*

La carte géologique indique que nous sommes en présence d'alluvions et moraines du Würm 3 (Fz). Des sondages de la BSS réalisés dans cette zone montrent la présence de matériaux fins sableux.

##### *- Vs*

Les données issues du profil SASW LOU09 montrent une interface assez marquée autour de 15 m de profondeur. La moyenne des vitesses Vs sur cette épaisseur est de 306 m.s<sup>-1</sup>.

##### *- Épaisseur*

Selon les sondages disponibles dans cette zone leur épaisseur est d'environ 15 m, ce qui est en accord avec les données issues du profil SASW.

#### **b. Limons schisteux**

##### *- Lithologie*

Des sondages montrent la présence de limons schisteux, avec des matériaux sablo-graveleux.

##### *- Vs*

Le profil SASW LOU09 fournit une coupe de vitesse jusqu'à 30 m de profondeur. La moyenne des vitesses Vs sur cette épaisseur est de 613 m.s<sup>-1</sup>.

##### *- Épaisseur*

Selon le profil sismique obtenu par la SASW, l'épaisseur minimum de cette couche est de 15 m. Toutefois, un sondage de la BSS a montré que le substratum pouvait se situer jusqu'à 45 m de profondeur dans cette zone. Ainsi, une épaisseur de 30 m de limons schisteux est considérée.

#### **c. Substratum**

##### *- Lithologie*

Pas d'informations

- Vs

Nous considérons une valeur de vitesse Vs de 800 m.s<sup>-1</sup>.

- Profondeur

Le substratum se situe à 45 m de profondeur selon un sondage BSS.

### 5.2.3.3. Récapitulatif

Le Tableau 9 synthétise les données géotechniques et géophysiques exploitées.

Formation	Épaisseur	Vs (m/s)	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Alluvions	15 m	306	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Limons schisteux	30 m	613	Sols de bonne résistance mécanique (groupe a)
Substratum	-	800	Sol de type rocher sain

Tableau 9 - Caractéristiques des formations géologiques.

### 5.2.3.4. Hydrogéologie

Étant donné que la zone est située en bordure du gave, nous considérons le milieu saturé.

## 5.2.4. Zone Gave Ouest

### 5.2.4.1. Données géotechniques

Les données disponibles pour cette zone sont les suivantes :

- 2 profils de SASW ;
- 2 sondages à la pelle ;
- plusieurs sondages BSS.

### 5.2.4.2. Caractéristiques des formations

#### a. Alluvions

- Lithologie

Les sondages à la pelle montrent la présence de limons argileux fins jusqu'à 1.5 m de profondeur, puis des graves sableuses avec des galets centimétriques à décimétriques jusqu'à 4 m.



La carte géologique indique que nous sommes en présence d'alluvions et moraines du Würm 3 (Fz).

-  $V_s$

Les données issues des profils SASW LOU06 et LOU08 montrent une interface assez marquée autour de 14 m de profondeur. La moyenne des vitesses  $V_s$  sur cette épaisseur est de  $268 \text{ m.s}^{-1}$ .

- *Épaisseur*

Leur épaisseur est d'environ 14 m, selon les données issues des profils SASW.

### **b. Moraines**

- *Lithologie*

Nous sommes en présence de blocs morainiques.

- *Épaisseur*

Selon les profils sismiques obtenus par la SASW, nous considérons une épaisseur de 17 m.

-  $V_s$

Les données issues des profils SASW LOU06 et LOU08 fournissent une valeur de vitesse  $V_s$  de  $521 \text{ m.s}^{-1}$ .

### **c. Substratum**

- *Lithologie*

Pas d'informations

- *Profondeur*

Le profil de SASW LOU06 n'atteint pas le substratum sismique à 28 m tandis que LOU08 semble l'atteindre à une profondeur de 31 m. Nous considérons ainsi que le substratum est situé à une profondeur de 31 m.

-  $V_s$

Nous considérons une valeur de vitesse  $V_s$  de  $800 \text{ m.s}^{-1}$ .

### 5.2.4.3. Récapitulatif

Le Tableau 10 synthétise les données géotechniques et géophysiques exploitées.

Formation	Épaisseur	Vs (m/s)	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Alluvions	14 m	268	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Moraines	17 m	521	Sols de bonne résistance mécanique (groupe a)
Substratum	-	800	Sol de type rocher sain

Tableau 10 - Caractéristiques des formations géologiques.

### 5.2.4.4. Hydrogéologie

Les sondages à la pelle ont mis en évidence de fortes arrivées d'eau, étant donné que la zone est située en bordure du gave. Ainsi le milieu est saturé.

### 5.2.5. Zone Moraines Abbadie

#### 5.2.5.1. Données géotechniques

Les données disponibles pour cette zone sont les suivantes :

- 2 profils de SASW ;
- 2 sondages à la pelle ;
- Plusieurs sondages BSS.

#### 5.2.5.2. Caractéristiques des formations

##### a. Sables fins

###### - Lithologie

Les sondages à la pelle montrent la présence de sables avec des galets centimétriques à décimétriques jusqu'à au moins 4.1 m. A la base de ces sondages, des blocs pluri-décimétriques apparaissent.

La carte géologique indique que nous sommes en présence d'alluvions anciennes du Riss (Fx).

###### - Vs

Les données issues des profils SASW LOU10 et LOU11 montrent une interface autour de 10 m de profondeur. La moyenne des vitesses Vs sur cette épaisseur est de 251 m.s<sup>-1</sup>.

- *Épaisseur*

Leur épaisseur est d'environ 10 m, d'après les profils SASW.

**b. Moraines**

- *Lithologie*

Nous sommes en présence de moraines à gros blocs.

- *Vs*

Les deux profils de SASW fournissent une profondeur différente du substratum sismique (considéré autour de  $V_s = 800 \text{ m.s}^{-1}$ ) : le profil LOU10 donne une profondeur de 21 m, tandis que LOU11 donne une profondeur de 32 m. Nous considérons ainsi deux configurations pour cette même zone :

- a) configuration LOU10 : une couche de 11 m est considérée, avec une vitesse  $V_s$  moyenne de  $527 \text{ m.s}^{-1}$  ;
- b) configuration LOU11 : une couche de 22 m est considérée, avec une vitesse  $V_s$  moyenne de  $604 \text{ m.s}^{-1}$ .

- *Épaisseur*

Deux épaisseurs sont considérées, 11 m et 22 m.

**c. Substratum**

- *Lithologie*

Le substratum est constitué de flyschs du crétacé inférieur.

- *Profondeur*

Les deux profils de SASW fournissent une profondeur différente du substratum sismique (considéré autour de  $V_s=800 \text{ m.s}^{-1}$ ) : le profil LOU10 donne une profondeur de 21 m, tandis que LOU11 donne une profondeur de 32 m. Nous considérons ainsi deux configurations pour cette même zone.

- *Vs*

Les données issues des profils SASW LOU10 et LOU11 fournissent une valeur de vitesse  $V_s$  de  $835 \text{ m.s}^{-1}$ .

### 5.2.5.3. Récapitulatif

Les Tableau 11 et Tableau 12 synthétisent les données géotechniques et géophysiques exploitées pour les 2 colonnes considérées.

Formation	Épaisseur	Vs (m/s)	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Sables	10 m	251	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Moraines	11 m	527	Sols de bonne résistance mécanique (groupe a)
Substratum	-	835	Sol de type rocher sain

Tableau 11 - Caractéristiques des formations géologiques – Colonne 1.

Formation	Épaisseur	Vs (m/s)	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Sables	10 m	251	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Moraines	22 m	604	Sols de bonne résistance mécanique (groupe a)
Substratum	-	835	Sol de type rocher sain

Tableau 12 - Caractéristiques des formations géologiques – Colonne 2.

### 5.2.5.4. Hydrogéologie

Les sondages à la pelle (situés près de LOU11) n'ont pas mis en évidence de présence d'eau. Ainsi dans les simulations, la condition drainée sera considérée pour la colonne 2. Par contre nous pouvons penser qu'au niveau de LOU10, du fait de sa localisation proche du Gave de Pau, le sol est saturé. Cette condition sera prise en compte dans la colonne 1.

## 5.2.6. Zone Alluvions Centre

### 5.2.6.1. Données géotechniques

Beaucoup de données sont disponibles pour cette zone :

- 2 profils de SASW ;
- plusieurs sondages BSS ;
- un essai de pénétration ;
- un sondage à la tarière a été réalisé lors de l'étude géotechnique menée par 2GH pour cette étude de microzonage sismique ;
- des échantillons ont été prélevés de ce sondage à 3 profondeurs différentes : 0.9 - 2.4 m ; 2.4 – 4 m et 4 – 5.1 m, sur lesquels une analyse granulométrique, une mesure de teneur en eau, de l'indice de plasticité et de valeur de bleu ont été réalisés ;

- neuf sondages à la pelle ;
- des données issues d'une étude géotechnique avant établissement des plans d'avant projet détaillé d'un trinquet gymnase par SOLETCO dans le quartier du Tydos :
  - des essais de pénétration dynamique,
  - des sondages,
  - des analyses en laboratoire ;
- des données issues de reconnaissances géotechniques dans le jardin de l'You par le CEBTP :
  - des essais de pénétration dynamique,
  - des sondages permettant la réalisation de coupes,
  - des analyses en laboratoire ;
- des données issues d'une étude géotechnique complémentaire de l'assise du futur palais des congrès de la ville par le CEBTP :
  - des essais de pénétration statique,
  - des sondages,
  - des analyses en laboratoire.

### **5.2.6.2. Caractéristiques des formations**

#### **a. Alluvions**

##### *- Lithologie*

L'ensemble des données disponibles mettent en évidence des alluvions plus ou moins argileux avec la présence de sables, de graviers, de gravelles et/ou de galets centimétriques à décimétriques.

La carte géologique indique que nous sommes principalement dans la formation alluviale Gya qui correspond à des moraines du Würm 1.

##### *- Essais laboratoires*

Des essais laboratoires ont été réalisés sur des échantillons prélevés à trois profondeurs : 0.9 – 2.4 m ; 2.4 m – 4 m et 4 m – 5.1 m.

Le Tableau 13 fournit les résultats des essais réalisés.

Formation	Teneur en eau (en %)	VBS	Ip	D <sub>max</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>60</sub>	C <sub>u</sub>	D <sub>50</sub>	Cat.NFP11-300
Argiles sableuses	19.0	0.32	7.1	16	0.0028	0.8	285	0.48	A <sub>1</sub> ou B <sub>5</sub>
Sables argileux	21.8	0.22	<5	31.5	0.0028	0.85	303	0.45	A <sub>1</sub>
Argiles gri-bleu	35.4	0.27	7.2	20	0.002	0.35	175	0.1	A <sub>1</sub>

Tableau 13 - Résultats des essais en laboratoire.

Les formations correspondent à des limons peu plastiques, avec silts alluvionnaires ; la première couche se situe à la limite avec la catégorie B<sub>5</sub>, pour laquelle le comportement est proche des sols de type A<sub>1</sub>, avec davantage de sables et de graves.

- Vs

Les données issues des profils SASW LOU07 et LOU14 montrent de faibles vitesses Vs. La moyenne des valeurs de vitesse Vs sur une épaisseur de 8 m est de 220 m.s<sup>-1</sup>.

- Épaisseur

Selon les sondages BSS et les profils SASW, leur épaisseur est de 8 m.

## **b. Tourbes**

- Lithologie

Des tourbes peuvent apparaître dans cette zone. Des sondages réalisés au niveau du jardin d'You les ont mises en évidence. Même si cette formation n'apparaît pas sur l'ensemble de la zone, il peut sembler important d'en tenir compte dans nos calculs, étant donné l'effet que peut avoir cette formation sur le signal sismique. Ainsi la colonne de sol 1 tient compte de cette formation.

- Vs

Le profil SASW LOU07 montre une inversion de vitesse entre 8 m et 16 m, ce qui peut être attribué à cette formation. La vitesse de cette épaisseur est de 159 m.s<sup>-1</sup>.

- Épaisseur

Les sondages réalisés au niveau du jardin d'You montrent que leur épaisseur peut atteindre jusqu'à 10 m, ce qui est en bonne concordance avec le profil de SASW LOU07.

### **c. Sables fins avec graviers**

#### *- Lithologie*

Les sondages réalisés au niveau du jardin d'You montrent l'apparition de sables fins avec graviers sous les tourbes. Cette formation ne semble pas apparaître au niveau du palais des congrès.

#### *- Vs*

Les données issues du profil SASW LOU07 (profil le plus proche du jardin d'You) montrent que la vitesse reste encore faible jusqu'à 26 m de profondeur (qui constitue la profondeur limite de pénétration des ondes de surface). La moyenne de ces valeurs de vitesse jusqu'à cette profondeur est de  $386 \text{ m.s}^{-1}$ .

#### *- Epaisseur*

La profondeur maximale atteinte du substratum dans cette zone varie et n'est pas bien déterminée.

### **d. Limons**

#### *- Lithologie*

Les sondages réalisés au niveau du palais des congrès mettent en évidence une formation limoneuse, plus ou moins sableuse. A la base de cette formation, (à partir de 25 m de profondeur) des éléments graveleux apparaissent. Cette formation située au-dessus du socle est épaisse, étant donné la profondeur du socle (voir paragraphe suivant).

#### *- Vs*

Les données issues du profil SASW LOU14 montrent que la vitesse reste encore faible jusqu'à 22 m de profondeur (qui constitue la profondeur limite de pénétration des ondes de surface). La moyenne de ces valeurs de vitesse jusqu'à cette profondeur est de  $341 \text{ m.s}^{-1}$ .

#### *- Epaisseur*

La profondeur maximale atteinte du substratum dans cette zone varie et n'est pas bien déterminée. Des sondages réalisés au niveau du palais des congrès semblent l'avoir atteint à 40 m de profondeur, tandis qu'un autre sondage de 45 m de profondeur ne l'avait semble-t-il pas atteint. Cette grande profondeur est confirmée par des mesures H/V réalisée dans la même zone. Dans ces considérations, une épaisseur de 32m est considérée pour cette formation.

### e. Substratum

#### - Lithologie

Selon le sondage réalisé au niveau du palais des congrès, le substratum est constitué de calcaires métamorphiques gris blanchâtre dur et massif.

#### - Profondeur

Comme cela a été précisé dans le paragraphe précédent, la profondeur de substratum considérée est de 40 m (cette dernière profondeur sera également utilisée pour la colonne représentative du jardin d'You, étant donné que les mesures H/V réalisées dans cette zone montrent une grande profondeur de substratum).

### 5.2.6.3. Récapitulatif

Deux colonnes sont ainsi considérées :

- une colonne représentative du sol vers le jardin d'You ;
- une colonne représentative du sol vers le palais des congrès, où le substratum est le plus profond.

Les Tableau 14 et Tableau 15 synthétisent les données géotechniques et géophysiques exploitées.

Formation	Épaisseur	Vs (m/s)	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Alluvions	8 m	220	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Tourbes	10 m	159	Sols de faible résistance mécanique (groupe c)
Sables fins avec graviers	22	386	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Substratum	-	-	Sol de type rocher sain

Tableau 14 - Caractéristiques des formations géologiques.

Formation	Épaisseur	Vs (m/s)	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Alluvions	8 m	212	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Limons	32 m	341	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Substratum	-	-	Sol de type rocher sain

Tableau 15 - Caractéristiques des formations géologiques.



#### **5.2.6.4. Hydrogéologie**

Selon les sondages à la pelle, la saturation peut être plus ou moins forte à partir de 4 m de profondeur, mais dans beaucoup de sondages la saturation est faible.

Plus précisément, les sondages réalisés au niveau du jardin d'You montrent le niveau d'eau à 3 m de profondeur. Au niveau du palais des congrès, le niveau d'eau se situe à la limite des limons, soit 8 m de profondeur.

#### **5.2.7. Zone Alluvions Anclades**

##### **5.2.7.1. Données géotechniques**

Les données disponibles pour cette zone sont les suivantes :

- des sondages BSS ;
- 4 profils de SASW ;
- des données issues de l'étude géotechnique réalisée par 2GH pour cette présente étude de microzonage sismique :
  - deux sondages à la pelle,
  - un essai pénétrométrique dynamique.

##### **5.2.7.2. Caractéristiques des formations**

###### **a. Sables**

###### *- Lithologie*

Les sondages à la pelle montrent la présence de sables légèrement argileux à grave roulée dans la couche superficielle, et ce jusqu'à au moins 4 m de profondeur.

La carte géologique indique que nous sommes principalement dans la formation alluviale Fya (alluvions du Würm).

###### *- Vs*

Sur cette zone, 4 profils SASW sont réalisés. Ils peuvent parfois présenter des réponses différentes. Au niveau de la couche superficielle, les profils montrent une limite à environ 10 m de profondeur. La moyenne des valeurs de vitesse Vs sur cette épaisseur est de  $239 \text{ m.s}^{-1}$ .

###### *- Épaisseur*

Leur épaisseur est déterminée selon les sondages BSS et mesures de SASW, soit 10 m.

### **b. Limons**

#### *- Lithologie*

Nous sommes en présence de limons.

#### *- Vs*

Les données issues des profils SASW mettent en évidence une couche dont les vitesses sont assez hétérogènes. Le substratum sismique (considéré pour  $V_s=800 \text{ m.s}^{-1}$ ) semble atteint sur le profil LOU01 à 37 m de profondeur, profil qui est situé proche du rocher. La moyenne de ces valeurs sur cette épaisseur est de  $445 \text{ m.s}^{-1}$ .

#### *- Épaisseur*

Les mesures de H/V montrent que la profondeur du substratum peut atteindre 45 m. Ainsi, une épaisseur de 35 m est considérée dans les simulations.

### **c. Substratum**

#### *Lithologie*

Le substratum est constitué de flyschs du crétacé supérieur.

#### *- Vs*

Le substratum sismique ( $V_s = 800 \text{ m.s}^{-1}$ ) semble atteint sur le profil LOU01 à 37 m de profondeur, mais ce profil est situé en bordure de cette zone, proche du rocher. Les mesures de H/V montrent que la profondeur du substratum peut atteindre 45 m, ce qui sera utilisé dans les simulations.

#### *- Profondeur*

La profondeur du substratum est considérée à 45 m.

### **5.2.7.3. Récapitulatif**

Le Tableau 16 synthétise les données géotechniques et géophysiques exploitées.

<b>Formation</b>	<b>Épaisseur</b>	<b>Vs (m/s)</b>	<b>Consistance du terrain (cf. classement PS 92)</b>
Sables	10 m	239	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Limons	35 m	445	Sols de bonne résistance mécanique (groupe a)
Substratum	-	800	Sol de type rocher sain

*Tableau 16 - Caractéristiques des formations géologiques.*

#### **5.2.7.4. Hydrogéologie**

Selon les sondages BSS, des venues d'eau sont repérées entre 6 m et 7.25 m.

#### **5.2.8. La Citoyenne**

##### **5.2.8.1. Données géotechniques**

Nous ne disposons d'aucunes données pour cette zone.

##### **5.2.8.2. Caractéristiques des formations**

###### **a. Moraines**

###### *- Lithologie*

Aucun sondage n'est disponible pour cette unité cartographiée en moraines d'âge RISS. Dans la mesure où les observations de terrain ne montrent pas la présence de matériaux grossiers, il est vraisemblable qu'il s'agisse d'une formation argilo-sablo-graveleuse comme elle a pu être décrite par ailleurs

###### *- Épaisseur*

Leur épaisseur considérée est de 7 m.

###### *- Vs*

Nous ne disposons d'aucune donnée de vitesse. Selon cette formation, une vitesse Vs de 400 m.s<sup>-1</sup> est considérée.

###### **d. Substratum**

###### *- Lithologie*

Le substratum est constitué de marnes schisteuses indurées du Crétacé.

###### *- Profondeur*

La profondeur du substratum est considérée à 7 m.

##### **5.2.8.3. Récapitulatif**

Le Tableau 17 synthétise les données géotechniques et géophysiques exploitées.

Formation	Épaisseur	Vs (m/s)	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Alluvions	7 m	400	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Substratum	-	-	Sol de type rocher sain

Tableau 17 - Caractéristiques des formations géologiques.

#### 5.2.8.4. Hydrogéologie

La zone est considérée non saturée.

#### 5.2.9. Zone Flysch Biscaye

##### 5.2.9.1. Données géotechniques

Peu de données sont disponibles pour cette zone :

- 2 profils SASW ;
- des données issues d'une étude géotechnique réalisée par SOLETCO pour la ville de Lourdes avant établissement du plan d'implantation d'un collecteur et d'une station de relevage sont disponibles :
  - une description géologique du site,
  - des mesures de teneur en eau et de densité humide pour chaque couche ;
- un sondage à la pelle ;

##### 5.2.9.2. Caractéristiques des formations

###### a) Limon-tourbes-vases

###### - Lithologie

Les logs de forages montrent la présence de limons argileux marron à graviers, galets et débris schisteux. Selon les zones considérées, des tourbes ou des sables vasards peuvent apparaître. Des vases gris-bleu contenant quelques graviers anguleux et des passages sableux noirâtres apparaissent ensuite, le plus souvent entre 2 et 4 m. Ces faciès présentent des caractéristiques mécaniques très médiocres.

###### - Épaisseur

Leur épaisseur est d'environ 4 m.

###### - Vs

Les données issues des profils SASW LOU15 et LOU16 fournissent une valeur de vitesse Vs de 155 m.s<sup>-1</sup>.

## **b. Alluvions**

### *- Lithologie*

Des sondages montrent la présence de galets grossiers dans une matrice argileuse.

### *- Vs*

Les données issues des profils SASW montrent une interface autour de 10 m de profondeur. La valeur de vitesse  $V_s$  moyenne sur cette épaisseur est de  $343 \text{ m.s}^{-1}$ .

### *- Épaisseur*

Les forages ne permettent pas de déterminer leur épaisseur. Selon les profils SASW, nous considérons une épaisseur de 6 m.

## **c. Alluvions**

### *- Lithologie*

Cette formation est la même que la couche sus-jacente, avec cependant une vitesse  $V_s$  plus importante liée à la profondeur de cette couche (et donc à sa compacité).

### *- Vs*

Les deux profils ne fournissent pas la même vitesse pour cette couche. Le profil LOU16 semble atteindre le substratum à 22 m de profondeur, tandis que le profil LOU15 ne l'atteint pas à 26 m de profondeur. La valeur de vitesse  $V_s$  moyenne sur cette couche est de  $564 \text{ m.s}^{-1}$ .

### *- Épaisseur*

Un sondage BSS semble atteindre le substratum vers 22 m de profondeur. Ainsi, l'épaisseur retenue pour cette couche est de 12 m.

## **d. Substratum**

### *- Lithologie*

Le substratum est constitué par les flyschs du Crétacé.

### *- Vs*

Le substratum sismique semble atteint sur le profil LOU16 à 22 m de profondeur avec  $V_s = 800 \text{ m.s}^{-1}$ , ce qui semble confirmé par un sondage BSS.

### *- Profondeur*

La profondeur du substratum est considérée à 22 m.

### 5.2.9.3. Récapitulatif

Le Tableau 18 synthétise les données géotechniques et géophysiques exploitées.

Formation	Épaisseur	Vs (m/s)	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Limon-tourbes_vases	4 m	155	Sols de faible résistance mécanique (groupe c)
Alluvions	6 m	343	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Alluvions	12 m	564	Sols de bonne résistance mécanique (groupe a)
Substratum	-	-	Sol de type rocher sain

Tableau 18 - Caractéristiques des formations géologiques.

### 5.2.9.4. Hydrogéologie

Des arrivées d'eau importantes sont observées depuis la base des limons.

## 5.2.10. Zone Moraines Saux

### 5.2.10.1. Données géotechniques

Les données disponibles pour cette zone sont les suivantes :

- 4 profils de SASW ;
- 2 sondages à la pelle ;
- un sondage à la tarière a été réalisé lors de l'étude géotechnique menée par 2GH pour cette étude de microzonage sismique ;
- des échantillons ont été prélevés de ce sondage à 4 profondeurs différentes : 0.0 - 0.4 m ; 0.4 m – 1.1 m ; 1.1 m – 1.6 m et 1.6 m – 4.0 m, sur lesquels une analyse granulométrique, une mesure de teneur en eau et de valeur de bleu ont été réalisés ;
- un essai de pénétration dynamique ;
- plusieurs sondages BSS.

### 5.2.10.2. Caractéristiques des formations

#### a. Limons sableux

##### - Lithologie

La carte géologique indique que nous sommes principalement dans la formation de moraines du Riss Gx. Deux sondages à la pelle ainsi que le sondage à la tarière et des sondages BSS mettent en évidence des alluvions limono-sableux avec la présence de gravelles ou de galets centimétriques à décimétriques, jusqu'à une profondeur de 4m, et de 5m dans certains sondages BSS.

##### - Essais laboratoires

Des essais laboratoires ont été réalisés sur des échantillons prélevés à quatre profondeurs : 0.0 - 0.4 m ; 0.4 m – 1.1 m ; 1.1 m – 1.6 m et 1.6 m – 4.0 m.

Le Tableau 19 fournit les résultats des essais réalisés.

Formation	Teneur en eau (en %)	VBS	Ip	D <sub>max</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>60</sub>	C <sub>u</sub>	D <sub>50</sub>	Cat.NFP11-300
Limons bruns	19.0	0.27	< 5	31.5	0.0025	0.63	252	0.03	A <sub>1</sub>
Limons sableux	12.6	0.08	< 5	16	0.007	1.8	257	1.3	B <sub>5</sub>
Sables limoneux	10.1	0.04	< 5	50	0.02	4	200	2.3	B <sub>5</sub>
Sables humides	12.2	0.04	< 5	< 31.5	0.025	0.92	36.8	0.7	B <sub>5</sub>

Tableau 19 - Résultats des essais en laboratoire.

La première formation correspond à des limons peu plastiques, tandis que les trois autres mettent en évidence des sols sableux et graveleux très silteux.

##### - Vs

Il est à noter que le profil LOU04 fournit des valeurs de vitesse Vs importantes, atteignant plus de 400 m.s<sup>-1</sup> dès 4.5 m de profondeur. Ainsi la moyenne des vitesses sur une épaisseur de 5 m est de 301 m.s<sup>-1</sup>.

##### - Épaisseur

Leur épaisseur est d'environ 5 m d'après les sondages tarière et BSS.

### **b. Sables-graviers**

#### *- Lithologie*

Dans la formation de moraines du Riss Gx, d'autres sondages BSS montrent la présence de sables graveleux sur 7 m d'épaisseur. La coupe A-B réalisée (Figure 23) indique que la couche superficielle est constituée de moraines fines.

#### *- Vs*

3 profils de SASW ont été réalisés dans cette zone (LOU18, LOU19 et LOU21). Ils mettent en évidence une interface située vers 10 m de profondeur. La moyenne des vitesses  $V_s$  sur cette épaisseur est de  $304 \text{ m.s}^{-1}$ .

#### *- Épaisseur*

Leur épaisseur est d'environ 10 m d'après les profils de SASW.

### **c. Argiles vaseuses**

#### *- Lithologie*

Le sondage à la tarière montre la présence d'argiles sableuses et vaseuses, avec quelques rares gravelles. Cette formation est présente au sud de cette zone d'étude.

#### *- Vs*

Les données issues du profil SASW LOU04 fournissent une valeur de vitesses  $V_s$  de  $651 \text{ m.s}^{-1}$ .

Cette valeur de vitesse paraît importante en regard de cette lithologie. Il est à noter que cette zone présente une grande variabilité spatiale des mesures H/V. Ainsi la lithologie peut varier entre le sondage à la tarière et le point de mesure de SASW. En l'absence d'autres informations, nous avons considéré la valeur de vitesse mesurée de  $651 \text{ m.s}^{-1}$ .

#### *- Épaisseur*

Le sondage à la tarière indique cette formation jusqu'à au moins 10 m de profondeur, soit 5 m d'épaisseur. En outre, un sondage BSS met en évidence la profondeur du substratum vers 10 m de profondeur. Le profil de SASW montre un substratum légèrement plus profond à 13 m. Une épaisseur d'argiles vaseuses de 8 m est ainsi considérée.

### **d. Graviers**

#### *- Lithologie*

Des sondages BSS ont mis en évidence des graviers avec gros blocs.



- Vs

Les profils SASW LOU19 et LOU21 sont utilisés pour caractériser cette formation. Pour information, le profil LOU18 a une profondeur de pénétration qui n'excède pas 17 m. Une valeur de vitesse Vs de 634 m.s<sup>-1</sup> est ainsi obtenue pour cette formation.

- Épaisseur

Les profils de SASW LOU19 et LOU21 indiquent la profondeur du substratum allant jusqu'à 36 m. Des sondages BSS l'ont mis en évidence à 30 m de profondeur. Ainsi l'épaisseur de cette formation peut aller jusqu'à 26 m, ce qui est en accord avec la coupe montrée sur la Figure 25.

**e. Substratum**

- Lithologie

Le crétacé est considéré comme le substratum.

- Vs

Le profil SASW LOU04 fournit une valeur de vitesse Vs de 842 m.s<sup>-1</sup> dans la couche située sous les argiles vaseuses, tandis que Les profils SASW LOU18, LOU19 et LOU21 fournissent une valeur de vitesse Vs de 864 m.s<sup>-1</sup>.

- Épaisseur

Le substratum est considéré à 13 m de profondeur sous la formation d'argiles vaseuses, tandis que sa profondeur est estimée à 36 m sous la formation de graviers.

**5.2.10.3. Récapitulatif**

Ainsi deux colonnes sont considérées dans cette zone.

Les Tableau 20 et Tableau 21 synthétisent les données géotechniques et géophysiques exploitées.

Formation	Épaisseur	Vs (m/s)	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Limons sableux	5 m	301	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Argiles vaseuses	8 m	651	Sols de bonne résistance mécanique (groupe a)
Substratum	-	842	Sol de type rocher sain

Tableau 20 - Caractéristiques des formations géologiques - Colonne 1.

Formation	Épaisseur	Vs (m/s)	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Sables graviers	10 m	304	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Graviers	26 m	634	Sols de bonne résistance mécanique (groupe a)
Substratum	-	864	Sol de type rocher sain

Tableau 21 - Caractéristiques des formations géologiques - Colonne 2.

#### 5.2.10.4. Hydrogéologie

Le sondage à la tarière indique un état saturé dans la formation argileuse, soit à partir de 5 m de profondeur au niveau de la colonne 1, tandis que les sondages BSS n'ont montré aucune présence d'eau au niveau de la colonne 2.

#### 5.2.11. Zone Marais Monge

##### 5.2.11.1. Données géotechniques

Les données disponibles pour cette zone sont les suivantes :

- 1 profil de SASW ;
- plusieurs campagnes de reconnaissances géotechniques en vue de l'élargissement à deux fois deux voies de la RN. 21 (entrée nord de Lourdes). Pour cela différents essais et sondages ont été réalisés :
  - coupes,
  - essais pénétrométriques statiques.

##### 5.2.11.2. Caractéristiques des formations

###### a. Tourbes

###### - Lithologie

La carte géologique indique que nous sommes dans la formation de moraines du Riss Gx. Plus précisément, cette zone se situe dans le marais du Monge.

Les études géotechniques ont montré la présence de tourbes sur une épaisseur de 8.40 m.

###### - Vs

1 profil de SASW a été réalisé dans cette zone. La vitesse moyenne obtenue sur cette épaisseur est de 218 m.s<sup>-1</sup>.

*- Épaisseur*

Leur épaisseur est d'environ 8.4 m d'après les études géotechniques réalisées.

**b. Vases**

*- Lithologie*

L'étude géotechnique a montré une couche de vase de 8.60 m d'épaisseur.

*- Vs*

Les données issues du profil SASW fournissent une valeur de vitesse Vs de 171 m.s<sup>-1</sup>, soit une vitesse inférieure à celle de la couche sus-jacente.

*- Épaisseur*

Leur épaisseur est d'environ 8.6 m d'après les études géotechniques réalisées.

**c. Substratum**

*- Lithologie*

Le substratum est de nature schisteuse et est situé à 17 m de profondeur selon les études géotechniques réalisées.

*- Vs*

Il y a incohérence entre les mesures de SASW et les études géotechniques réalisées pour l'élargissement de la RN21, étant donné que les valeurs de vitesse Vs atteignent seulement 222 m.s<sup>-1</sup> à 25 m de profondeur.

*- Épaisseur*

Le substratum est considéré à 17 m de profondeur selon l'étude géotechnique.

**5.2.11.3. Récapitulatif**

Le Tableau 22 synthétise les données géotechniques et géophysiques exploitées.

Formation	Épaisseur	Vs (m/s)	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Tourbes	8.4 m	218	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Vases	8.6 m	171	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Substratum	-		

Tableau 22 - Caractéristiques des formations géologiques.

#### **5.2.11.4. Hydrogéologie**

Les sondages ont montré la présence d'eau (zone de marais).

#### **5.2.12. Zone Terrasses de Sarsan**

##### **5.2.12.1. Données géotechniques**

Les données disponibles pour cette zone sont les suivantes :

- 1 profil de SASW ;
- 1 sondage à la pelle ;
- 1 sondage BSS.

##### **5.2.12.2. Caractéristiques des formations**

###### **a. Alluvions à gros blocs**

###### *- Lithologie*

Le sondage à la pelle montre une formation d'alluvions limono-graveleux avec la présence de galets centimétriques à décimétriques jusqu'à 2.6 m, puis avec une augmentation de leur taille. Un sondage BSS a montré la présence de gros blocs sur une épaisseur de 7 m.

###### *- Vs*

1 profil de SASW a été réalisé dans cette zone. La vitesse moyenne obtenue sur une épaisseur de 10 m est de  $499 \text{ m.s}^{-1}$ .

###### *- Épaisseur*

Leur épaisseur est d'environ 10 m d'après le profil de SASW.

###### **b. Substratum**

###### *- Lithologie*

Le substratum est de nature schisteuse et est situé à 7 m de profondeur selon un sondage de BSS, 10 m selon le profil SASW.

###### *- Vs*

Une valeur de  $850 \text{ m.s}^{-1}$  est considérée pour le substratum, selon le profil de SASW.

- *Profondeur*

Le substratum est considéré à 10 m de profondeur selon le profil de SASW.

**5.2.12.3. Récapitulatif**

Le Tableau 23 synthétise les données géotechniques et géophysiques exploitées.

Formation	Épaisseur	Vs (m/s)	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Gros blocs	10 m	499	Sols de bonne résistance mécanique (groupe a)
Substratum	-	853	

*Tableau 23 - Caractéristiques des formations géologiques.*

**5.2.12.4. Hydrogéologie**

Le sondage à la pelle n'a pas montré d'arrivées d'eau. Nous considérons ainsi un sol non saturé.

**5.2.13. Alluvions Gare**

**5.2.13.1. Données géotechniques**

Beaucoup de données sont disponibles pour cette zone :

- 1 profil de SASW ;
- plusieurs sondages BSS ;
- des données issues d'une étude géotechnique réalisée par SOLETCO pour la ville de Lourdes à l'emplacement d'une future salle polyvalente :
  - deux essais de pénétration,
  - six sondages de reconnaissance.

**5.2.13.2. Caractéristiques des formations**

**a. Alluvions**

- *Lithologie*

L'ensemble des données disponibles mettent en évidence des alluvions plus ou moins argileux avec la présence de sables, de graviers, de gravelles et/ou de galets centimétriques à décimétriques.

La carte géologique indique que nous sommes principalement dans la formation alluviale Gya qui correspond à des moraines du Würm 1.

- Vs

Les données issues du profil SASW LOU05 montrent de faibles vitesses Vs. La moyenne des valeurs de vitesse Vs sur une épaisseur de 8 m est de  $220 \text{ m.s}^{-1}$ .

- Épaisseur

Selon les sondages BSS et le profil SASW, leur épaisseur est de 8 m.

**b. Limons**

- Lithologie

Les sondages réalisés de la salle polyvalente mettent en évidence une formation limoneuse, plus ou moins sableuse. A la base de cette formation, (à partir de 25 m de profondeur) des éléments graveleux apparaissent. Cette formation située au-dessus du socle est épaisse, étant donné la profondeur du socle (voir paragraphe suivant).

- Vs

Les données issues du profil SASW LOU05 montrent que la vitesse reste encore faible jusqu'à 22 m de profondeur (qui constitue la profondeur limite de pénétration des ondes de surface). La moyenne de ces valeurs de vitesse jusqu'à cette profondeur est de  $341 \text{ m.s}^{-1}$ .

- Pénétromètre

Les essais de pénétration réalisés dans l'étude géotechnique pour la salle polyvalente mettent en évidence une faible résistance à l'enfoncement jusqu'à 11.5 m. Cette résistance augmente ensuite et devient importante à 14 m de profondeur.

- Épaisseur

La profondeur maximale atteinte du substratum dans cette zone varie et n'est pas bien déterminée. Les sondages, les mesures H/V et les essais pénétrométriques réalisés dans cette zone montrent un substratum à 20 m de profondeur. Une épaisseur de 12 m est ainsi considérée pour cette formation.

**c. Substratum**

- Lithologie

Le substratum est constitué de calcaires métamorphiques gris blanchâtre dur et massif.

*- Profondeur*

Comme cela a été précisé dans le paragraphe précédent, le substratum est considéré à 20 m de profondeur.

**5.2.13.3. Récapitulatif**

Le Tableau 24 synthétise les données géotechniques et géophysiques exploitées.

<b>Formation</b>	<b>Épaisseur</b>	<b>Vs (m/s)</b>	<b>Consistance du terrain (cf. classement PS 92)</b>
Alluvions	8 m	212	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Limons	12 m	341	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Substratum	-	-	Sol de type rocher sain

*Tableau 24 - Caractéristiques des formations géologiques.*

**5.2.13.4. Hydrogéologie**

Le niveau d'eau se situe à la limite des limons, soit 8 m de profondeur.

## 6. Détermination des spectres de réponse tenant compte des conditions de site

### 6.1. PRÉSENTATION DU PROBLÈME

Lorsque les conditions de site sont différentes des conditions au rocher, il faut utiliser des méthodes permettant de prendre en compte les conditions de site. On peut utiliser les méthodes suivantes :

#### 6.1.1. Méthodes empirico-statistiques

Les descriptions des formations géologiques formant le sous-sol sont généralement très succinctes. Les paramètres de site sont donc classés en deux, voire trois catégories de sols décrites qualitativement.

Mais il existe également certaines descriptions quantitatives basées sur la vitesse des ondes de cisaillement (prospection SASW). Leur intérêt est de distinguer le rocher sain, caractérisé par une vitesse d'ondes S supérieure à 750 ou 800 m/s, d'un rocher altéré, fissuré ou recouvert de quelques mètres d'alluvions. Cette nuance est importante, car le rattachement de sols peu épais dans la catégorie des sites rocheux, est susceptible d'augmenter significativement le contenu hautes fréquences du mouvement du sol pour cette catégorie.

Les relations d'atténuation distinguant plusieurs classifications de sols doivent être utilisées avec prudence, car la diversité des sols rencontrés ne peut pas être traduite en deux ou trois catégories seulement. C'est pourquoi nous privilégions la méthode numérique.

#### 6.1.2. Méthodes numériques

Elles dépendent du type de comportement pris en compte pour le sol :

- linéaire (élastique ou visco-élastique) ;
- non linéaire (linéaire équivalent, élasto-plastique).

Pour la présente étude, nous avons utilisé un modèle de sol non linéaire.

Le modèle non linéaire utilisé est celui implanté dans CyberQuake (Modaressi *et al*, 1997.)

Afin de calculer le spectre de réponse tenant compte des conditions de site, il convient de définir la colonne de sol représentative du terrain en place comme cela a été fait



pour chaque zone géotechnique dans le chapitre précédent. Cette colonne de sol doit intégrer plusieurs types de paramètres :

- la lithologie des horizons (sols cohérents, sols frottants ou rocher) ;
- la stratigraphie (séquence, épaisseur) ;
- les caractéristiques géomécaniques des horizons. Les formations lithologiques sont caractérisées par des valeurs moyennes telles que leur poids volumique ( $\gamma_h$ ). La vitesse des ondes de cisaillement ( $V_s$ ) et les courbes  $G(\gamma)/G_{max}$  &  $D(\gamma)$  sont des caractéristiques dynamiques des sols, nécessaires à la simulation du comportement d'une colonne de sol sous une sollicitation sismique. Les courbes  $G(\gamma)/G_{max}$  &  $D(\gamma)$  caractérisent la variation du module de cisaillement normalisé ( $G/G_{max}$ ) et du coefficient d'amortissement ( $D$ ) du matériau en fonction de la distorsion en cisaillement cyclique  $\gamma_c$ . Dans cette étude, les courbes  $G(\gamma)/G_{max}$  &  $D(\gamma)$  utilisées sont issues de la littérature (Kokusho, 1980, et Darendeli, 2001).

Les colonnes de sol déterminées précédemment ont été utilisées avec le logiciel CyberQuake (Modaressi *et al*, 1997.) pour calculer leur réponse à une sollicitation sismique au rocher. On applique comme mouvement au substratum différents accélérogrammes (réels ou synthétiques) ayant une réponse spectrale proche du spectre spécifique retenu dans le cadre de l'étude pour calculer les accélérogrammes résultant de l'amplification du signal par les colonnes de sol.

La méthode employée est la suivante :

1. Utilisation de 4 accélérogrammes (2 synthétiques et 2 réels) caractéristiques du spectre spécifique de réponse au rocher horizontal et dont les caractéristiques en magnitude, distance et PGA sont similaires au séisme de référence (Figure 34).
  - Les accélérogrammes synthétiques sont générés à l'aide du logiciel SIMQKE (Gasparini et Vanmarcke, 1976). Par itérations, ce code génère des histoires temporelles en accélération, artificielles et statistiquement indépendantes, dont les spectres de réponse et la durée du mouvement sismique sont en concordance avec les caractéristiques du mouvement de référence donné en entrée. La durée du mouvement sismique utilisé dans SIMQKE est définie à partir du couple magnitude-distance défini pour le séisme de référence en utilisant la relation d'atténuation de Abrahamson et Silva (1996).
  - Les accélérogrammes réels sont recherchés dans des bases de données mondiales de mouvements forts du sol. Les accélérogrammes sélectionnés ont des caractéristiques proches du séisme de référence retenu dans le cadre de la présente étude (Tableau 25). Ces accélérogrammes ont été modifiés pour être calés sur le pga de référence à 0.2 g.
2. Calcul de la réponse de la colonne de sol soumise à ces 4 accélérogrammes à sa base.

Date heure TU	Lieu	Magnitude de moment ( $M_w$ )	Distance focale (km)	Station	Classe EC8 de la station
16/09/1977	Frioul (réplique), Italie	5.43	12	Somplago Centrale – Uscita Galleria	A
29/04/1984	Ombrie- Marche Italie	5.68	21	Pietralunga	A

Tableau 25 - Caractéristiques des accélérogrammes réels utilisés pour la modélisation numérique.

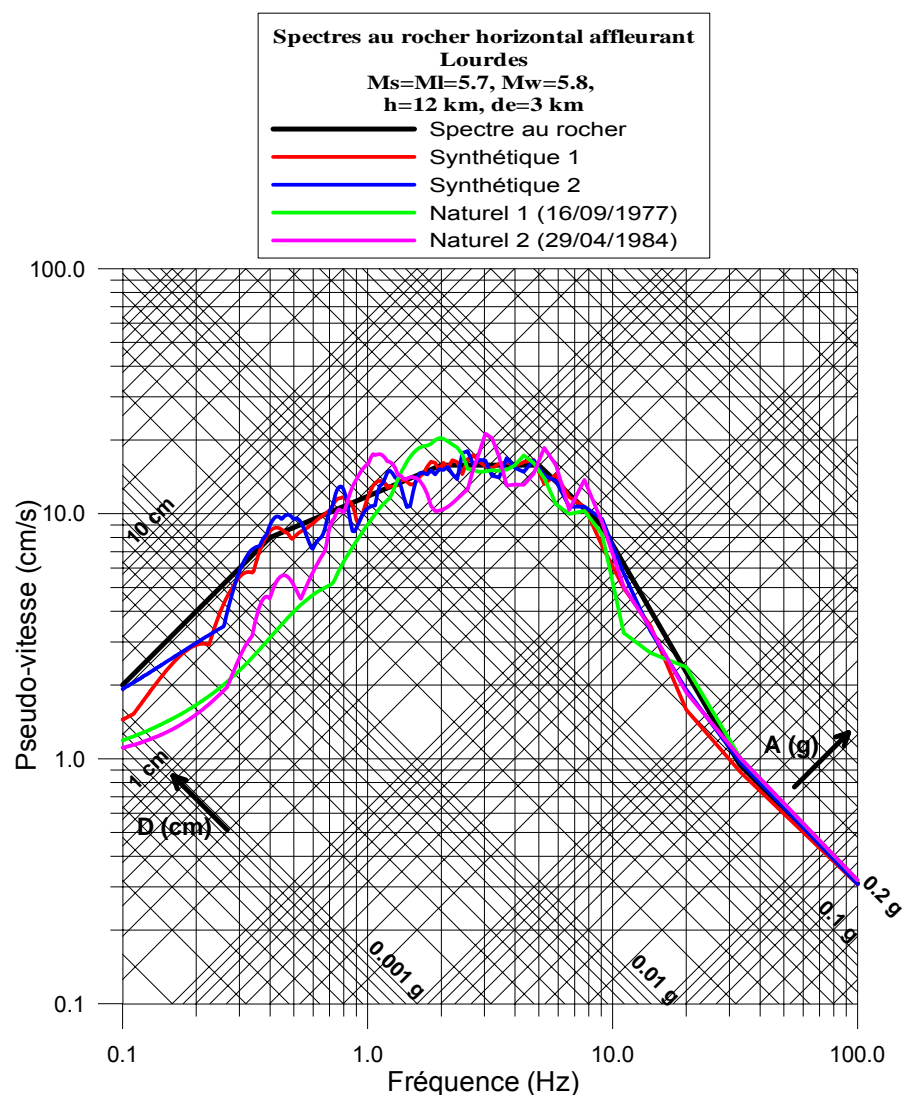


Figure 34 - Comparaison entre les spectres de réponse des accélérogrammes choisis pour le calcul des spectres spécifiques et le spectre au rocher défini précédemment.

## **6.2. SPECTRES SPÉCIFIQUES TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE (PLANCHE 1)**

Pour chacune des zones géotechniques spécifiées dans le paragraphe 0 et dont les colonnes de sol type ont été définies dans le paragraphe 0, un spectre de réponse a été calculé à 5 % d'amortissement pour les 4 accélérogrammes définis ci-dessus.

Les calculs ont permis de montrer que, pour les zones comportant deux colonnes représentatives (Moraines Abbadie (zone 5), Alluvions Centre (zone 6) et Moraines de Saux (zone 10)), seul un spectre de réponse pouvait être conservé. En effet, le spectre retenu d'une des deux colonnes recouvre complètement l'autre spectre de réponse ou s'en rapproche fortement.

Ainsi, pour les Moraines de Saux (zone 10), le spectre de la colonne 2 recouvre celui de la colonne 1 (Figure 35).

Pour la zone des moraines Abbadie (zone 5), le spectre de la colonne 1 est quasiment le même que celui de la colonne 2 (Figure 36).

Pour la zone des alluvions du Centre (zone 6), le spectre de réponse de la colonne 2 recouvre celui de la colonne 1 (Figure 37)) au-delà de 2 Hz.

Dans chacun de ces trois cas, nous avons finalement considéré un seul spectre de réponse spécifique, correspondant au cas le plus pénalisant, à savoir :

- Moraines Abbadie (zone 5) : colonne 1 ;
- Alluvions Centre (zone 6) : colonne 2 ;
- Moraines de Saux (zone 10) : colonne 2.

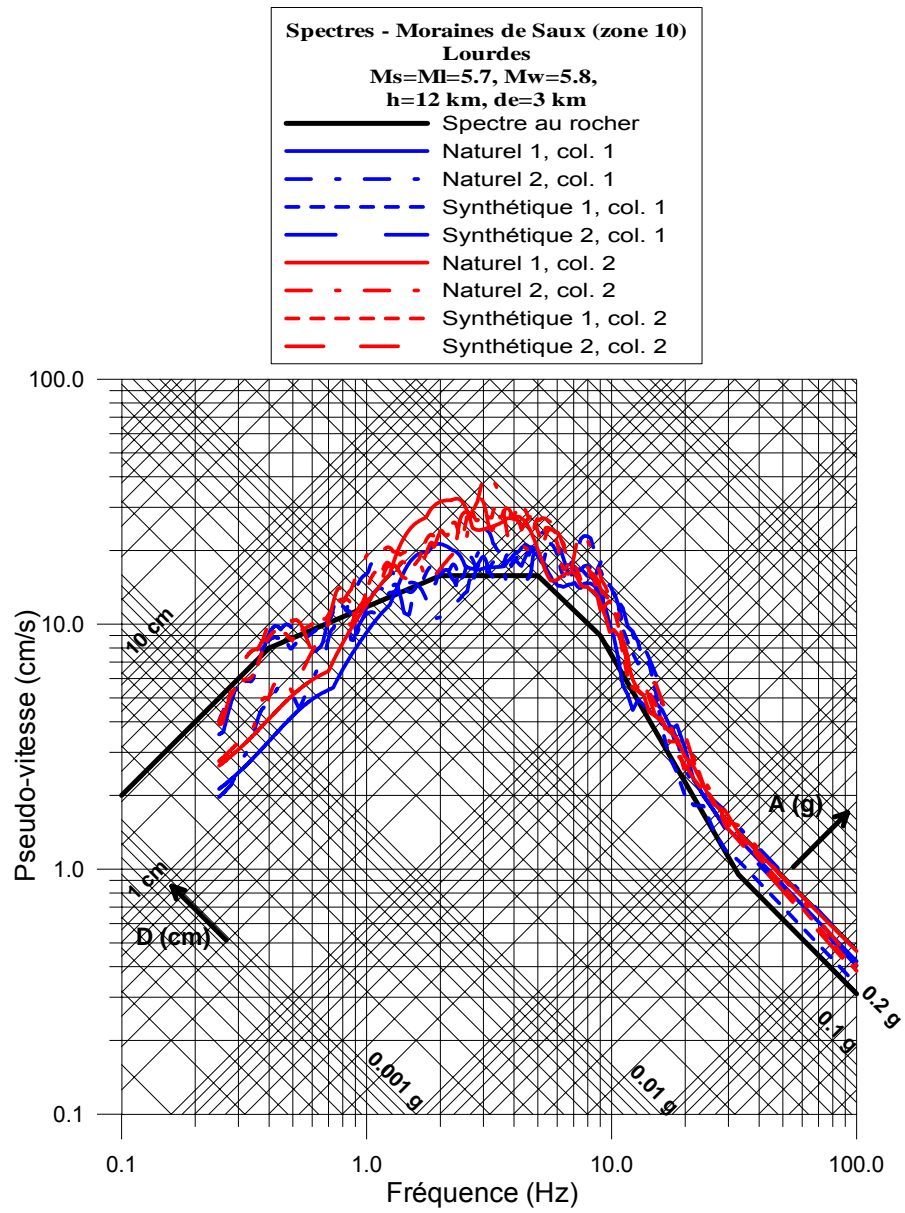


Figure 35 - Comparaison des spectres de réponse des colonne 1 (bleu) et 2 (rouge) pour la zone 10 (Moraines de Saux).

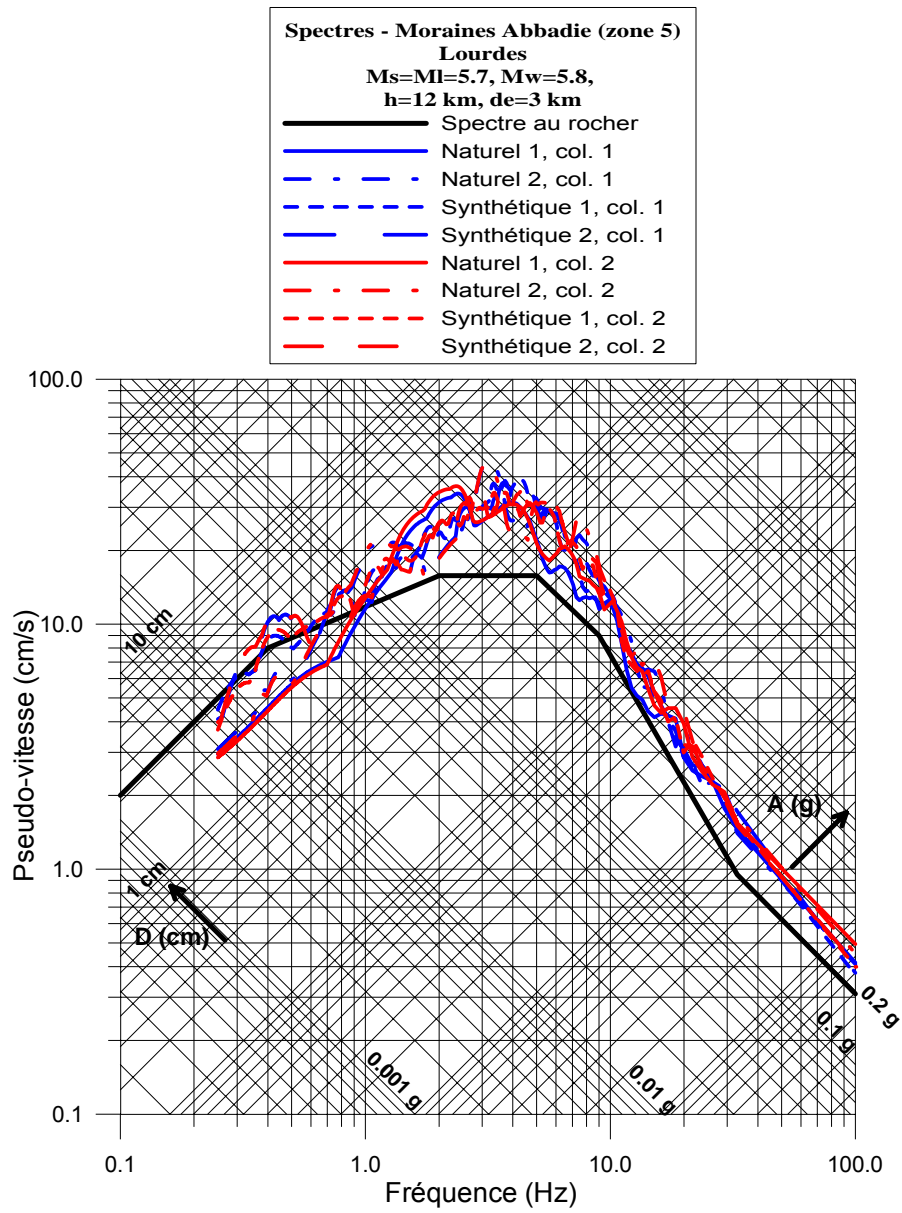


Figure 36 - Comparaison des spectres de réponse des colonne 1 (bleu) et 2 (rouge) pour la zone 5 (Moraines Abbadie).

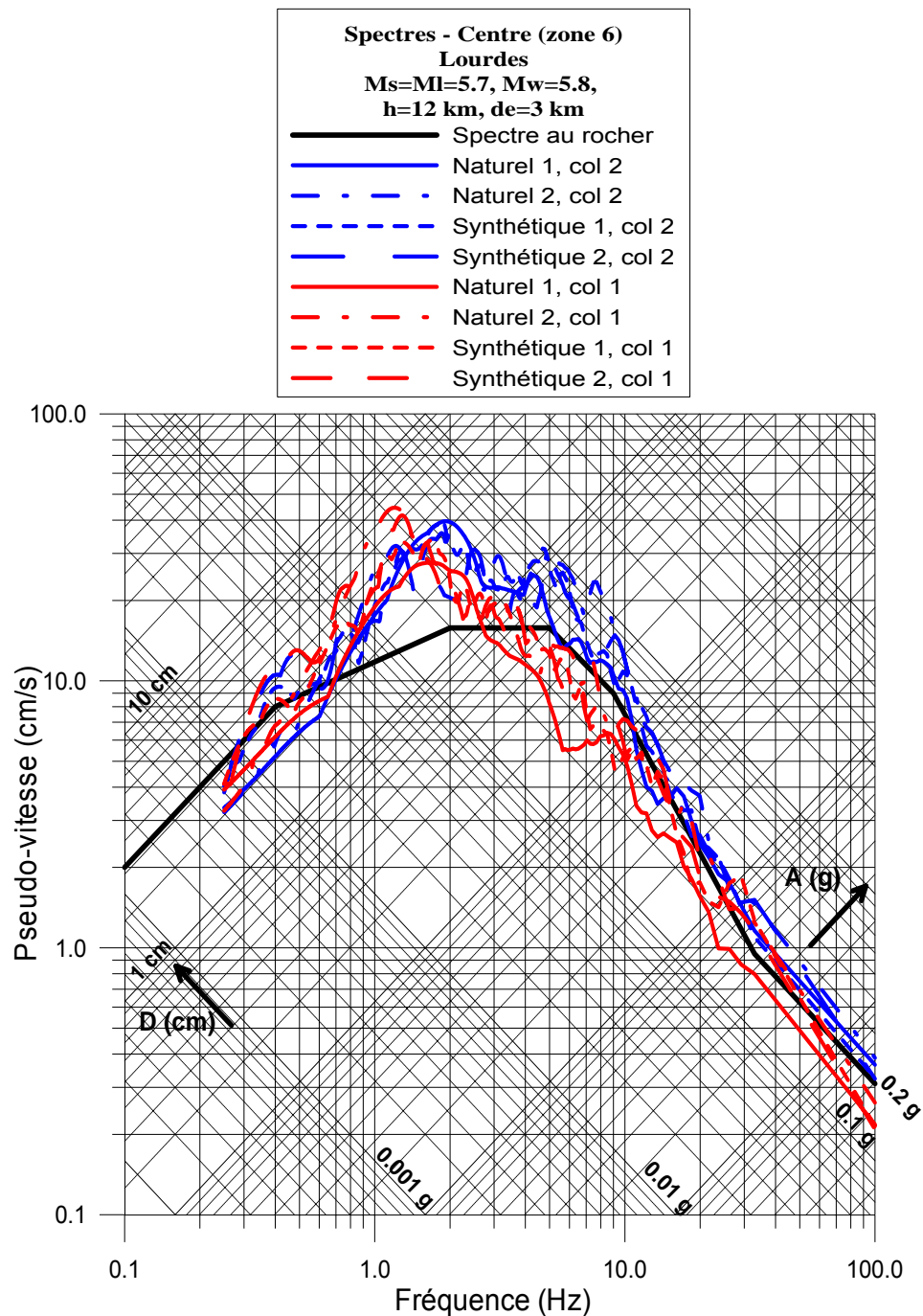


Figure 37 - Comparaison des spectres de réponse des colonne 1 (bleu) et 2 (rouge) pour la zone 6 (Alluvions Centre).

Les spectres de réponse spécifiques à chaque zone ont ensuite été reportés sur un seul graphique pour évaluer leur ressemblance et effectuer des regroupements de zones si leurs réponses sismiques sont équivalentes. Cela nous a permis de définir 5 classes finales (ou zones) pour l'ensemble de la zone d'étude :

- classe 0 : rocher (zone 0) ;
- classe 1 : Gave Basilique (zone 3), Gave Ouest (zone 4), Alluvions Centre (zone 6), Alluvions Anclades (zone 7), Moraines de Saux (zone 10) ;
- classe 2 : Gave Sud (zone 1), Lac de Lourdes (zone 2), Moraines Abbadie (zone 5), Flyschs Biscaye (zone 9), Alluvions Gare (zone 13) ;
- classe 3 : La Citoyenne (zone 8), Terrasses de Sarsan (zone 11) ;
- classe 4 : Marais de Monge (zone 12).

Les Figure 38 à Figure 42 donnent les spectres de réponse calculés associés à chaque classe ainsi que le spectre spécifique correspondant proposé. Ils sont représentés sous forme de spectres en accélération en fonction de la période par souci d'homogénéité avec les spectres forfaitaires présentés dans la réglementation pour les ouvrages à « Risque Normal ». Les sigles N1, N2, S1, S2 représentés dans ces figures signifient que les spectres de réponse calculés correspondent respectivement pour une colonne donnée à l'introduction à sa base de l'accélérogramme naturel N1, puis de l'accélérogramme naturel N2, de l'accélérogramme synthétique S1 et de l'accélérogramme synthétique S2.

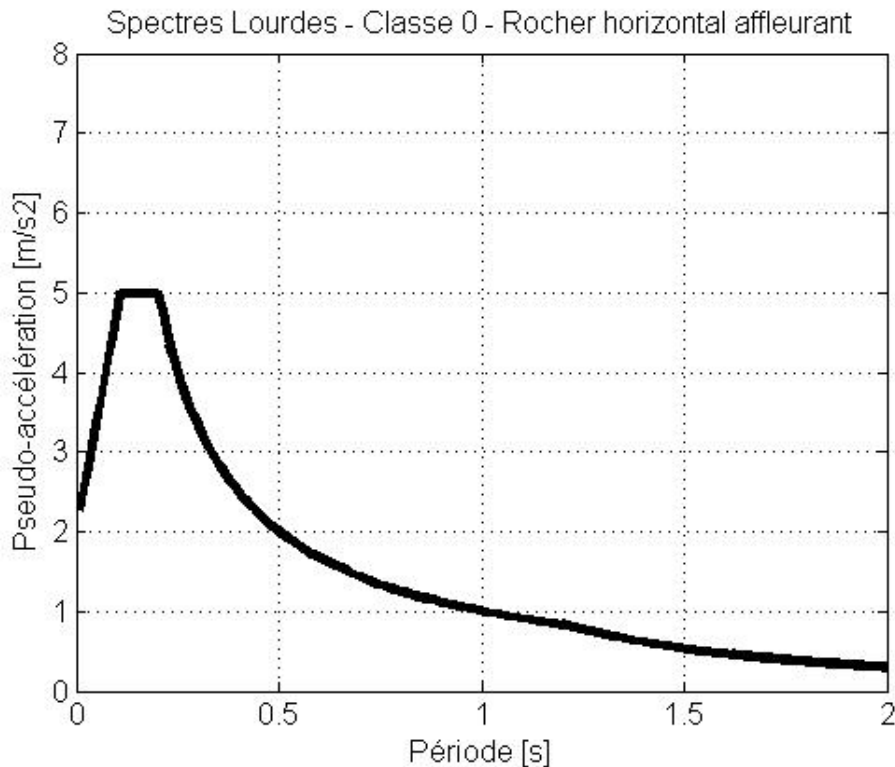


Figure 38 - Spectre de réponse au rocher horizontal affleurant proposé pour la classe 0.

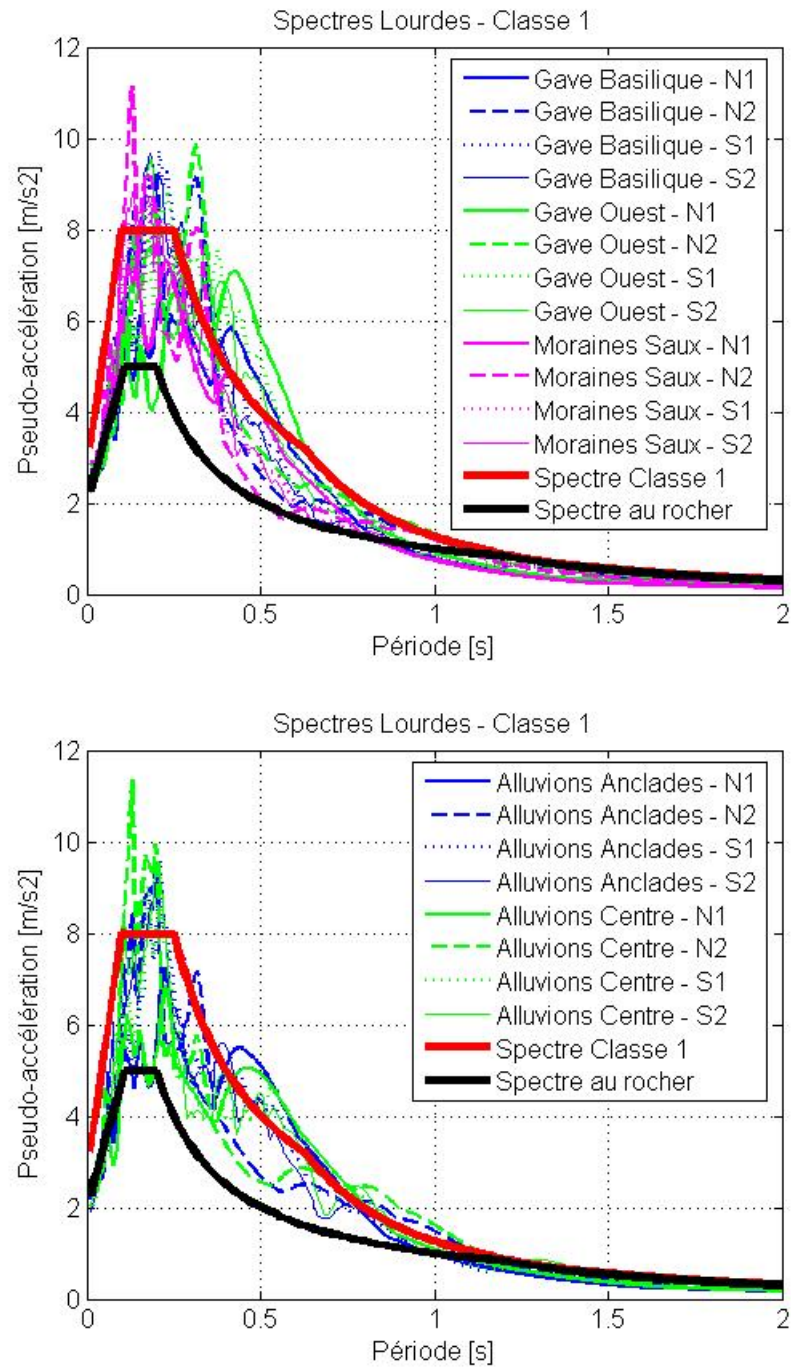


Figure 39 - Spectres de réponse calculés, spectre de réponse au rocher horizontal affleurant (en noir) et spectre de réponse avec effet de site (en rouge) proposé pour la classe 1.



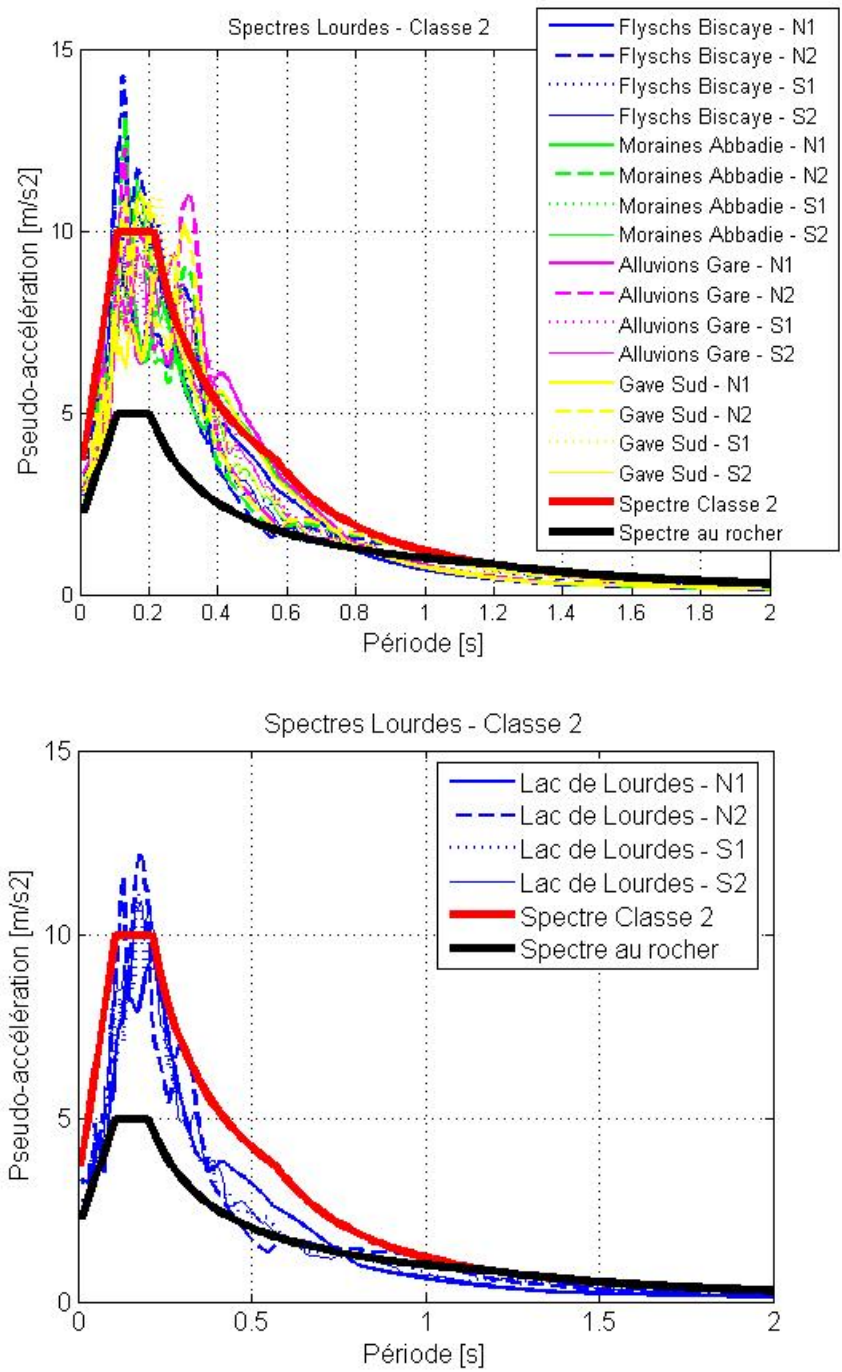


Figure 40 - Spectres de réponse calculés, spectre de réponse au rocher horizontal affleurant (en noir) et spectre de réponse avec effet de site (en rouge) proposé pour la classe 2.

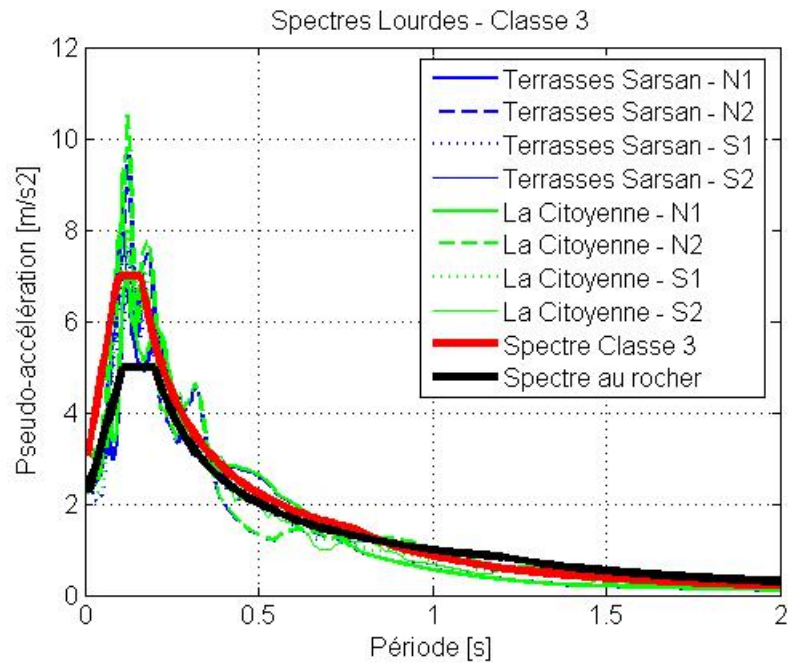


Figure 41 - Spectres de réponse calculés, spectre de réponse au rocher horizontal affleurant (en noir) et spectre de réponse avec effet de site (en rouge) proposé pour la classe 3.

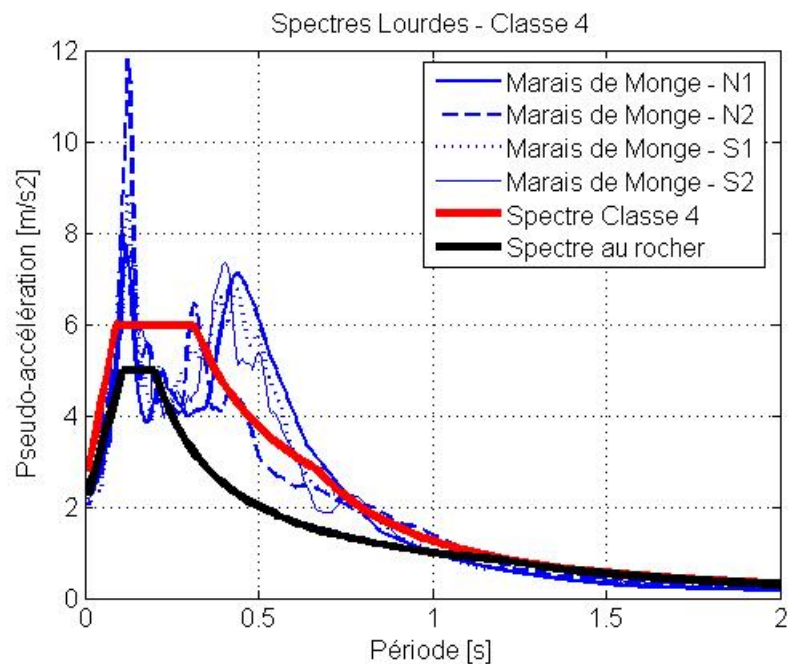


Figure 42 - Spectres de réponse calculés, spectre de réponse au rocher horizontal affleurant (en noir) et spectre de réponse avec effet de site (en rouge) proposé pour la classe 4.

La Figure 43 donne les spectres spécifiques proposés pour chacune des 5 zones (ou classes) définies précédemment pour les bâtiments de classe B.

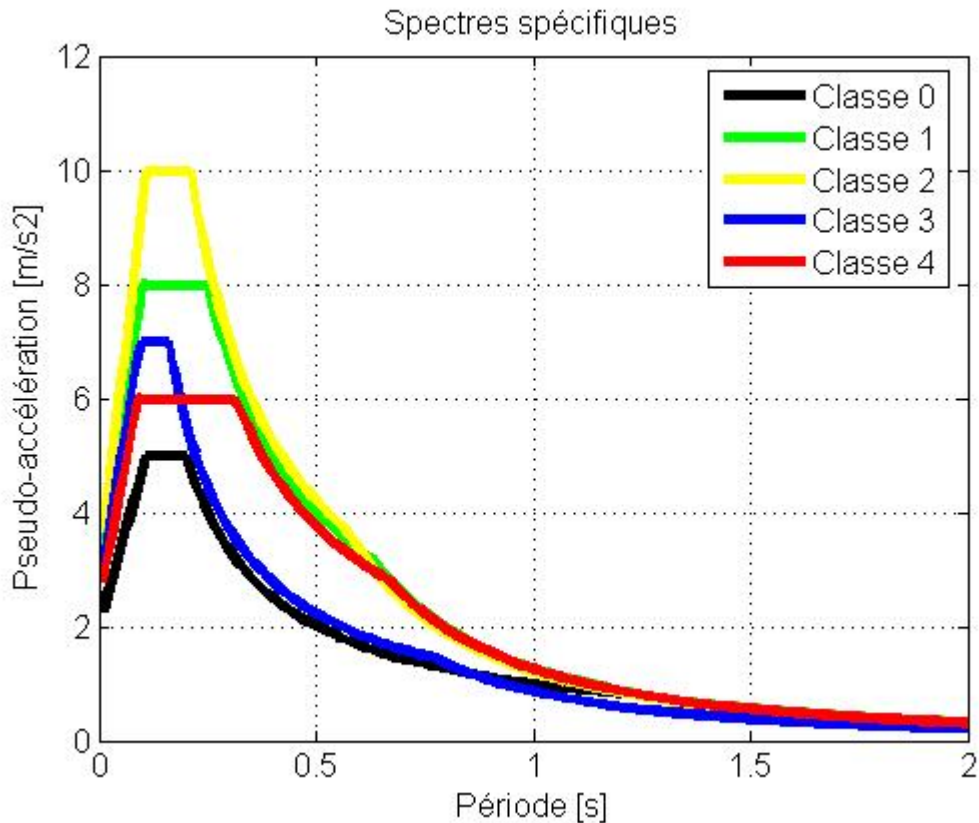


Figure 43 - Spectres spécifiques retenus pour le microzonage sismique de la commune de Lourdes.

Le Tableau 26 donne, pour les bâtiments de classe B, les paramètres mathématiques permettant de reconstruire les spectres et de trouver analytiquement la valeur de l'accélération spectrale pour toute valeur de la période. Nous avons utilisé les formes de spectres préconisées dans les PS92.

Un spectre de réponse (Figure 44) est entièrement déterminé par l'accélération à la période de 0s (également appelée pga), les valeurs de périodes du début du plateau du spectre  $T_B$ , la valeur de fin du plateau  $T_C$  et, éventuellement, la valeur du point d'inflexion du spectre  $T_D$ .

Entre la période nulle et  $T_B$  le spectre croît linéairement avec la période.

Entre  $T_B$  et  $T_C$  le spectre est constant.

Entre  $T_C$  et  $T_D$  le spectre décroît en  $a/T^r$  (dans notre cas,  $r = 1$  pour tous les spectres) entre  $T_D$  et la période infinie, le spectre décroît en  $b/T^2$ .

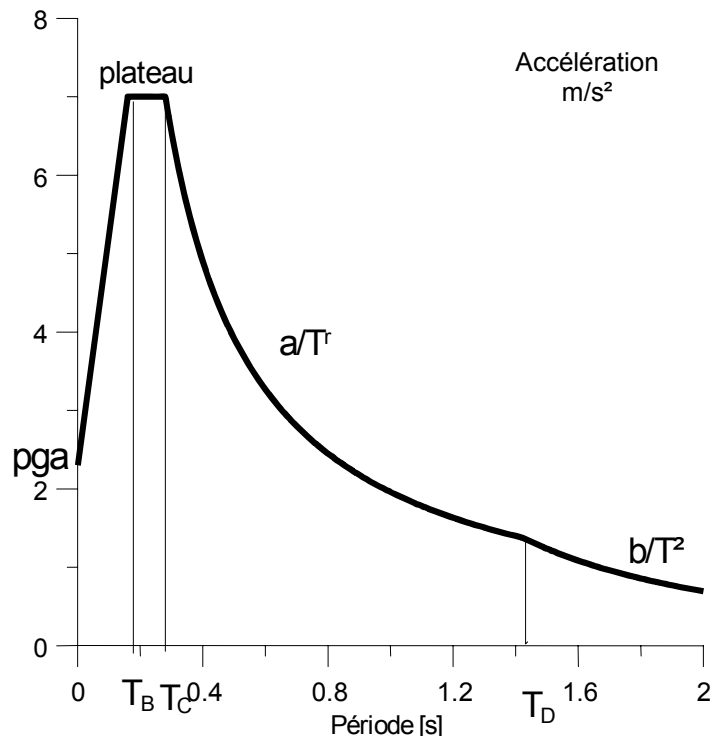


Figure 44 - Paramètres mathématiques permettant de définir un spectre de réponse élastique.

Ces valeurs sont valables pour les bâtiments de classe B. Pour les bâtiments de classe C et D, en appliquant les mêmes rapports d'accélération que ceux préconisés par les règles EC-8, nous proposons que les valeurs d'accélération spectrales soient multipliées par 1,2 pour les bâtiments de classe C et par 1,4 pour les bâtiments de classe D.

	$T_B$ (s)	$T_C$ (s)	$T_D$ (s)	pga ( $m/s^2$ )	Plateau ( $m/s^2$ )	a ( $a/T$ )	b ( $b/T^2$ )
Zone 0	0.11	0.2	1.2	2.0	5	1.0	1.2
Zone 1	0.1	0.25	0.63	2.7	8	2.0	1.26
Zone 2	0.11	0.21	0.57	3.1	10	2.1	1.2
Zone 3	0.095	0.16	0.77	2.6	7	1.11	0.86
Zone 4	0.091	0.31	0.67	2.4	6	1.875	1.25

Tableau 26 - Paramètres mathématiques définissant les spectres proposés pour les bâtiments de classe B.

### 6.3. CLASSIFICATION DES ZONES SELON LES PS92 (PLANCHE 5)

Les règles PS92 distinguent (Tableau 27) :

- le rocher sain ;
- la catégorie a : sols de résistance bonne à très bonne (par exemple sables et graviers compacts, marnes ou argiles raides fortement consolidées) ;
- la catégorie b : sols de résistance moyenne (par exemple roches altérées, sables et graviers moyennement compacts, marnes ou argiles de raideur moyenne) ;
- la catégorie c : sols de faible résistance (par exemple sables ou graviers lâches, argiles molles, craies altérées, vases).

TYPE DE SOL		Pénétromètre Statique	SPT  Nombre de coups	Pressiomètre		Résistance  Compression simple (MPa)	Densité relative (%)	Vitesse des ondes de Cisaillement (m/s)
		Résistance  (MPa)		Module  (MPa)	Pression Limite (MPa)			
ROCHERS	Rochers sains et craies dures			>100	>5	>10		>800
Sols de bonne à très bonne résistance mécanique (type a)	Sols granulaires compacts	>15	>30	>20	>2		>60	>400
	Sols cohérents (argiles ou marnes dures)	>5		>25	>2	>0,4		
Sols de résistance mécanique moyenne (type b)	Rocher altéré ou fracturé			50 à 100	2,5 à 5	1 à 10		300 à 800
	Sols granulaires moyennement compacts	5 à 15	10 à 30	6 à 20	1 à 2		40 à 60	150 à 400
	Sols cohérents moyennement consistants et craies tendres	1,5 à 5		5 à 25	0,5 à 2	0,1 à 0,4		
Sols de faible résistance mécanique (type c)	Sols granulaires lâches	<5	<10	<6	<1		<40	<150
	Sols cohérents mous (argiles molles ou vases) et craies altérées	<1,5	<2	<5	<0,5	<0,1		

Tableau 27 - Paramètres d'identification des sols avec les PS92.

Les sites sont classés selon les descriptions suivantes :

- sites S0
  - sites rocheux (site de référence),
  - sols de catégorie a en épaisseur inférieure à 15 m ;

- sites S1
  - sols de catégorie a en épaisseur supérieure à 15 m,
  - sols de catégorie b en épaisseur inférieure à 15 m ;
- sites S2
  - sols de catégorie b en épaisseur comprise entre 15 m et 50 m,
  - sols de catégorie c en épaisseur inférieure à 10 m ;
- sites S3
  - sols de catégorie b en épaisseur supérieure à 50 m,
  - sols de catégorie c en épaisseur comprise entre 10 m et 100 m.

En suivant ces règles, les zones définies précédemment ont donc été classifiées de la façon suivante :

Zone	Nom de la zone	Classification PS92
0	Rocher	S0
1	Gave Sud	S2
2	Lac de Lourdes	S1
3	Gave Basilique	S2
4	Gave Ouest	S2
5	Moraines Abbadie	S1
6	Alluvions Centre	S2
7	Alluvions Anclades	S2
8	La Citoyenne	S0
9	Flyschs Biscaye	S2
10	Moraines de Saux	S1
11	Terrasse de Sarsan	S0
12	Marais de Monge	S2
13	Alluvions Gare	S2

Tableau 28 - Classification des différentes zones géotechniques selon les PS92.

## 6.4. CLASSIFICATION DES ZONES SELON LES EC8 (PLANCHE 6)

La classification des sols par les EC8 est légèrement différente. D'une part, un plus grand nombre de sites a été défini et, d'autre part, le paramètre principal permettant de classer les sols est basé sur la vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres (paramètre  $V_{s,30}$ ). Le Tableau 29 résume la classification.

Classe de sol	Description du profil stratigraphique	Paramètres		
		$V_{s,30}$ (m/s)	$N_{SPT}$ (bl/30cm)	$c_u$ (kPa)
A	Rocher ou tout autre formation proche du rocher, incluant au plus 5 m de formation plus molle en surface.	> 800	–	–
B	Dépôts de sable très dense, de gravier ou d'argile très dure, au moins sur plusieurs dizaines de mètres, caractérisés par une augmentation graduelle des propriétés mécaniques avec la profondeur.	360 – 800	> 50	> 250
C	Dépôts profonds de sable dense ou moyennement dense, de gravier ou d'argiles dures avec des profondeurs de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres.	180 – 360	15 - 50	70 - 250
D	Dépôts de sols de cohésion faible à moyenne (avec ou sans couches de sols mous cohérents) ou dépôts prédominants de sol cohérent mou à ferme.	< 180	< 15	< 70
E	Profil de sol consistant en une couche de surface d'alluvions avec une valeur de $V_{s,30}$ des classes C ou D et des épaisseurs variant entre 5 et 20 m, reposant sur du matériau plus ferme de $V_{s,30} > 800$ m/s			
$S_1$	Dépôts contenant (ou consistés de) des couches d'au moins 10 m d'épaisseur, d'argiles / limons avec une forte plasticité ( $PI > 40$ ) et une forte teneur en eau.	< 100 (indicative)	–	10 - 20
$S_2$	Dépôts de sols liquéfiables, d'argiles molles ou tout profil de sol non compris dans les classes A –E ou $S_1$			

Tableau 29 - Classification des classes de sol selon les EC8.

$V_{s,30}$  est la vitesse moyenne des ondes de cisaillement, elle est calculée selon l'expression suivante :

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

où  $h_i$  et  $V_i$  représentent l'épaisseur et la vitesse des ondes S (à petite déformation) de la formation ou couche  $i$ , sur un total de  $N$ , existant dans les 30 premiers mètres. Le site est classé suivant la valeur de  $V_{s,30}$  si celle ci est disponible, sinon, la valeur de  $N_{SPT}$  sera utilisée.

$N_{SPT}$  est le nombre de coups au pénétromètre statique,  
 $C_u$  est la cohésion non drainée.

En suivant ces règles, les zones définies précédemment ont donc été classifiées de la façon suivante :

Zone	Nom de la zone	Classification EC8
0	Rocher	A
1	Gave Sud	B
2	Lac de Lourdes	B
3	Gave Basilique	B
4	Gave Ouest	C
5	Moraines Abbadie	B
6	Alluvions Centre	C devient $S_2$
7	Alluvions Anclades	C
8	La Citoyenne	B
9	Flyschs Biscaye	B
10	Moraines de Saux	B devient $S_2$
11	Terrasse de Sarsan	B
12	Marais de Monge	E
13	Alluvions Gare	E

*Tableau 30 - Classification des différentes zones géotechniques selon les EC8.*

La forme et les accélérations de calage des spectres EC8 ne sont pas présentées ici. Ces paramètres seront fixés par le MEDD.





## 7. Cartographie des effets de site lithologiques

À partir des différentes analyses, nous proposons la cartographie des zones classées suivant les calculs spécifiques (**Figure 45**).

**À titre d'information**, nous avons fourni les cartes des zones telles qu'elles seraient prises en compte selon la réglementation nationale en vigueur (PS92) et à venir (EC8) :

- une cartographie des zones classées suivant les normes PS92 en vigueur (Figure 46) ;
- une cartographie des zones classées suivant les futures normes EC8 à venir (Figure 47).

L'objectif de ce rapport n'est pas de comparer les différentes normes car les paramètres utilisés ne sont pas les mêmes. Cela permet seulement de montrer les différences entre les cartographies. **La cartographie qui suit les calculs spécifiques** réalisés dans le cadre de cette étude **est la plus pertinente**. En effet, que ce soit la définition des spectres ou la classification des sols, les normes PS92 et EC8 sont, en raison de leur caractère forfaitaire, nécessairement peu précises et ne rendent pas compte de la spécificité des sites étudiés. Les mouvements issus d'une étude spécifique locale peuvent depuis la loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003 se substituer à la réglementation nationale.

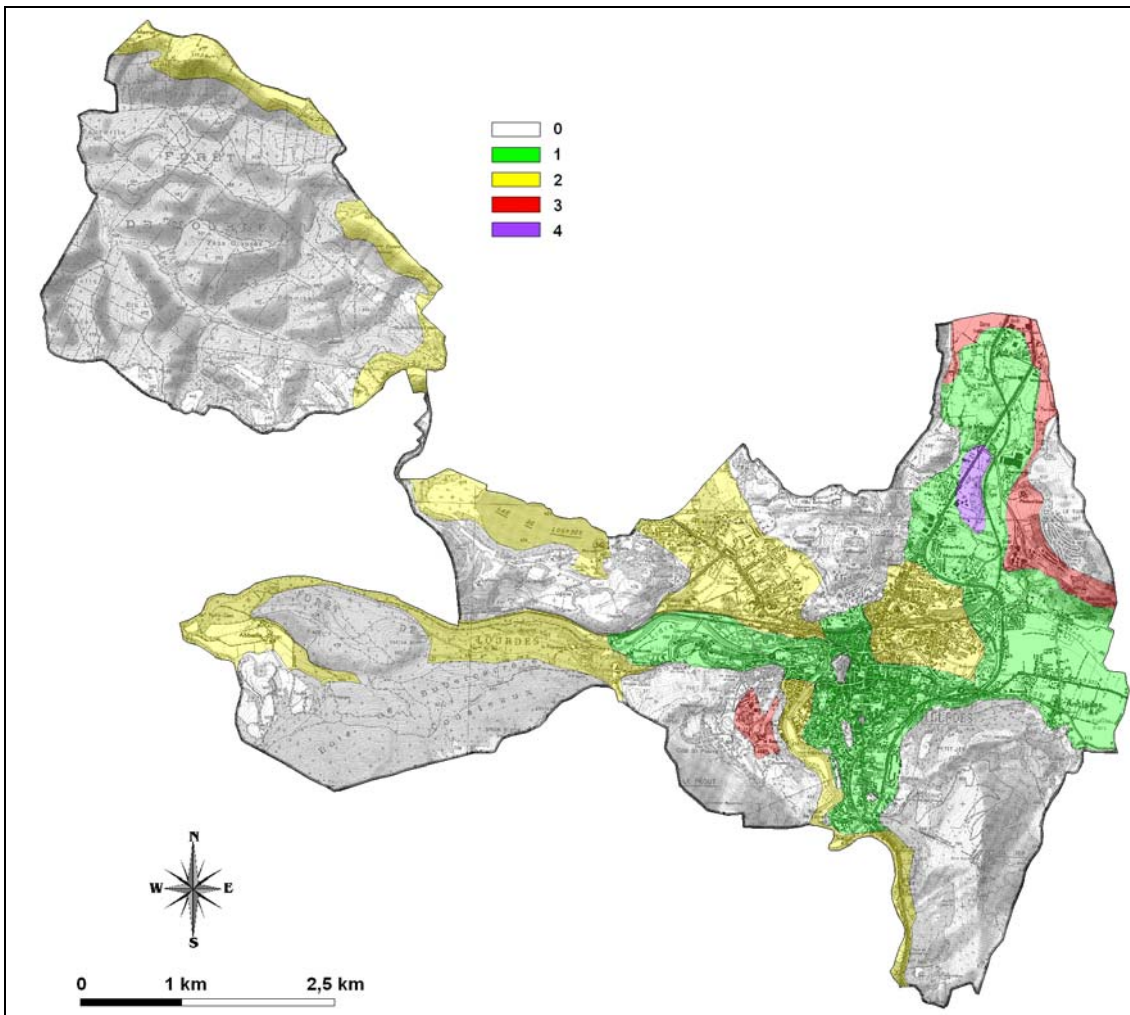


Figure 45 - Zonage sismique spécifique.

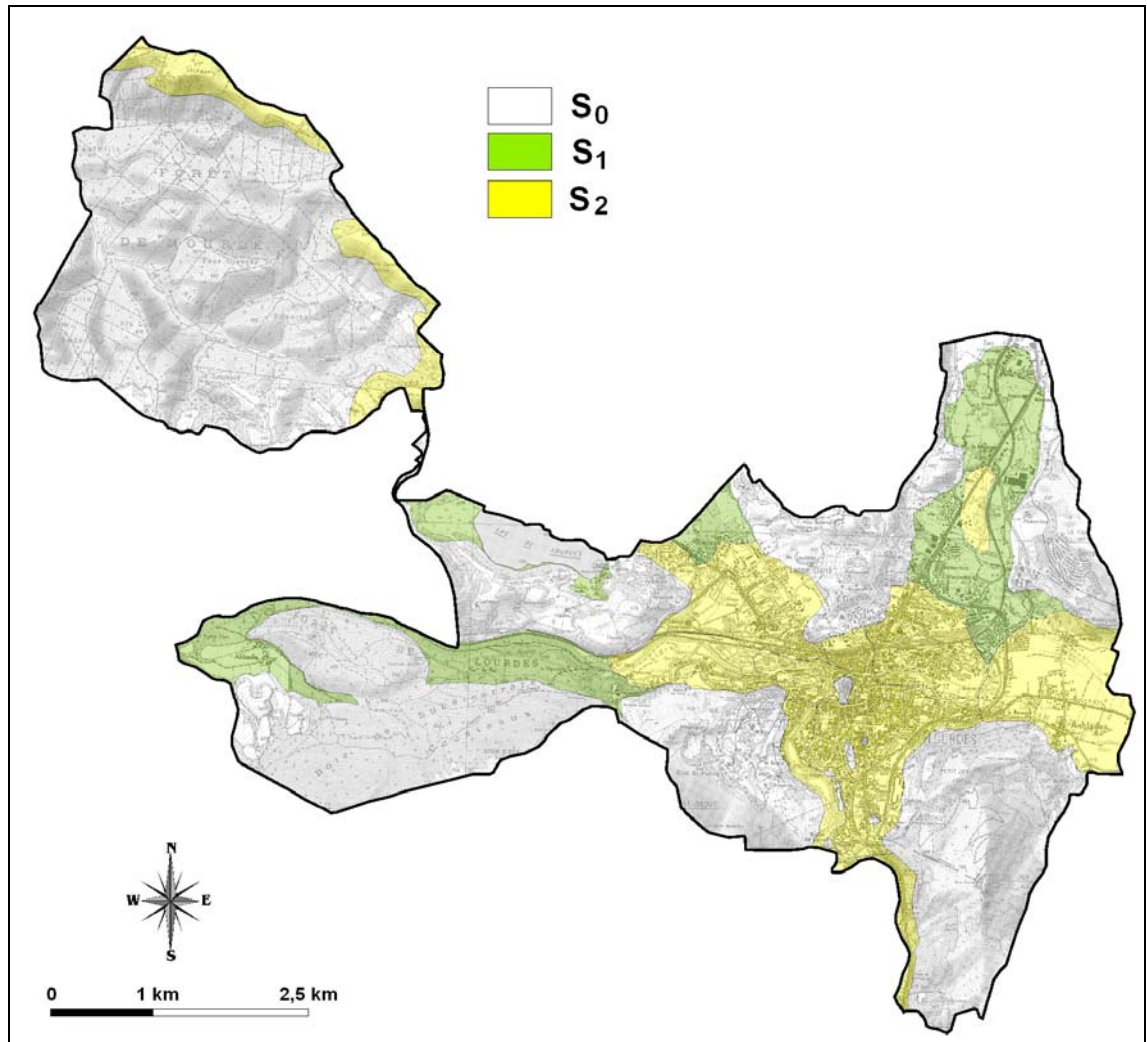


Figure 46 - Zonage sismique selon les PS92.

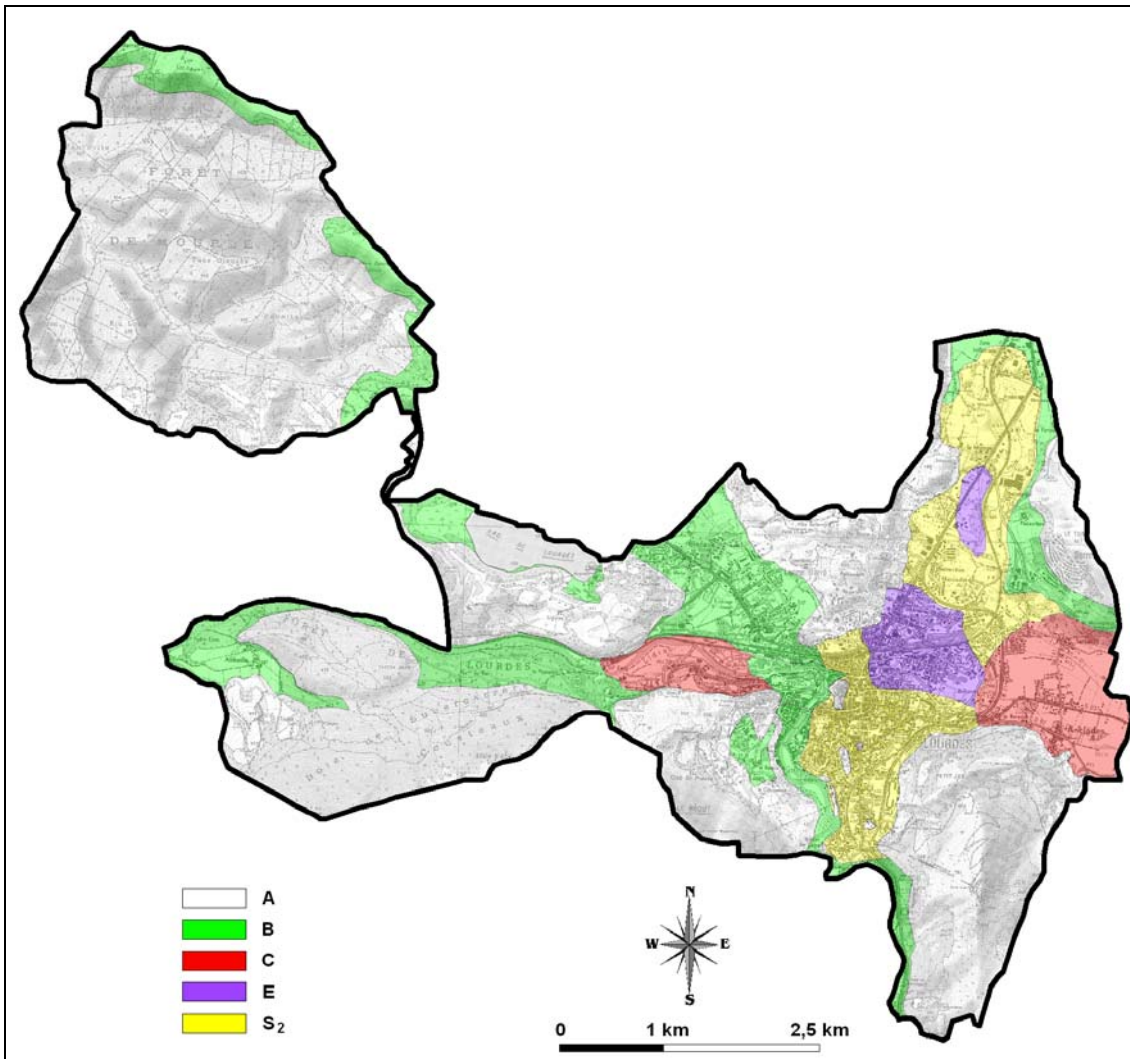


Figure 47 - Zonage sismique selon les EC8.

## 8. Cartographie des effets de site topographiques

### 8.1. DÉFINITION

On a constaté que, tous facteurs étant apparemment égaux par ailleurs, certaines configurations topographiques pouvaient entraîner des amplifications notoires d'un signal sismique, entraînant une augmentation locale de l'intensité du tremblement de terre. Il s'agit de zones de rupture de pente, de crête, de bordure de plateau, de sommet.

Il n'existe pas, à notre connaissance, de méthode validée ou de modèle opérationnel permettant une évaluation des amplifications du signal sismique liées à la topographie.

Toutefois, les règles parasismiques PS-92 (et également les EC8) tiennent compte de ces effets par l'application d'un coefficient multiplicateur d'amplification pour les ouvrages se trouvant dans les situations topographiques listées précédemment. Ce coefficient  $\tau$  (Tau) varie entre 1 (pas d'augmentation des accélérations des spectres de dimensionnement) et 1,4 (majoration de 40 % des accélérations). Il est obtenu à l'aide de formules empiriques basées sur l'analyse de profils topographiques bidimensionnels.

### 8.2. PRINCIPES DE LA RÉGLEMENTATION

Le principe du calcul du coefficient  $\tau$  est le suivant (d'après les règles parasismiques PS92).

Si l'on considère une arête B délimitant un versant aval de pente  $l$  (tangente de l'angle de pente) et un versant amont de pente  $i$  (Figure 48), et si :

- $H \geq 10$  m ( $H$  étant la hauteur de l'arête au-dessus de la base du relief) ;
- $i \leq l/3$  ;

alors le coefficient  $\tau$  prend la valeur :

- $\tau = 1$  pour  $l-i \leq 0,40$  ;
- $\tau = 1+0,8(l-i-0,4)$  pour  $0,40 \leq l-i \leq 0,90$  ;
- $\tau = 1,40$  pour  $l-i \geq 0,90$ .

$l$  et  $i$  sont pris en valeur algébrique.

Sur le tronçon BC du versant amont défini par la longueur  $b$  de sa projection horizontale (exprimée en mètres) :

$$b = \text{minimum de } 20x_l \text{ ou de } (H+4)/10$$

La valeur de  $\tau$  fait l'objet d'un raccordement linéaire entre les valeurs 1 et le long des tronçons AB et CD de longueur :

- $A = AB = H/3$  ;
- $C = CD = H/4$ .

Enfin,  $\tau$  prend la valeur 1 à l'aval du point A et à l'amont du point D.

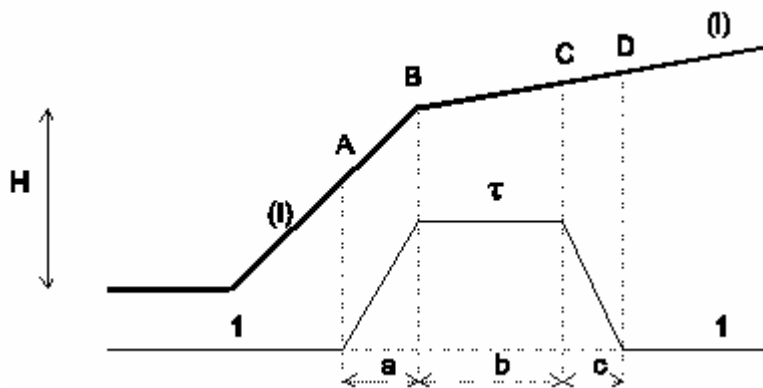
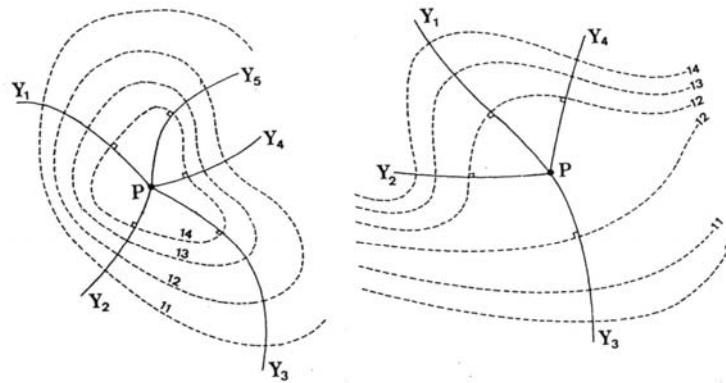


Figure 48 - Principe de calcul du coefficient  $\tau$  pour l'évaluation des effets de site topographiques.

La détermination de  $H$  laisse une certaine part à l'appréciation. À titre indicatif, on peut considérer comme base du relief le point en dessous duquel la pente générale du site devient inférieure à 0,4.

La Figure 49 montre, pour un point de calcul, les différents profils sur lesquels il est possible de calculer le coefficient  $\tau$ . On voit que selon le profil pris en compte, la valeur de  $\tau$  va pouvoir varier sensiblement. C'est le profil le plus défavorable qui doit être utilisé pour le calcul.



*Le profil à considérer est le plus défavorable des profils composites  $Y_i P Y_j$ .*

*Figure 49 - Choix des profils pour le calcul du coefficient  $\tau$ .*

### 8.3. ÉVOLUTION DE LA CONNAISSANCE ET DE LA RÉGLEMENTATION

Les résultats des campagnes de mesures (sismographes, vélocimètres, accéléromètres) ont été parfois en contradiction avec ceux qui étaient attendus.

Lors du récent séisme du Salvador en 2001, des zones affectées par des effets de site topographiques ont été identifiées. Le calcul a posteriori du coefficient des règles PS92 (avec les données topographiques disponibles) s'est avérée dans certains cas en contradiction avec les observations.

La modélisation du phénomène reste donc encore largement du domaine de la recherche et le coefficient défini dans les règles parasismiques n'est pas satisfaisant du point de vue théorique. En outre, sa valeur est étroitement liée à la précision des données topographiques utilisées pour le calcul.

Malgré tout, l'application des règles parasismiques impose l'emploi du coefficient  $\tau$  pour la construction d'ouvrages.

### 8.4. CARTOGRAPHIE

Dans le cadre d'une cartographie à l'échelle communale, les profils ne peuvent être multipliés indéfiniment. Il est donc nécessaire d'adapter ces règles. Par conséquent, sur la commune de Lourdes, les effets de site topographiques sont représentés par un zonage binaire du coefficient, c'est-à-dire en distinguant les zones sans amplification (coefficient égal à 1) de celles où une modification du signal est possible (coefficient supérieur à 1).



Ce coefficient a été calculé en tout point du territoire par le programme TAU du BRGM, qui reprend le principe de calcul des règles PS92 françaises. Ce programme utilise le modèle numérique de terrain au pas de 25 mètres de la zone d'étude, et calcule la valeur de  $\tau$  en chaque maille.

Les zones d'amplification du mouvement par effet de site topographique sont localisées au niveau de crêtes, de barres rocheuses ou de versants présentant une forte pente.

Compte tenu de l'ensemble de ces remarques et afin de tenir compte de l'effet topographique comme préconisé par le Guide Méthodologique des Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR) Risques Sismiques (2002), nous préconisons de fixer un facteur multiplicatif forfaitaire  $\tau = 1.4$  sur les mouvements sismiques définis sous la forme de spectres en accélération pour toutes les zones concernées par une amplification topographique selon la démarche proposée.

Les différentes zones d'aléa sont présentées sur la Figure 50 et la planche 2.

## 9. Appréciation des potentialités de liquéfaction

### 9.1. DÉFINITION ET MÉTHODE

En géotechnique, on appelle liquéfaction le processus de modification de l'état d'un sol, le faisant passer d'une consistance solide et stable au repos, à un état liquide et instable lors d'une sollicitation dynamique. De manière plus spécifique, la transformation de l'état solide à l'état liquide étudiée dans le cadre du présent rapport se fait par augmentation de la pression interstitielle, lors d'un chargement cyclique consécutif à un séisme.

L'augmentation de la pression interstitielle a pour conséquence une diminution des contraintes effectives régnant dans le sol et donc une diminution de sa résistance au cisaillement qui, à l'état ultime, peut devenir nulle : le sol passe alors à l'état liquide.

Pour qu'il y ait liquéfaction sous l'action d'un séisme, il faut donc :

- qu'il y ait susceptibilité du sol à la liquéfaction, c'est-à-dire qu'il soit plutôt granulaire, dans un état peu compact, peu contraint et situé sous la nappe (exemple des sables ou des limons lâches saturés) ;
- qu'il y ait opportunité à la liquéfaction, c'est-à-dire que l'énergie des ondes émises pendant un séisme soit suffisante, cette énergie étant par exemple traduite sous forme d'une accélération maximale en surface et d'un nombre de cycles équivalents, ces deux paramètres dépendant de la magnitude du séisme et de la distance du site au foyer.

Méthodologiquement, pour estimer l'occurrence de phénomènes de liquéfaction, il convient d'examiner successivement :

- le contexte hydrogéologique, notamment la présence de sols dans un état proche de la saturation ;
- la susceptibilité qualitative (critères d'identification des règles PS 92, norme NF P 06-013, ou Guide de Microzonage Sismique – AFPS novembre 1993) ;
- la susceptibilité quantitative (méthodes basées sur des essais mécaniques *in situ* ou au laboratoire, par exemple Seed *et al.*, 1983, ou Ambraseys, 1988) ;
- l'opportunité ou la sollicitation (contexte sismique) ;
- le coefficient de sécurité à la liquéfaction, directement issu des deux points précédents ;
- les potentialités de liquéfaction, *conjonction* du contexte hydrogéologique, de la susceptibilité qualitative et de la valeur du coefficient de sécurité à la liquéfaction ;
- l'intensité de liquéfaction, à partir de l'indice global de liquéfaction permet d'évaluer l'impact de la profondeur et de l'épaisseur des horizons liquéfiables pour une colonne de sol.

### 9.1.1. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction

Pour des sols courants, les règles PS 92, norme NF P 06-013, et les recommandations de l'AFPS pour la réalisation de microzonages sismiques précisent les critères d'identification des sols liquéfiables. La susceptibilité à la liquéfaction est avérée quand les critères suivants sont majoritairement vérifiés.

#### a) Pour les sables, sables vasards et limons

- critère Sa1 :  $S_r$  voisin de 100 % ;
- critère Sa2 :  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 15$ ,  $C_u$  étant ici le coefficient d'uniformité ;
- critère Sa 3 :  $0,05 < D_{50} < 1,5mm$  ;
- critère Sa 4 : en l'état final du projet :
  - $\sigma'_v < 200kPa$  en zones de sismicité Ia et Ib,
  - $\sigma'_v < 250kPa$  en zone de sismicité II,
  - $\sigma'_v < 300kPa$  en zone de sismicité III.

#### b) Pour les sols argileux

- critère Ar1 :  $D_{15} > 5\mu$  ;
- critère Ar2 :  $w_L < 35\%$  ;
- critère Ar 3 :  $w > 0,9 \cdot w_L$  ;
- critère Ar 4 : Sol au-dessus de la droite « A » du diagramme de plasticité<sup>8</sup>.

Peuvent *a contrario* être considérés comme exempts de risque, les sols vérifiant :

- critère Ex1 :  $D_{10} > 2mm$  ;
- ou ceux pour lesquels on a simultanément
 
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{critère Ex11: } D_{70} < 74\mu m \\ \text{critère Ex22: } I_p > 10\% \end{array} \right.$$

---

<sup>8</sup> Dans le diagramme classique limite de liquidité  $w_L$  / indice de plasticité  $I_p$ , la droite dite « A » a pour équation :  $I_p = 0,73(w_L - 20)$ .

### 9.1.2. Susceptibilité quantitative à la liquéfaction

Les méthodes, basées sur des essais *in situ* (Seed *et al.*, 1983) ou de laboratoire évaluent quantitativement la susceptibilité à la liquéfaction en définissant **le taux de contrainte cyclique moyen nécessaire pour avoir la liquéfaction** :  $\left( \frac{\tau_L}{\sigma'_v} \right)_\ell$

Avec :

- $\tau_L$ , contrainte de cisaillement cyclique moyenne horizontale (résistance du sol) ;
- $\sigma'_v$ , contrainte verticale effective.

Ce paramètre dépend à la fois d'une valeur mécanique *in situ*, permettant d'évaluer l'état initial de la compacité du sol, et de la magnitude du séisme considéré.

La valeur mécanique utilisée dans les travaux de Seed est le paramètre N (nombre de coups de mouton pour un enfoncement de 30 cm) du Standard Penetration Test (SPT). Les abaques de calculs à partir de l'essai SPT considèrent une énergie de battage de 60 % de l'énergie théorique maximale (chute libre). On se ramène toujours à cette valeur,  $N_{60}$ , éventuellement en faisant un ratio à partir de l'énergie réelle.

En France, les essais les plus couramment pratiqués sont le pressiomètre et le pénétromètre statique. On se ramène alors à des valeurs du paramètre N par des corrélations usuelles (cf. Cassan – Essais *in situ* en mécanique des sols) :

	Pressiomètre	Pénétromètre
. argiles :	N = 15 à 20 x pl ;	N = 5 à 10 x q
. limons :	N = 30 x pl ;	N = 3,5 à 5 x q
. argiles sableuses		
ou sables argileux :	N = 20 x pl ;	N = 2,5 à 3,5 x q
. sables :	N = 20 x pl.	N = 1,5 à 3,5 x q

La valeur brute du paramètre N est ensuite corrigée du coefficient de normalisation  $C_N$  pour se ramener à une même contrainte verticale effective de 96 kPa.

La valeur  $N_1$  obtenue est :  $N_1 = C_N \times N$

avec  $C_N = 1 - (1,25 \text{ Log } \sigma'_v)$  où  $\sigma'_v$  est en bars

Par ailleurs, selon la fraction fine des matériaux, il faut augmenter la valeur de  $N_1$ , pour tenir compte des corrélations présentées par Seed pour ces sols.

Le taux de contrainte cyclique moyen nécessaire pour avoir la liquéfaction est alors obtenu grâce à l'abaque de Seed pour une magnitude et une valeur  $N_1$  données.

### Opportunité à la liquéfaction

L'évaluation du **taux de contrainte cyclique moyen induit par un séisme** peut être reliée à l'accélération maximale en surface par la relation (Seed *et al.*, 1983) :

$$\left( \frac{\tau_a}{\sigma'_v} \right)_S = 0,65 \times \frac{a_{\max}}{g} \times \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \times rd$$

avec  $rd = 1 - 0,015 \times z$ , où  $z$  est la profondeur en mètres,

$\tau_a$  = contrainte de cisaillement cyclique induite par le séisme.

### Coefficient de sécurité à la liquéfaction

Le rapport des taux de contraintes cycliques moyens définit le facteur de sécurité de la façon suivante :

$$FS_\ell = \left( \frac{\tau_L}{\sigma'_v} \right)_\ell / \left( \frac{\tau_a}{\sigma'_v} \right)_S$$

Selon les PS92, pour que la liquéfaction soit peu probable, il est admis que  $FS_\ell$  doit être supérieur à 1,33. Le guide microzonage sismique de l'AFPS considère une valeur seuil plus conservatrice  $FS_\ell > 1,5$  pour une liquéfaction peu probable.

Cependant, ce facteur de sécurité correspond à une notion très locale dans le sol, mais ne représente pas forcément les conséquences de la liquéfaction en surface. C'est pour ces raisons qu'il est recommandé d'utiliser une approche plus représentative des effets en surface, intégrant le comportement de toute la colonne de sol sous séisme. A ce titre, l'évaluation de l'intensité de liquéfaction est préconisée dans le guide microzonage sismique de l'AFPS.

### Potentialités de liquéfaction

Les potentialités de liquéfactions résultent de la conjonction du contexte hydrogéologique, de la susceptibilité qualitative et du coefficient de sécurité.

### Intensité de la liquéfaction

Conformément au guide méthodologique pour la réalisation de microzonage sismique (AFPS), l'intensité de liquéfaction est définie par l'indice global de liquéfaction (Iwasaki *et al.*, 1982) à partir du facteur  $F_L$ .

L'indice global de liquéfaction,  $I_L$ , permet d'évaluer l'impact de la profondeur et de l'épaisseur des horizons liquéfiables pour une colonne de sol :

$$I_L = \int_0^{20} (10 - 0,5z) F_L dz$$

où :  $F_L = 0$  si matériaux non susceptibles qualitativement

$$F_L = 0 \quad \text{si } FS_\ell \geq 1$$

$$F_L = 1 - FS_\ell \quad \text{si } FS_\ell \leq 1$$

$z$  profondeur (en m)

La valeur de  $I_L$  varie de 0 pour un site non liquéfiable à 100 pour un site très fortement liquéfiable. On distingue plusieurs classes, selon les conséquences que peut avoir la liquéfaction en surface :

- aléa nul : pas de liquéfaction : zones non liquéfiables ou  $I_L = 0$  ;
- aléa faible : liquéfaction peu probable :  $0 < I_L \leq 5$  ;
- aléa moyen : liquéfaction probable :  $5 < I_L \leq 15$  ;
- aléa fort : liquéfaction quasi certaine :  $I_L > 15$ .

On soulignera que pour la représentation cartographique des zones d'aléa homogène, nous avons associé les niveaux nul et faible, dans la mesure où ils n'induisent aucun effet sur l'aménagement urbain.

## 9.2. APPRÉCIATION DES POTENTIALITÉS QUALITATIVES DE LIQUÉFACTION SUR LES DIFFÉRENTES ZONES GÉOTECHNIQUES DE LA COMMUNE DE LOURDES – ANALYSE GÉOLOGIQUE PRÉLIMINAIRE

Les zones géotechniques homogènes décrites au paragraphe 0 ont été examinées une à une sur la base des critères de liquéfaction. On remarquera que les colonnes de sol initialement considérées pour l'étude des effets de site lithologiques ont été également exploitées dans la mesure où elles se révèlent représentatives de ces zones homogènes.

Pour chaque secteur, nous avons exploité les données géologiques et géotechniques d'archives, ainsi que les nouvelles données acquises spécifiquement pour le microzonage sismique. Chaque formation a été examinée en termes de susceptibilité

qualitative. Si cette susceptibilité est avérée, une évaluation quantitative a été faite afin d'apprécier le niveau d'aléa correspondant.

### 9.2.1. Zone Gave Sud

Les sols de cette zone sont en général saturés en eau, en raison de la proximité du gave.

Formation	Épaisseur	Potentiellement liquéfiable	Argument
Alluvions	10 m	Non	Limons argileux fins jusqu'à 1,5 m de profondeur, mais présence de galets en dessous ; la formation potentiellement liquéfiable est donc trop superficielle pour des constructions probablement fondées dans les niveaux grossiers plus consistants.
Limons schisteux	10 m	Non	Altérites du schiste (donc trop cohérents), et bonne résistance mécanique
Limons schisteux	15 m	Non	Altérites du schiste (donc trop cohérents), trop profond, bonne résistance mécanique
Substratum	-	Non	Rocheux

Tableau 31 - Colonne de sol dans la zone Gave Sud et potentialités de liquéfaction.

Aucune formation n'est donc retenue comme potentiellement liquéfiable dans la zone Gave Sud.<sup>9</sup>

### 9.2.2. Zone Lac Lourdes

Les sols de cette zone sont saturés en eau sur l'ensemble de l'épaisseur.

Formation	Épaisseur	Potentiellement liquéfiable	Argument
Argiles	9 m	Oui	Mais on notera cependant une compacité peut être trop importante
Limons	13 m	Non	Cette formation est encore plus compacte que la précédente
Substratum	-	Non	Rocheux

Tableau 32 - Colonne de sol dans la zone Lac Lourdes et potentialités de liquéfaction.

Seuls les argiles de la zone Lac Lourdes sont donc retenus comme potentiellement liquéfiables.

<sup>9</sup> La présence de galets témoigne d'une dynamique de dépôt à forte énergie, non propice au développement de faciès fins très lâches, potentiellement liquéfiables.

### 9.2.3. Zone Gave basilique

Le milieu est considéré comme saturé, tout comme dans la zone Gave Sud.

Formation	Épaisseur	Potentiellement liquéfiable	Argument
Alluvions	15 m	Non	Présence de moraines (malgré des matériaux localement fins et sableux)
Limons schisteux	30 m	Non	Altérites du schiste (donc trop cohérents), bonne résistance mécanique et trop grande profondeur
Substratum	-	Non	Rocheux

Tableau 33 - Colonne de sol dans la zone Gave basilique et potentialités de liquéfaction.

Aucune formation de la zone Gave Basilique n'est donc retenue comme potentiellement liquéfiable.

### 9.2.4. Zone Gave Ouest

Le milieu est considéré comme saturé, tout comme dans la zone Gave Sud.

Formation	Épaisseur	Potentiellement liquéfiable	Argument
Alluvions	14 m	Non	Limons argileux fins jusqu'à 1,5 m de profondeur, mais présence de galets en dessous ; on considère donc que la formation potentiellement sujette à la liquéfaction est trop superficielle
Moraines	17 m	Non	Blocs, bonne résistance mécanique
Substratum	-	Non	Rocheux

Tableau 34 - Colonne de sol dans la zone Gave Ouest et potentialités de liquéfaction.

Aucune formation de la zone Gave Ouest n'est donc retenue comme potentiellement liquéfiable.

### 9.2.5. Zone Moraines Abbadie

Pour la colonne 1, on suppose le sol saturé en raison de sa proximité avec le Gave de Pau.

Formation	Épaisseur	Potentiellement liquéfiable	Argument
Sables	10 m	Non	Présence de galets
Moraines	11 m	Non	Blocs, bonne résistance mécanique
Substratum	-	Non	Rocheux

Tableau 35 - Première colonne de sol dans la zone Moraines Abbadie et potentialités de liquéfaction.



Pour la colonne 2, on suppose le sol non-saturé : aucune formation n'est donc liquéfiable.

Formation	Épaisseur	Potentiellement liquéfiable	Argument
Sables	10 m	Non	Sol non-saturé, présence de galets
Moraines	22 m	Non	Sol non-saturé, blocs, bonne résistance mécanique
Substratum	-	Non	Rocheux

Tableau 36 - Deuxième colonne de sol dans la zone Moraines Abbadie et potentialités de liquéfaction.

Aucune formation de la zone Moraines Abbadie n'est donc retenue comme potentiellement liquéfiable.

### 9.2.6. Zone Alluvions Centre

Globalement, pour toute cette zone, la saturation en eau est considérée comme restant faible.

Pour la colonne 1, le niveau d'eau est à 3 mètres.

Formation	Épaisseur	Potentiellement liquéfiable	Arguments
Alluvions	8 m	Oui	Mais très hétérogène
Tourbes	10 m	Non	Les tourbes ne sont jamais exposées à la liquéfaction des sols, en raison de leur structure (fibres d'origine végétale enchevêtrées)
Sables fins avec graviers	22 m	Oui	Formation présentée comme vasarde et très lâche ; Mais présence de graviers, et un peu profond
Substratum	-	Non	Rocheux

Tableau 37 - Première colonne de sol dans la zone Alluvions Centre et potentialités de liquéfaction

Pour la colonne 2, le niveau d'eau est à 8 m.

Formation	Épaisseur	Potentiellement liquéfiable	Arguments
Alluvions	8 m	Non	Très hétérogène et non-saturé
Limons	32 m	Oui	Mais présence de graviers (certes en profondeur) et consistance moyenne
Substratum	-	Non	Rocheux

Tableau 38 - Deuxième colonne de sol dans la zone Alluvions Centre et potentialités de liquéfaction.

Pour la colonne 3, le niveau d'eau est à 8 m.

Formation	Épaisseur	Potentiellement liquéfiable	Arguments
Alluvions	8 m	Non	Très hétérogène et non-saturé
Limons	12 m	Oui	Mais présence de graviers (certes en profondeur) et consistance moyenne
Substratum	-	Non	Rocheux

Tableau 39 - Troisième colonne de sol dans la zone Alluvions Centre et potentialités de liquéfaction.

Plusieurs formations de la zone Alluvions Centre apparaissent donc comme potentiellement liquéfiables : les alluvions, les sables fins avec graviers et les limons.

### 9.2.7. Zone Alluvions Anclades

Le niveau d'eau se situe entre 6 m et 7,25 m.

Formation	Épaisseur	Potentiellement liquéfiable	Arguments
Sables	10 m	Oui	Les graves sont superficielles, au dessus de l'eau
Limons	35 m	Non	Bonne résistance mécanique et comportement proche du rocher (trop cohérent)
Substratum	-	Non	rocheux

Tableau 40 - Colonne de sol dans la zone Alluvions Anclades et potentialités de liquéfaction.

Seuls les sables de la zone Alluvions Anclades apparaissent comme potentiellement liquéfiables.

### 9.2.8. Zone La Citoyenne

Le niveau d'eau se situe entre 6 m et 7,25 m.

Formation	Épaisseur	Potentiellement liquéfiable	Arguments
Alluvions	7 m	Non	Sol non saturé
Substratum	-	Non	Rocher

La zone La Citoyenne n'est donc pas retenue comme potentiellement liquéfiable.

### 9.2.9. Zone Flysch Biscaye

Le niveau d'eau se situe à la base des limons.

Formation	Épaisseur	Potentiellement liquéfiable	Arguments
Limon-tourbes_vaseuses	4 m	Non	Très hétérogène (tourbes, graviers...), non saturé
Alluvions	6 m	Non	Galets dans matrice argileuse
Alluvions	12 m	Non	Identique à la couche sus-jacente, en plus compacte
Substratum	-	Non	Rocher

Tableau 41 - Colonne de sol dans la zone Flysch Biscaye et potentialités de liquéfaction.

Aucune formation n'est donc retenue comme potentiellement liquéfiable dans la zone Flysh Biscaye.

### 9.2.10. Zone Moraines Saux

La colonne de sol 1 est supposée saturée en eau à partir de 5 m, la colonne 2 n'est pas saturée.

Formation	Épaisseur	Potentiellement liquéfiable	Arguments
Limons sableux	5 m	Non	Non saturé, présence de gravelles et galets
Argiles vaseuses	8 m	Oui	Malgré la présence éventuelle de rares gravelles en profondeur
Substratum	-	Non	Rocher

Tableau 42 - Première colonne de sol dans la zone Moraines Saux et potentialités de liquéfaction.

Formation	Épaisseur	Potentiellement liquéfiable	Arguments
Sables graviers	10 m	Non	Trop grossier et non-saturé
Graviers	26 m	Non	Blocs et non-saturé
Substratum	-	Non	Rocher

Tableau 43 - Deuxième colonne de sol dans la zone Moraines Saux et potentialités de liquéfaction.

Seules les argiles vaseuses de la zone Moraines Saux apparaissent comme potentiellement liquéfiables.

### 9.2.11. Zone Marais Monge

La zone est considérée comme saturée en eau (marais).

Formation	Épaisseur	Potentiellement liquéfiable	Arguments
Tourbes	8,4 m	Non	Les tourbes ne sont pas liquéfiables de par leur structure
Vases	8,6 m	Oui	A vérifier : résistance mécanique moyenne
Substratum	-	Non	Rocher

Tableau 44 - Colonne de sol dans la zone Marais Monge et potentialités de liquéfaction.

Seules les vases de la zone Marais Monge apparaissent comme potentiellement liquéfiables.

### 9.2.12. Zone Terrasses Sarsan

Le sol est non-saturé en eau dans cette zone.

Formation	Épaisseur	Potentiellement liquéfiable	Arguments
Gros blocs	10 m	Non	Blocs, non saturé
Substratum	-	Non	Rocher

Tableau 45 - Colonne de sol dans la zone Terrasses Sarsan et potentialités de liquéfaction.

Aucune formation de la zone Terrasses Sarsan n'est donc retenue comme potentiellement liquéfiable.

### 9.2.13. Zone Alluvions Gare

Le niveau d'eau se situe à la limite des limons, soit à 8 m de profondeur.

Formation	Épaisseur	Potentiellement liquéfiable	Arguments
Alluvions	8 m	Non	Trop hétérogène et non-saturé
Limons	12 m	Oui	Sols de résistance mécanique moyenne (groupe b)
Substratum	-	Non	Rocher

Tableau 46 - Colonne de sol dans la zone Alluvions Gare et potentialités de liquéfaction.

La formation des limons de la zone Alluvions Gare est donc retenue comme potentiellement liquéfiable.

### **9.2.13.1. Synthèse**

Concernant les formations potentiellement liquéfiables, plusieurs formations sont donc à écarter systématiquement :

- les sols insaturés en eau ;
- les tourbes ;
- les sols très grossiers et hétérogènes en terme de granulométrie (présence de graviers, de galets ou de blocs) ;
- les sols trop cohérents et trop compacts ;
- les argiles d'altération de roches du substratum (argiles plastiques moyennement compacts) ;
- les roches (substratum).

Parmi les différentes formations retenues sur la commune de Lourdes, on retiendra donc comme potentiellement liquéfiables les formations suivantes :

- les argiles de la zone Lac Lourdes ;
- les alluvions de la zone Alluvions Centre ;
- les sables fins avec graviers de la zone Alluvions Centre ;
- les limons de la zone Alluvions Centre ;
- les sables de la zone Alluvions Anclades ;
- les argiles vaseuses de la zone Moraines Saux ;
- les vases de la zone Marais Monge ;
- les limons de la zone Alluvions Gare.

Ces 8 formations ont fait l'objet d'une analyse plus poussée de leur susceptibilité à la liquéfaction.

## **9.3. SUSCEPTIBILITÉ QUALITATIVE À LA LIQUÉFACTION – EXPLOITATION DES CRITÈRES NORMALISÉS**

### **9.3.1. Les argiles de la zone Lac Lourdes**

Lors des reconnaissances de sol effectuées à la demande du BRGM, deux différents types d'argiles ont été mis en évidence : une couche superficielle d'argile surmontant une seconde couche, plus épaisse et plus compacte. Voici les résultats obtenus pour ces deux types d'argiles vis-à-vis des critères de liquéfaction :

Nature envisagée	Critères de suspicion	Argiles
Sables	$S_r$ voisin de 100 %	Oui (venue d'eau croissante)
	$C_u = D_{60}/D_{10} < 15$	Non ( $C_u = 45,7$ )
	$0,05 \text{ mm} < D_{50} < 1,5 \text{ mm}$	Non (entre 0,035 et 0,05 mm)
	$\sigma'_v < 200 \text{ kPa}$ en zones de sismicité $I_a$ et $I_b$	Oui (de l'ordre de 140 kPa au fond)
Argiles	$D_{15} > 5 \mu\text{m}$	Non ( $D_{15} < 0,0035 \text{ mm}$ )
	$W_L < 35 \%$	Non ( $W_L = 47,3 \%$ )
	$W > 0,9 \cdot W_L$	Non ( $W = 0,8 \cdot W_L$ )
	Sol au dessus de la droite A du diagramme de plasticité	Non
Nature	Critères d'exclusion	Argiles
Sables	$D_{10} > 2 \text{ mm}$	Non ( $D_{10} = 0,0019 \text{ mm}$ )
Argiles	$D_{70} < 74 \mu\text{m}$ et $I_p > 10$	Non ( $D_{70} > 0,2 \text{ mm}$ et $I_p < 5$ )

Nature envisagée	Critères de suspicion	Argiles compactes
Sables	$S_r$ voisin de 100 %	Oui (forte venue d'eau)
	$C_u = D_{60}/D_{10} < 15$	Non ( $C_u > 208$ )
	$0,05 \text{ mm} < D_{50} < 1,5 \text{ mm}$	Oui ( $0,08 \text{ mm} < D_{50} < 0,125 \text{ mm}$ )
	$\sigma'_v < 200 \text{ kPa}$ en zones de sismicité $I_a$ et $I_b$	Oui (de l'ordre de 140 kPa au fond)
Argiles	$D_{15} > 5 \mu\text{m}$	Non ( $D_{15} < 0,002 \text{ mm}$ )
	$W_L < 35 \%$	Non ( $W_L = 40,6 \%$ )
	$W > 0,9 \cdot W_L$	Oui ( $W = 1,01 \cdot W_L$ )
	Sol au dessus de la droite A du diagramme de plasticité	Non
Nature	Critères d'exclusion	Argiles compactes
Sables	$D_{10} > 2 \text{ mm}$	Non ( $D_{10} = 0,0019 \text{ mm}$ )
Argiles	$D_{70} < 74 \mu\text{m}$ et $I_p > 10$	Non ( $D_{70} > 0,4 \text{ mm}$ et $I_p < 5$ )

Il apparaît donc qu'aucun des deux types d'argiles analysés ne répond suffisamment aux critères de liquéfaction :

- vis-à-vis des critères pour les sables, ils sont à granulométrie trop étalée et parfois trop fins ;
- vis-à-vis des critères pour les argiles, ils sont là aussi trop fins, et avec des limites de liquidité trop élevées ; le critère de la droite de Casagrande n'est pas non plus vérifié.

Les argiles de la zone Lac Lourdes ne sont donc pas retenues comme étant potentiellement liquéfiables, bien qu'aucun des critères d'exclusion de la liquéfaction n'ait pu être vérifié.

### 9.3.2. Les alluvions de la zone Alluvions Centre

Lors des reconnaissances de sol effectuées à la demande du BRGM, trois différents types d'alluvions argileuses ont été mis en évidence : une couche superficielle d'argiles plus ou moins sableuses surmontant une seconde couche allant des argiles sableuses aux sables argileux, et enfin en dessous des argiles gris-bleu.

Voici les résultats obtenus pour les deux types d'argiles rencontrés vis-à-vis des critères de liquéfaction :

Nature envisagée	Critères de suspicion	Argiles plus ou moins sableuses
Sables	$S_r$ voisin de 100 %	Oui (venue d'eau faible)
	$C_u = D_{60}/D_{10} < 15$	Non ( $C_u = 290$ )
	$0,05 \text{ mm} < D_{50} < 1,5 \text{ mm}$	Oui ( $0,4 \text{ mm} < D_{50} < 1 \text{ mm}$ )
	$\sigma'_v < 200 \text{ kPa}$ en zones de sismicité $I_a$ et $I_b$	Oui (de l'ordre de 130 kPa au fond)
Argiles	$D_{15} > 5 \mu\text{m}$	Oui ( $D_{15} > 0,006 \text{ mm}$ )
	$W_L < 35 \%$	Non ( $W_L = 37,2$ )
	$W > 0,9 \cdot W_L$	Non ( $W = 0,51 \cdot W_L$ )
	Sol au dessus de la droite A du diagramme de plasticité	Non
Nature	Critères d'exclusion	Argiles plus ou moins sableuses
Sables	$D_{10} > 2 \text{ mm}$	Non ( $D_{10} = 0,0028 \text{ mm}$ )
Argiles	$D_{70} < 74 \mu\text{m}$ et $I_P > 10$	Non ( $D_{70} > 1 \text{ mm}$ et $I_P = 7,1$ )

Nature envisagée	Critères de suspicion	Argiles sableuses à sables argileux
Sables	$S_r$ voisin de 100 %	Oui (venue d'eau faible à moyenne)
	$C_u = D_{60}/D_{10} < 15$	Non ( $C_u = 312$ )
	$0,05 \text{ mm} < D_{50} < 1,5 \text{ mm}$	Oui ( $0,4 \text{ mm} < D_{50} < 1 \text{ mm}$ )
	$\sigma'_v < 200 \text{ kPa}$ en zones de sismicité $I_a$ et $I_b$	Oui (de l'ordre de 130 kPa au fond)
Argiles	$D_{15} > 5 \mu\text{m}$	Oui ( $D_{15} > 0,006 \text{ mm}$ )
	$W_L < 35 \%$	Non ( $W_L = 35,6$ )
	$W > 0,9 \cdot W_L$	Non ( $W = 0,60 \cdot W_L$ )
	Sol au dessus de la droite A du diagramme de plasticité	Non
Nature	Critères d'exclusion	Argiles sableuses à sables argileux
Sables	$D_{10} > 2 \text{ mm}$	Non ( $D_{10} = 0,0029 \text{ mm}$ )
Argiles	$D_{70} < 74 \mu\text{m}$ et $I_P > 10$	Non ( $D_{70} > 1 \text{ mm}$ et $I_P < 5$ )

Nature envisagée	Critères de suspicion	Argiles gris bleu
Sables	$S_r$ voisin de 100 %	Oui (venue d'eau faible)
	$C_u = D_{60}/D_{10} < 15$	Non ( $C_u = 178$ )
	$0,05 \text{ mm} < D_{50} < 1,5 \text{ mm}$	Oui ( $0,08 \text{ mm} < D_{50} < 0,125 \text{ mm}$ )
	$\sigma'_v < 200 \text{ kPa}$ en zones de sismicité $I_a$ et $I_b$	Oui (de l'ordre de 130 kPa au fond)
Argiles	$D_{15} > 5 \text{ }\mu\text{m}$	Non ( $D_{15} < 0,0035 \text{ mm}$ )
	$W_L < 35 \%$	Non ( $W_L = 53,2$ )
	$W > 0,9 \cdot W_L$	Non ( $W = 0,66 W_L$ )
	Sol au dessus de la droite A du diagramme de plasticité	Non
Nature	Critères d'exclusion	Argiles gris bleu
Sables	$D_{10} > 2 \text{ mm}$	Non ( $D_{10} = 0,002 \text{ mm}$ )
Argiles	$D_{70} < 74 \text{ }\mu\text{m}$ et $I_p > 10$	Non ( $D_{70} > 0,4 \text{ mm}$ et $I_p = 7,2$ )

Quel que soit l'essai considéré, aucune des argiles considérées n'est retenue comme potentiellement liquéfiable :

- vis-à-vis des critères pour les sables ils sont tous beaucoup trop hétérogènes ;
- vis-à-vis des critères pour les argiles, leurs limites de liquidité sont trop élevées et ils ne sont pas assez humides ; l'un des trois échantillons était de plus trop fin, et aucun ne vérifie le critère de la droite de Casagrande.

Les alluvions de la zone Alluvions Centre ne sont donc pas retenues comme étant potentiellement liquéfiables, bien que les critères d'exclusion ne soient pas vérifiés.

### 9.3.3. Les sables fins avec graviers de la zone Alluvions Centre

Ces sables ont été décrits, dans une étude géotechnique sur le jardin de l'You, comme des sables fins très lâches et donnant lieu à de très fortes venues d'eau. On soulignera cependant que cette formation semble très localisée, puisqu'elle n'apparaît pas dans tous les sondages. Les valeurs de perméabilité confirment la nature de cette formation (coefficient de perméabilité  $k = 10^{-5} \text{ m/s}$  : sables fins). Cette description correspond donc à une formation potentiellement liquéfiable, et en l'absence de caractéristiques géotechniques supplémentaires, une analyse quantitative s'impose afin de tester la susceptibilité à la liquéfaction des sols face au séisme de référence. On notera cependant que cette formation semble très hétérogène et localisée. On adoptera donc pour l'étude quantitative une hypothèse conservatrice pour laquelle ces sables fins se situent entre 5 et 15 mètres de profondeur.



### 9.3.4. Les limons de la zone Alluvions Centre

Certains échantillons correspondent à des limons vasards.

Nature envisagée	Critères de suspicion	Limons
Sables	$S_r$ voisin de 100 %	Oui (en général, venues d'eau, sauf dans certaines zones plus compacte)
	$C_u = D_{60}/D_{10} < 15$	
	$0,05 \text{ mm} < D_{50} < 1,5 \text{ mm}$	
	$\sigma'_v < 200 \text{ kPa}$ en zones de sismicité $I_a$ et $I_b$	
Argiles	$D_{15} > 5 \mu\text{m}$	
	$W_L < 35 \%$	Oui ( $W_L$ varie entre 31 et 33 %)
	$W > 0,9 \cdot W_L$	Non ( $W/W_L$ varie entre 0,74 et 0,88)
	Sol au dessus de la droite A du diagramme de plasticité	Oui pour un des trois échantillons analysés : en moyenne, on est sur la droite...
Nature	Critères d'exclusion	Limons
Sables	$D_{10} > 2 \text{ mm}$	
Argiles	$D_{70} < 74 \mu\text{m}$ et $I_P > 10$	Non ( $IP$ varie entre 4 et 8)

L'absence de caractérisation granulométrique de ces limons empêche une analyse de l'ensemble des critères de liquéfaction, mais les premières informations semblent mettre en évidence une liquéfaction possible dans cette formation. Ainsi, par rapport aux critères correspondant aux argiles, bien qu'on ne puisse conclure sur l'aspect granulométrique, la limite de liquidité correspond à une formation liquéfiable ; le matériau est quasiment saturé (teneur en eau proche de la limite de liquidité, critère presque vérifié), et les mesures réalisées démontre une ambiguïté vis-à-vis du critère de la droite de Casagrande (sur 3 points expérimentaux, un est légèrement au dessus de la droite, un autre est juste dessus et le dernier est légèrement en dessous). Les limons de la zone Alluvions Centre sont donc retenus comme potentiellement liquéfiables, et donnent lieu à une étude quantitative dans la partie suivante.

### 9.3.5. Les sables de la zone Alluvions Anclades

On classera ces sables en aléa faible, au vu de leur lithologie (présence de graves et gravier) et de leurs caractéristiques géophysiques (les profils de SASW illustrent une consistance moyenne)

### 9.3.6. Les argiles vaseuses de la zone Moraines Saux

Un certain nombre de mesures a été réalisé sur des échantillons prélevés dans cette zone. Voici les résultats obtenus vis-à-vis des critères pour la liquéfaction sur un matériau très proche des argiles vaseuses (il s'agit d'un sable fin marquant la transition entre les limons sus-jacents et les argiles vaseuses) :

Nature envisagée	Critères de suspicion	Sable fin proche des argiles vaseuses
Sables	$S_r$ voisin de 100 %	Oui (niveau de la nappe)
	$C_u = D_{60}/D_{10} < 15$	Non ( $C_u = 36,2$ )
	$0,05 \text{ mm} < D_{50} < 1,5 \text{ mm}$	Oui ( $0,4 \text{ mm} < D_{50} < 1 \text{ mm}$ )
	$\sigma'_v < 200 \text{ kPa}$ en zones de sismicité $I_a$ et $I_b$	
Argiles	$D_{15} > 5 \text{ }\mu\text{m}$	Oui ( $D_{10} > 0,08 \text{ mm}$ )
	$W_L < 35 \%$	Oui ( $W_L = 29 \%$ )
	$W > 0,9 \cdot W_L$	Non ( $W = 0,42 \cdot W_L$ )
	Sol au dessus de la droite A du diagramme de plasticité	Non
Nature	Critères d'exclusion	Sable fin proche des argiles vaseuses
Sables	$D_{10} > 2 \text{ mm}$	Non ( $D_{10} = 0,026 \text{ mm}$ )
Argiles	$D_{70} < 74 \text{ }\mu\text{m}$ et $I_p > 10$	Non ( $D_{70} > 1 \text{ mm}$ et $I_p < 5$ )

Les critères vis-à-vis des sables sont proches d'être vérifiés (malgré une granulométrie un peu étalée). Toutefois, en l'absence de données supplémentaires sur ces argiles vaseuses, et dans la mesure où une partie des critères ne sont pas atteints, ni pour les sables fins de cette zone, ni pour les autres argiles de ce type rencontrés sur la commune de Lourdes, il a été retenu de classer cette formation en aléa moyen.

### 9.3.7. Les vases de la zone Marais Monge

Plusieurs analyses granulométriques ont été réalisées lors d'une étude géotechnique pour le développement d'une route dans cette zone. Ces analyses montrent des matériaux généralement trop grossiers en surface pour être susceptibles à la liquéfaction, et les argiles plus profonds, correspondant aux vases, se révèlent quant à eux trop fins (le critère d'exclusion pour les argiles est très largement vérifié, avec des indices de plasticité  $I_p$  supérieurs à 10 et des  $D_{70}$  de l'ordre du micron).

### 9.3.8. Les limons de la zone Alluvions Gare

Les essais de pénétromètre dynamique réalisés dans cette zone montre des sols relativement compacts, de bonne résistance mécanique, en particulier au delà de 11,5 m de profondeur. Donc seule la couche de limons comprise entre 8 et 11,5 m semble potentiellement liquéfiable. Compte tenu des essais de pénétromètre et de l'épaisseur limitée de cette couche, il a été retenu de classer cette formation en aléa faible.

### 9.3.9. Synthèse

L'analyse qualitative des formations retenues précédemment a permis d'éliminer tout risque de liquéfaction pour certaines d'entre elles : soit les critères d'exclusion sont vérifiés (cas des vases de la zone Marais Monge), soit les données géotechniques disponibles ont prouvé une insuffisante satisfaction des critères de liquéfaction (granulométrie, limite de liquidité...).

Seules 4 formations sont donc finalement conservées comme potentiellement liquéfiables à l'issue de cette analyse :

- les sables fins de la zone Alluvions Centre ;
- les limons de la zone Alluvion Centre ;
- les sables de la zone Alluvions Anclades, classés en aléa faible ;
- les argiles vaseuses de la zone Moraine Saux, classées en aléa moyen ;
- les limons de la zone Alluvions Gare, classés en aléa faible.

Les 2 premiers horizons, pour lesquels nous disposons de caractéristiques géotechniques *in situ*, ont fait l'objet d'une analyse quantitative présentée au chapitre suivant.

#### **9.4. SUSCEPTIBILITÉ QUANTITATIVE ET OPPORTUNITÉ À LA LIQUÉFACTION**

Le calcul a été réalisé pour les 2 colonnes de sol de la zone Alluvions Centre comprenant les formations retenues comme liquéfiables suite à l'étude qualitative de la susceptibilité. Les données sont issues des dossiers géotechniques disponibles sur les différents sites. On notera toutefois que l'essai SPT étant peu courant en France, il faut procéder par corrélation avec les essais géotechniques plus traditionnels tels que les essais de pénétromètres statique et dynamique, disponibles sur les sites concernés. Pour les sables fins de la colonne 1, les essais *in situ* ont montré une résistance à la pénétration dynamique de l'ordre de 2,5 MPa. Dans la colonne 2, les limons sont plus médiocres entre 10 et 19 mètres de profondeur, avec  $q_d = 0,7$  MPa en moyenne.

La magnitude du séisme de référence est de 5,8. L'accélération maximale sur site considérée pour le calcul est de  $2,4 \text{ m.s}^{-2}$  pour la zone Alluvions Centre (classe 4).

Les facteurs de sécurité ont été calculés pour la zone Alluvions Centre dans la colonne 1 (Sables fins) et la colonne 2 (Limon). On notera toutefois que pour la colonne 1, une hypothèse conservatrice a été retenue, dans laquelle les sables fins s'étendent de 5 à 15 mètres de profondeur.

Les coefficients de sécurité ainsi obtenus s'avèrent :

- médiocres pour les sables fins (Tableau 47) ;
- insuffisants pour les limons (Tableau 48).

Cependant, ces résultats restent très dépendants de la représentativité des corrélations usuelles entre le pénétromètre et le SPT. En faisant confiance aux données et corrélations du pénétromètre, les potentialités de liquéfaction induisent une intensité de liquéfaction (indice d'Iwasaki) nulle pour la colonne 1 de la zone Alluvions Centre (formation des Sables fins) et une intensité de liquéfaction de 9 pour la colonne 2 de la zone Alluvions Centre (Limon).

Par conséquent, conformément à la classification établie dans le guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique, **la liquéfaction au droit du site est probable dans la zone Alluvions Centre**. Cela correspond donc à un niveau d'aléa moyen.

Cela signifie que si la zone liquéfie effectivement, l'incidence en surface devrait rester relativement modérée. En effet :

- un bâtiment, s'il est fondé superficiellement, aura une couche de fondation de 5 à 8 mètres d'alluvions non liquéfiables. Cela permettra normalement de limiter fortement les risques de poinçonnement des fondations et de bien répartir les tassements en surface ;
- les limons liquéfiables ne sont pas présents sur la totalité de la zone Alluvions Centre : ils ont en effet été en particulier détectés sur le site du Palais des Congrès, mais ne sont pas apparus lors de l'étude géotechnique sur le site des Jardins de l'You.

## 9.5. CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA LIQUÉFACTION

Sur la base de l'analyse précédemment réalisée, seule la zone « Alluvions Centre » et la Zone « Moraines Saux » ont été cartées en aléa moyen, tous les autres secteurs étant en aléa faible à nul (Figure 50 et planche 2).

## 9.6. PRÉCONISATIONS EN TERME DE DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Sachant que le risque de liquéfaction semble localement avéré sur la zone Alluvions Centre, malgré des effets probablement limités, il est recommandé d'en tenir compte vis-à-vis de l'urbanisation de la zone. A ce titre, nous recommandons, pour la construction de bâtiments à enjeux, d'effectuer une étude de sol en prenant en compte l'aspect liquéfaction afin de vérifier l'existence réelle du risque sur le site et, si nécessaire, de définir des modalités de mise en sécurité des édifices.

**Lourdes - Zone Alluvions Centre - Colonne 1**

Position de la nappe : z = 3 m

Profondeur (m) ht et bas moy.	Horizon	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\psi$ (kN/m <sup>5</sup> )	$\sigma_v$ (kPa)	$\sigma'_v$ (kPa)	calcul de $(\sigma'_\sigma)_{eq}$		calcul de $(\sigma'_\sigma)$				Facteur de sécurité		Intensité de liquéfaction		
						$a_{max}$ (m/s <sup>2</sup> )	$r_d$	$q$ (MPa)	$N_{eq}$	$C_N$	$N_1$	$(\sigma'_\sigma)_{(tau)}$	$(\sigma'_\sigma)_{(cyclic)}$	FS	$F_s$	$I_L$
0 - 4 m	Alluvions	18	8					1,5							0	0
4 - 5 m	Tourbes	11	1	77,5	72,5	2,4	0,8848	0,1642	2,5	8,33	1,1746	10	0,190	0,266	1,620	0,0000
5 - 6 m	Sables fins	18	10	95,5	82,5	2,4	0,9773	0,1785	2,5	8,33	1,1044	9	0,180	0,252	1,428	0,0000
6 - 7 m	Sables fins	18	10	113,5	92,5	2,4	0,9683	0,1854	2,5	8,33	1,0423	9	0,170	0,238	1,284	0,0000
7 - 8 m	Sables fins	18	10	131,5	102,5	2,4	0,9578	0,1917	2,5	8,33	0,9866	8	0,160	0,224	1,169	0,0000
8 - 9 m	Sables fins	18	10	149,5	112,5	2,4	0,9458	0,1961	2,5	8,33	0,9361	8	0,160	0,224	1,142	0,0000
9 - 10 m	Sables fins	18	10	167,5	122,5	2,4	0,9323	0,1989	2,5	8,33	0,8898	7	0,145	0,203	1,021	0,0000
10 - 11 m	Sables fins	18	10	185,5	132,5	2,4	0,9173	0,2003	2,5	8,33	0,8472	7	0,130	0,182	0,908	0,0915
11 - 12 m	Sables fins	18	10	203,5	142,5	2,4	0,9008	0,2007	2,5	8,33	0,8077	7	0,130	0,182	0,907	0,0931
12 - 13 m	Sables fins	18	10	221,5	152,5	2,4	0,8828	0,2000	2,5	8,33	0,7709	6	0,130	0,182	0,910	0,0901
13 - 14 m	Sables fins	18	10	239,5	162,5	2,4	0,8633	0,1985	2,5	8,33	0,7364	6	0,125	0,175	0,882	0,1184
14 - 15 m	Sables fins	18	10	257,5	172,5	2,4	0,8423	0,1961	2,5	8,33	0,7040	6	0,125	0,175	0,892	0,1078
																1,8

Tableau 47 - Zone Alluvions Centre, Colonne 1 - Calcul de l'intensité de liquéfaction.

**Lourdes - Zone Alluvions Centre - Colonne 2**

Position de la nappe : z = 8 m

Profondeur (m) ht et bas moy.	Horizon	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_v$ (kPa)	$\sigma'_v$ (kPa)	calcul de $(\tau/\sigma')_{vs}$		calcul de $(\tau/\sigma')$				Facteur de sécurité		Intensité liquéfaction		
						$a_{max}(ms^2)$	$r_g$	$q$ (MPa)	$N_{eq}$	$C_u$	$N_1$	$(\tau/\sigma')_{(eqst)}$	$(\tau/\sigma')_{(centrg)}$	FS	$F_e$	$I_u$
0-8 m	Alluvions	18	8					4						> 2	0	0
8-9 m	Limons	18	8	153	148	2,4	0,9458	2,5	8,33	0,7872	7	0,190	0,266	1,744	0,0000	0,0000
9-10 m	Limons	18	8	171	156	2,4	0,9323	2,5	8,33	0,7586	6	0,175	0,245	1,537	0,0000	0,0000
10-11 m	Limons	18	8	189	164	2,4	0,9173	0,7	2,33	0,7314	2	0,060	0,084	0,509	0,4906	2,3306
11-12 m	Limons	18	8	207	172	2,4	0,9008	0,5	1,67	0,7056	1	0,060	0,084	0,497	0,5033	2,1391
12-13 m	Limons	18	8	225	180	2,4	0,8828	0,7	2,33	0,6909	2	0,060	0,084	0,488	0,5120	1,9202
13-14 m	Limons	18	8	243	188	2,4	0,8633	0,7	2,33	0,6573	2	0,060	0,084	0,483	0,5175	1,6617
14-15 m	Limons	18	8	261	196	2,4	0,8423	0,7	2,33	0,6347	1	0,060	0,084	0,480	0,5199	1,4298
15-16 m	Limons	18	8	279	204	2,4	0,8198	0,7	2,33	0,6130	1	0,060	0,084	0,480	0,5198	1,1694
16-17 m	Limons	18	8	297	212	2,4	0,7958	0,7	2,33	0,5921	2	0,100	0,140	0,805	0,1950	0,3413
17-18 m	Limons	18	8	315	220	2,4	0,7703	1,2	4	0,5720	2	0,100	0,140	0,814	0,1863	0,2329
18-19 m	Limons	18	8	333	228	2,4	0,7433	0,8	2,67	0,5526	1	0,060	0,084	0,496	0,5040	0,3780
19-20 m	Limons	18	8	351	196	2,4	0,7148	0,1997	6	0,6347	13	0,330	0,462	2,314	0,0000	0,0000

Tableau 48 - Zone Alluvions Centre, Colonne 2 - Calcul de l'intensité de liquéfaction.

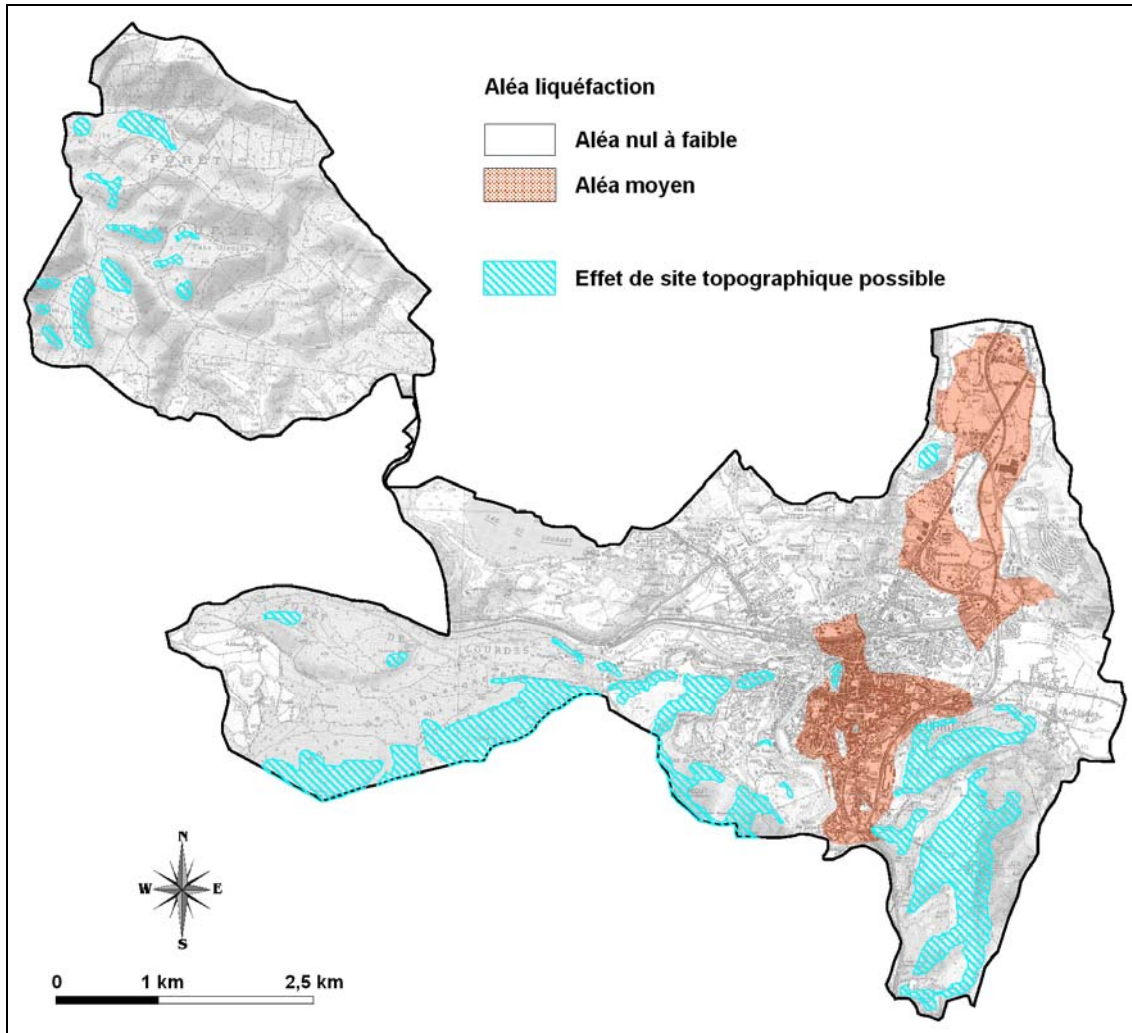


Figure 50 - Effet de site topographique et aléa liquéfaction.

## 10. Cartographie des mouvements de terrain

### 10.1. CONTEXTE

Les mouvements de terrain les plus susceptibles d'être déclenchés par les séismes sont les glissements de terrain et les chutes de blocs. Les premiers correspondent essentiellement à des matériaux à composante argileuse qu'une pente, même moyenne, et un fort contenu en eau rendront d'autant plus sensible à un éventuel mouvement. Les seconds intéressent les matériaux compétents (durs), fracturés, dont des éléments pourront être mobilisés par d'éventuelles secousses dans des zones à forte pente. Bien évidemment les zones de glissement et de chute de blocs peuvent se recouvrir, en fonction de la lithologie ou de la morphologie. C'est par exemple le cas de la formation composant la zone du parcours sportif de la forêt de Subercarrère : elle est constituée de blocs rocheux métriques emballés dans une matrice argileuse évoquant un matériel morainique du fait de sa grande compétence. Humidité, blocs rocheux et forte pente sont susceptibles, en cas d'épisode sismique de provoquer glissements et chute de blocs sur le chemin de promenade qui court le long du Gave.

Faute de disposer d'indications sur la présence de cavités souterraines sur la commune de Lourdes, hormis la grotte du Sanctuaire, et dans la mesure où aucun évènement de type effondrement n'est connu sur le territoire communal, les aléas liés aux phénomènes d'effondrement de cavités ont été considérés comme négligeables dans le microzonage sismique.

### 10.2. DONNÉES EXPLOITÉES

L'étude d'aléa des mouvements de terrain repose sur l'utilisation de divers types de données :

- le modèle numérique de terrain IGN au pas de 50 m ;
- les cartes topographiques IGN au 1/25 000 ;
- les cartes géologiques BRGM au 1/50 000 ;
- le PRR de la commune de Lourdes, mis à disposition par la DDE65 ;
- les données évènementielles issues de la BDMVT (données fournies par le service RTM 65).



## 10.3. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

### 10.3.1. Phasage de l'analyse

La méthodologie adoptée se subdivise en plusieurs étapes essentielles :

- recensement et analyse des instabilités connues sur la zone d'étude ;
- identification des formations géologiques propices aux mouvements de terrain et définition de critères de pentes, ou de critères géomorphologiques, pour localiser les zones de départs d'instabilité ;
- élaboration de cartes d'orientation de l'aléa, intégrant les zones de départ et les zones de propagation, par traitement semi automatisé sous système d'information géographique ;
- comparaison de la carte d'orientation avec la carte d'aléa PPR mouvements de terrain dressée sur la commune de Lourdes : modifications de certains critères et affinage des contours de zones homogènes d'aléa ;
- levé de terrain afin de finaliser la carte d'aléa en fonction de la réalité de terrain (présence d'indices, calage sur la topographie réelle, etc.). Les zones à enjeux qui sont exposées sont plus particulièrement analysées.

L'approche retenue repose donc sur l'exploitation de données d'archives, associées à un croisement de données numériques, le tout étant validé par des observations de terrain. Ce type de technique est très largement retenu pour l'élaboration d'atlas des risques ou de PPR.

### 10.3.2. Détermination de critères de susceptibilité aux instabilités

Il n'existe pas à ce jour de méthode unique totalement infaillible pour dresser des cartes d'aléa sur des secteurs plurikilométriques, cela d'autant plus que l'acquisition d'une information topographique très fine et de nombreuses données géotechniques *in situ* se révèle extrêmement onéreux. À ce titre, on citera le guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique élaboré par l'AFPS précisant au chapitre C.IV.2 : « *Le zonage d'aléa mouvements de terrain, aggravé par la prise en compte de la sismicité, ne peut être que relativement grossier* ».

Les paragraphes suivants récapitulent certains principes ayant guidé la cartographie de l'aléa mouvements de terrain :

#### a) Géologie

Les formations susceptibles aux instabilités n'ont pas été distinguées entre elles, hormis en ce qui concerne la différenciation entre susceptibilité aux glissements et susceptibilité aux éboulements. Cela s'explique d'une part en raison de la relative grande variété de faciès au sein d'un même horizon, ce qui ne permet pas toujours de

correctement les différentier, et d'autre part de l'approche retenue qui ne nécessite pas d'entrer à ce niveau de résolution,

### **b) Pentes**

Le choix des valeurs de seuils de pente repose essentiellement sur le fruit de notre expérience dans un contexte similaire (en particulier le PPR du district d'Annecy, où l'on retrouve des formations de moraines recoupées par des horizons alluviaux), ces valeurs étant toutefois confrontées aux résultats du PPR et aux observations de terrain afin de s'assurer de leur validité.

Cette approche, somme toute restrictive par rapport à des techniques déterministes plus précises, est imposée par les raisons suivantes :

- faute d'instabilité recensées en nombre suffisant (uniquement deux évènements RTM, non géoréférencés), il n'a pas été possible de procéder à un rétrocalage des hypothèses d'instabilité ;
- le modèle numérique de terrain présente un pas de 50 m, ce qui conduit à « gommer » les petits escarpements souvent propices aux instabilités. Cette difficulté oblige donc à arbitrairement abaisser les seuils de pente afin d'englober toutes les zones potentiellement instables. C'est en nous basant d'abord sur notre expérience que la baisse des seuils de pente a été fixée ;
- en l'absence de données géotechniques suffisantes sur les formations de versant, et en particulier sur la position de la nappe, il est délicat de dresser des modèles numériques d'étude de la rupture en mode statique puis en dynamique. La représentativité de ces résultats ne pourrait être considérée comme meilleure que celle associée aux valeurs issues de l'approche retenue pour la présente étude.

C'est ainsi que les valeurs de seuil retenues de 10° et 20° peuvent paraître sévères. Bien que localement conservatrices, elles ont cependant pour intérêt d'intégrer les incertitudes liées à l'échelle de certaines données de bases (carte géologique au 1/50 000, MNT au pas de 50 m) et de tenir compte de l'effet dynamique du séisme tant au niveau déclenchement qu'au niveau propagation.

### **10.3.3. Intégration de l'effet dynamique du séisme**

Comme indiqué dans le paragraphe précédent, vis-à-vis de la susceptibilité au déclenchement d'instabilités dans les zones de départ, l'effet pénalisant des séismes a été intégré dans l'incertitude de l'approche conservatrice retenue. En particulier, les seuils de pente favorables aux glissements peuvent sembler pessimistes s'ils avaient été exploités pour de petits secteurs où la topographie et la géomécanique des sols étaient parfaitement connues. Cependant, la précision relativement limitée des données disponibles sur Lourdes, ainsi que notre expérience en matière de microzonage sismique (en particulier sur Annecy) conduisent à retenir ces valeurs de pente.

De plus, les zones de propagation ont été arbitrairement étendues vers l'aval afin d'intégrer l'effet d'accélération des objets en mouvement induit par les séismes.

Ces principes peuvent conduire à une nette différenciation entre des cartes d'aléa statiques et des cartes dynamiques. En particulier, ceci explique les principales différences entre la carte d'aléa mouvements de terrain dressée lors du microzonage (prise en compte des effets dynamique) et celle issue du PPR communal (statique).

#### **10.3.4. Niveaux d'aléa**

En conformité avec le guide microzonage sismique de l'AFPS, trois niveaux d'aléa ont été retenus :

- aléa nul à faible ;
- aléa moyen (ou modéré) ;
- aléa fort (ou important).

Le niveau d'aléa majeur (ou très élevé) n'a pas été considéré sur Lourdes dans la mesure où il s'applique à des instabilités exceptionnelles (type Séchillienne ou Clapière). On remarquera que contrairement aux PPR, les niveaux d'aléa « nul à très faible » et « faible » ne sont distingués par le guide AFPS.

Afin de garder une démarche homogène entre les types de phénomènes (glissements, chutes de blocs, etc.), qui pourra s'appliquer au mieux à l'approche retenue, les critères de différenciation entre niveaux d'aléa sont ceux proposés dans le guide d'élaboration des PPR édité par le MEDD. Les niveaux d'aléa sont essentiellement fixés à partir des moyens à mettre en oeuvre pour s'opposer aux phénomènes à risques :

- aléa nul à faible : moyens supportables financièrement par un propriétaire individuel ;
- aléa moyen : moyens supportables financièrement par un groupe restreint de propriétaires (immeuble collectif ou petit lotissement) ;
- aléa fort : parades intéressant une aire géographique débordant largement le cadre parcellaire et /ou d'un coût très important et/ou techniquement difficile.

## 10.4. LES GLISSEMENTS

La cartographie préliminaire (cartes d'orientation) des zones de glissement potentiel a été dressée en combinant deux couches d'information, la carte géologique et la carte des pentes, elle-même dérivée du MNT IGN. Le résultat brut obtenu a été ensuite vérifié visuellement par rapport aux cartes géologiques et topographiques (scan25 de l'IGN), et éventuellement ajusté. Un contrôle terrain a enfin permis de finaliser les contours ainsi obtenus

### 10.4.1. Les formations géologiques

La commune de Lourdes est composée de deux types de roches dont la compétence, et donc le comportement géotechnique, est assez tranchée :

- les formations récentes, quaternaires, composées de matériaux morainiques, alluviaux ou lacustres, qui sont globalement meubles, peu consolidés. À des fins de traitement semi-automatisé, un code de valeur 20 leur est attribué ;
- les formations anciennes, jurassiques et crétacées, composées de marnes et de flysch indurés ou de calcaires massifs. Un code de valeur 10 leur est attribué.

Les premières seront considérées comme sensibles aux glissements alors que les secondes comme insensibles.

### 10.4.2. La carte des pentes

Cette carte est calculée à partir du MNT IGN dont la précision horizontale est de 50 x 50 m, qui permettra d'obtenir une information suffisante pour établir les documents recherchés. Deux seuils de pente ont été fixés, selon la méthodologie décrite ci-dessus, pour définir trois zones de sensibilité potentielle croissante :

- zone 0° - 10°, pour laquelle la probabilité de glissement est considérée comme faible à nulle. Un code de valeur 1 lui est attribué ;
- zone 10° - 20°, pour laquelle la probabilité de glissement est considérée comme moyenne. Un code de valeur 2 lui est attribué ;
- zone > 20°, pour laquelle la probabilité de glissement est considérée comme forte. Un code de valeur 3 lui est attribué.

### 10.4.3. Combinaison des facteurs

La combinaison des facteurs est réalisée à partir de la matrice suivante qui aboutit à la définition de 6 classes de susceptibilité potentielle aux glissements de terrain (11, 12, 13, 21, 22, 23). Un tel nombre de classe n'est pas en rapport avec les matériaux considérés et avec la précision à laquelle il est possible de prétendre au moyen des cartes géologiques et du MNT utilisés (respectivement, échelle du 1/50 000 et

résolution de 50 x 50 m). Il est donc procédé au reclassement de cette information pour aboutir à trois classes plus représentative des phénomènes observés. Ce reclassement est visualisé dans le tableau suivant (Figure 51) au moyen des couleurs jaune, orangé et brun.

Pente \ Lithologie	1	2	3
10	11	12	13
20	21	22	23



Figure 51 - Matrice de définition des classes de susceptibilité.

Le reclassement tel que présenté dans le tableau considère que, quelle que soit la valeur de la pente, les roches dures ne pourront être à l'origine de glissement. Les cases correspondantes sont visualisées en jaune sur le tableau, tout comme la classe des roches meubles dont la pente est inférieure à 10° pour laquelle la probabilité de glissement reste faible. La susceptibilité moyenne est ainsi représentée par la classe des roches meubles dont la pente est intermédiaire et la susceptibilité forte par la classe des roches meubles dont la pente est supérieure à 20°.

La carte finale de la susceptibilité correspond à une interprétation de cette image brute visant à la préciser, en particulier en prenant en compte l'information morphologique plus précise, soit issue des cartes topographiques au 1/25 000 ou des observations de terrain. On notera également que la carte d'aléa issue du PPR de Lourdes a également permis d'affiner ce travail préliminaire.

Le résultat final est présenté sur la Figure 52. Les glissements sont à attendre au niveau des formations meubles à savoir, dans le contexte lourdaise, les alluvions et les moraines. C'est autour du lac de Lourdes, dans la zone du golf, que les glissements les plus étendus sont potentiellement à attendre. Toutefois, il convient de noter la possibilité de mouvements dans la zone du Sanctuaire, du calvaire et du quartier des hôtels localisés autour de la place de la Merlasse.

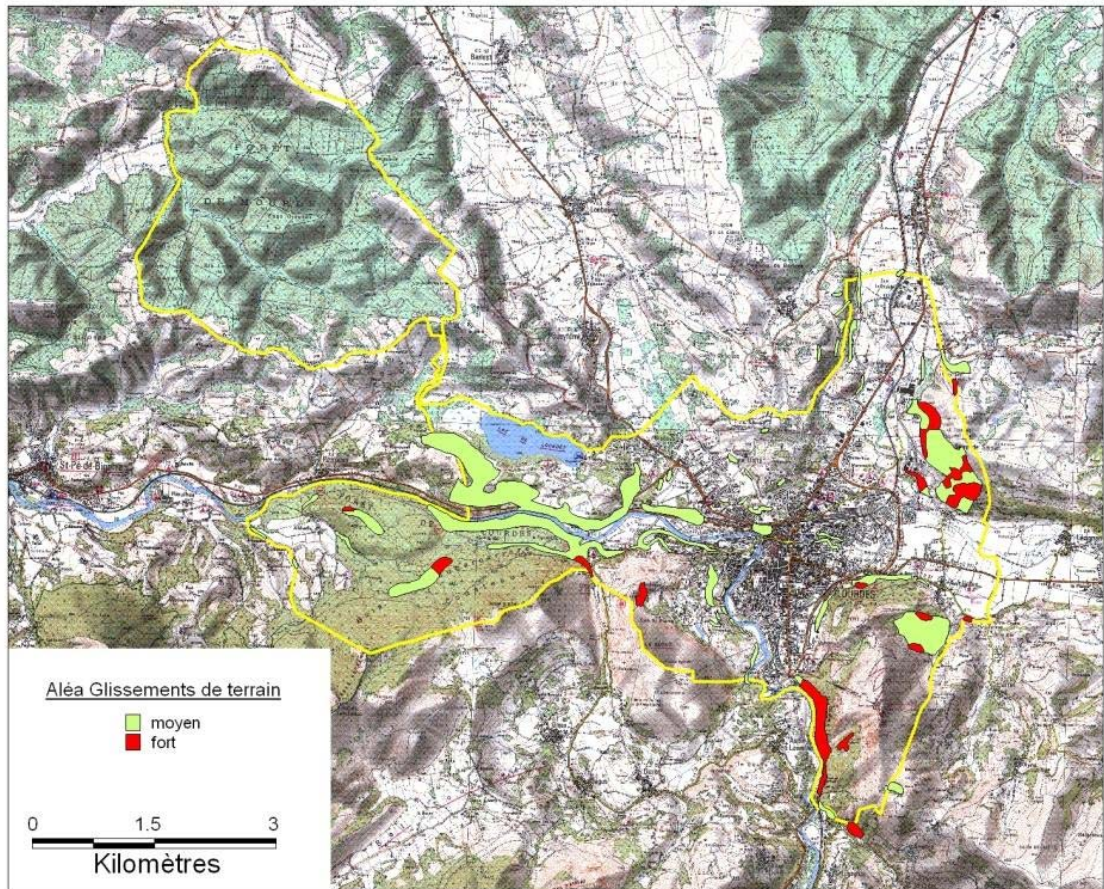


Figure 52 - Aléa glissements de terrain.

## 10.5. LES CHUTES DE BLOCS

Les zones susceptibles d'être affectées par les chutes de blocs sont de deux sortes :

- la première correspond aux zones de départ des blocs, représentées principalement par des fortes pentes et des discontinuités morphologiques (arêtes rocheuses, escarpements et falaises, etc.). De telles morphologies apparaissent généralement au niveau de roches dures fracturées ;
- la seconde correspond aux zones de propagation des blocs détachés de la première. Leur forme et leur étendue dépend fortement de la morphologie.

### 10.5.1. Les zones de départ

La cartographie de ces zones est réalisée par analyse visuelle des fonds topographiques numériques, à l'échelle du 1/25 000 de l'IGN (Scan 25), en particulier au niveau des roches dures (calcaires par exemple). Zones de fortes pentes, zones d'éboulis, escarpements rocheux matérialisés et barbelures noires ou ocre ont été

numérisées sous forme de polygones qui délimitent ainsi les sites les plus susceptibles d'être affectés de déplacements de blocs. L'étude des photographies aériennes en stéréoscopie de la mission IGN 1646/300 de 1970 a permis de confirmer la plupart des observations de l'analyse des cartes et de préciser certains points qui y restaient peu clairs.

Ce relevé a été fait sur le territoire de la commune mais également à l'extérieur lorsque la morphologie aval des zones de départ laissait supposer un déplacement des blocs détachés vers les limites de la commune. Peut être cité comme exemple démonstratif la zone située à environ 1 km au sud-sud-est du hameau de Abbadie, en limite ouest de la commune : une zone de départ, située sur la commune de Saint-Pé-de-Bigorre, en amont d'une vallée encaissée, peut provoquer une propagation de blocs, classée sur la carte en aléa faible, jusqu'à la commune de Lourdes située en aval.

### **10.5.2. Les zones de propagation**

Sur la base du document précédent, combiné au MNT de l'IGN au pas de 50 m, a été calculée une carte des propagations possibles des blocs à l'aide du logiciel BORA du BRGM. Le principe de calcul de ce logiciel est i) de fixer une quantité d'énergie donnée au départ et d'estimer sa décroissance, en fonction de la morphologie, jusqu'à une valeur 0 pour laquelle le bloc s'arrête et ii) d'évaluer si en un point bas peuvent arriver des blocs de directions variées. On peut ainsi approcher une évaluation de l'aléa.

Le document brut obtenu est une grille qui a été réinterprétée, à l'aide des fonds topographiques scan25 déjà cités, afin d'affiner les résultats des calculs. Compte tenu de la précision du MNT, il est en effet parfois nécessaire de préciser certains contours d'aléa, essentiellement en fonction des limites géologiques, des limites de cours d'eau et des limites de bassins versants.

La carte, finalisée après contrôle terrain (Figure 53) et comparaison au PPR communal, montre que les zones les plus affectées sont situées logiquement dans les zones les plus montagneuses comme sur le territoire du bois de Subercarrère-Cousteau et de la cité Saint-Pierre ou aux alentours du Pic de Ger. Il reste toutefois que des escarpements relativement importants sont localisés jusqu'au centre ville en constituant un danger potentiel de chutes de blocs. Peuvent être citées par exemple :

- au centre ville, les escarpements du Château et, dans une moindre mesure, du Rocher ;
- au Sanctuaire, l'escarpement est-ouest de la Grotte, des bâtiments épiscopaux, du Calvaire et son prolongement nord-sud vers la zone des hôtels (place de la Merlasse) ;
- en périphérie est de la ville, l'escarpement de la cité Ophite et les abords de la RN21.

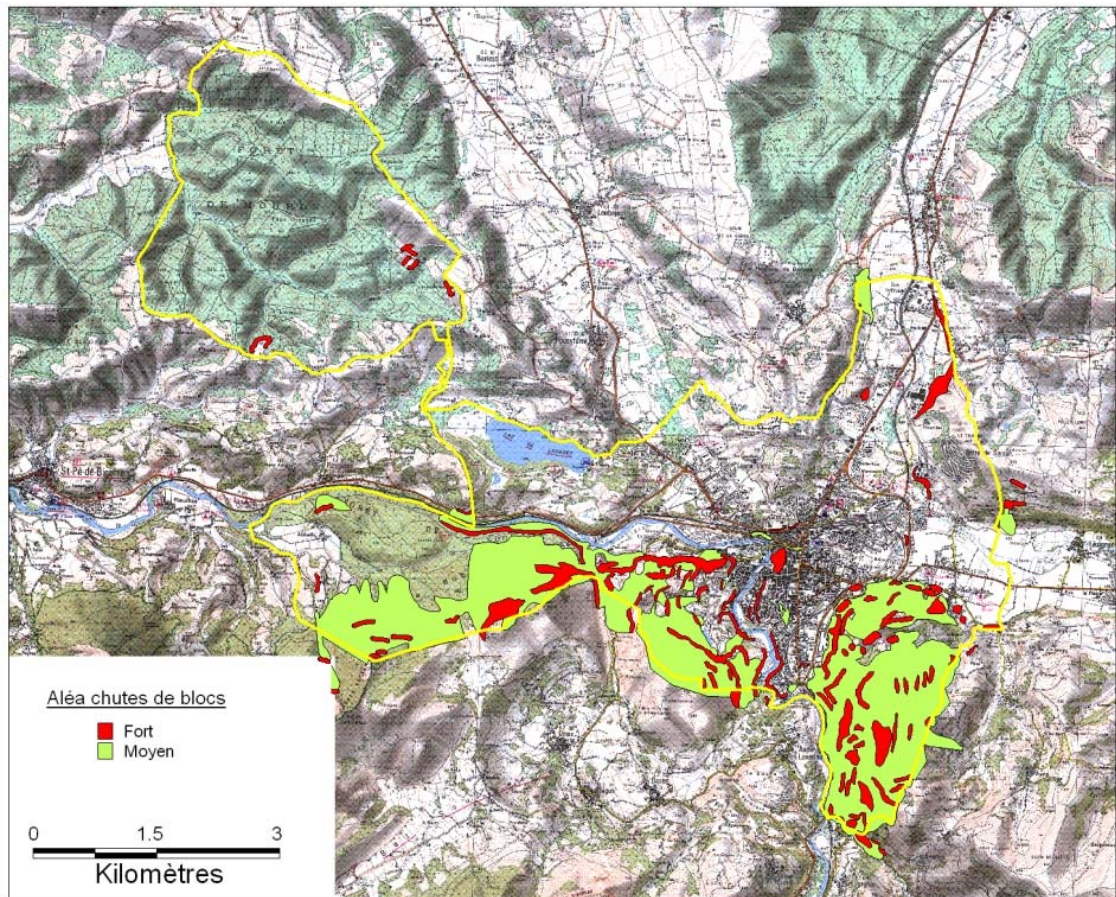


Figure 53 - Aléa chutes de blocs.

La planche 3 et la Figure 54 présentent une carte de synthèse des aléas mouvement de terrain.

La planche 4 et la Figure 55 présentent une carte de synthèse des aléas intégrant les différentes cartes d'aléa précédemment exposées.



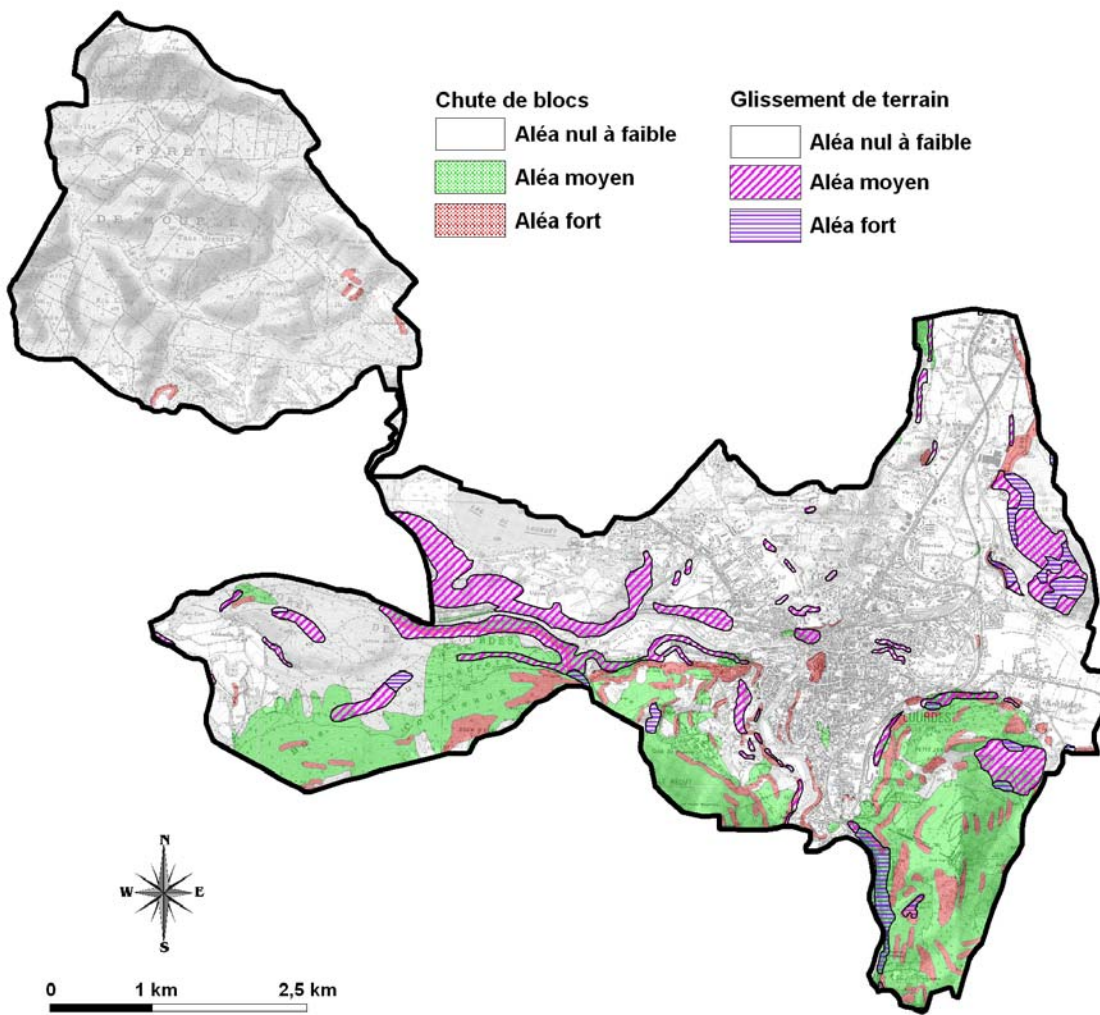


Figure 54 - Aléa mouvement de terrain.

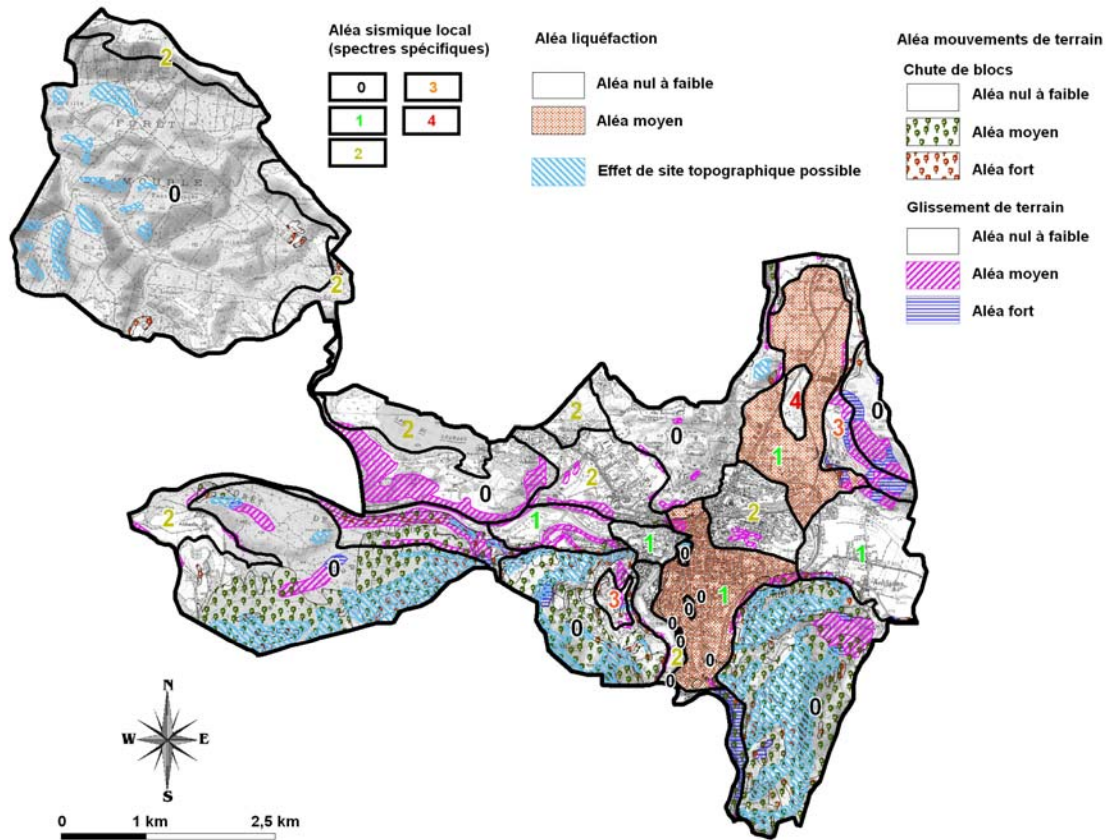


Figure 55 - Carte de synthèse des aléas.



# 11. Scénario de risque sismique

## 11.1. INTRODUCTION

Les scénarios de risque sismique, qui permettent d'évaluer les conséquences dommageables de séismes simulés, sont un outil précieux d'évaluation de risque sismique au niveau de l'existant.

Les trois composants nécessaires pour créer un scénario de risque sismique sont : l'aléa ou le séisme de scénario, qui caractérise l'agression, la valeur des éléments exposés, qui caractérise les enjeux, et 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 :

$$R = A \cdot V \cdot E.$$

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 » ;
- éléments 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 ».

Ce chapitre présente la méthode utilisée pour déterminer la vulnérabilité des structures dans le cadre de ce projet, sa mise en œuvre pour la ville de Lourdes et l'utilisation des résultats de l'analyse de vulnérabilité afin d'estimer le risque sismique. Les enjeux traités dans le cadre de ce rapport sont les bâtiments de classe B (selon l'arrêté du 29 mai 1997). Les bâtiments de classe D dont la liste est jointe dans le Tableau 49 ont fait l'objet d'une étude spécifique menée par le Cete Méditerranée.

Ordre SIG	N° DDE	ID_NUM
22	4	Ateliers Municipaux
6	3	Hôtel de Ville
1	1	Caseme pompiers
5	6	Centrale téléphonique
4	5	Gendarmerie
34	34	Collège Peyramale St Joseph
42	49	CAT L'envol
61	99	Groupe scolaire AUZON
18	19	Hôtel Lecuyer la Source
32	16	Accueil JEAN PAUL II Bureaux de l'hospitalité
31	15	Accueil JEAN PAUL II Chapelle de la réconciliation
36	40	Eglise ND Rosaire
9	22a	Monoprix N° 1 (ancien)
20	32	Collège Primaire Lapacca
60	37	Discothèque la Frégatte
35	14	Basilique supérieure
28	10	Salus Informorum Unitalsi (hôtel + dispensaire)
50	40	Sacré Cœur
25	8a	Lycée la Serre de Sarsan
47	33a	Stade BEGUERE Tribune Nord
48	33b	Stade BEGUERE Tribune Sud
7	30	Palais des Congrès
46	7b	Complexe sportif de la Coustete 2
15	20	Hôtel Christina
23	36	lycée L'Arrouza
30	17	Cinéma Ste Bernadette
10	22b	Monoprix N° 2 (alimentaire)
2	42	Piscine couverte
13	48	Défi Mode (commerce)
17	43	Hôtel Esplanade EDEN

Ordre SIG	N° DDE	ID_NUM
41	25	Cairn Cité St Pierre
29	9	Parking Merlasse 1
37	18	Basilique Pie X
16	24	Hôtel Méditerranée
45	7a	Complexe sportif de la Coustete 2 (gymnase)
21	51	Salle de Trinquet (sport)
26	8b	Collège la Serre de Sarsan
3	29	Salle des fêtes
14	11	LIDL Commerce
27	52	Usine SEB
11	39a	Supermarché Champion
12	12	Cafétéria ISARD (Champion)
8	41	Halles
52	53a	Agop rue du sacré cœur salles de cours
55	31a	Château Fort Pyrénéisme expo A
57	31c	Château Fort Expo temporaire C
52	53b	Agop rue du sacré cœur Internat
54	26	Agop villa la Toue
39	13b	Cana Bethleen et Bethanie
56	31b	Château Fort Tour de garde B
59	38	Notre dame des apôtres
49	21	CMS Le Béroi
58	27	AGOP IME Biscaye
43	44	Las Néous
40	13c	Cana Cana
24	23	Crèche la souris verte
44	35	Le Mas des cimes
51	54	Centre de dialyse
38	13a	Cana NAZARETH
33	50	RPA La Madonne
19	47	RPA La Pastournelle

Tableau 49 - Bâtiments de classe D traités par le Cete Méditerranée.

## 11.2. VULNÉRABILITÉ

La vulnérabilité représente la variation d'une perte en fonction de niveau d'agression sismique. Cette perte peut être fonctionnelle, économique, financière ou structurelle (endommagement de la structure). Le terme « vulnérabilité » est utilisé tout au long de cette étude pour exprimer les différences de comportements des bâtiments aux secousses sismiques. Si deux bâtiments sont soumis exactement à la même agression sismique et que l'un subit plus de dommages, il est dit plus vulnérable (moins résistant) que l'autre.

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique diffèrent par leur complexité, leur précision et leur objectif. Selon l'échelle et l'applicabilité de l'analyse et suivant l'approche (statistique, déterministe ou probabiliste) utilisée, plusieurs méthodes pour estimer et exprimer la vulnérabilité peuvent être choisies : vulnérabilité EMS98, indice

de vulnérabilité, avis d'expert, calculs analytiques simplifiées ou analyse numérique (modélisation). Pour l'évaluation de la vulnérabilité des structures de la ville de Lourdes, la méthode RISK-UE Niveau 1 a été utilisée. Cette méthode développée dans le cadre d'un projet européen est adaptée à la zone d'étude.

L'analyse de la vulnérabilité consiste donc à prédire les différents niveaux de dommages en fonction de différents niveaux d'agression sismique. Pour cela, différents étapes doivent être suivis : modélisation, avis d'expert, indice de vulnérabilité, courbe, matrice, répartition statistique. Ces étapes vont être décrites en détail dans les chapitres suivants.

### **11.2.1. Méthode d'évaluation de la vulnérabilité – Méthode RISK-UE**

#### **11.2.1.1. Estimation de l'indice de vulnérabilité**

Le projet RISK-UE propose une méthode de « Niveau 1 » qui exprime la vulnérabilité par le biais d'une Matrice de Probabilité des Dommages (DPM). Celle-ci résulte d'une corrélation statistique entre l'intensité macrosismique et le dommage apparent, décrit en termes de degré de dommage. Cette méthode de « Niveau 1 » est dérivée de L'Echelle Macrosismique Européenne (EMS) qui, comme celle-ci, utilise 5 degrés de dommages.

Cette méthode est une approche statistique et empirique de la vulnérabilité, car elle est basée sur la vulnérabilité observée, qui découle de l'analyse de l'évaluation des dommages après des tremblements de terre réels de différentes intensités.

#### **11.2.1.2. Classes et indices de vulnérabilité de RISK-UE**

Le projet RISK-UE a élaboré une matrice des typologies des bâtiments (BTM-Building Typologie Matrix) qui tiennent compte des caractéristiques des structures des bâtis les plus courantes existantes dans les pays participants à ce projet. Elle comporte 23 principales classes de bâti qui sont présentées dans le Tableau 50.

Les valeurs données dans le Tableau 50 représentent :

- la valeur la plus probable de l'indice de vulnérabilité ( $V_i^*$ ) ;
- les valeurs limites de la gamme plausible de l'indice de vulnérabilité ( $V_i^-$ ,  $V_i^+$ ) ;
- les limites supérieure et inférieure des valeurs possibles de l'indice de vulnérabilité ( $V_i^{\min}$ ,  $V_i^{\max}$ ).

Typologie	Description	Valeurs représentatives $V_i$				
		$V_i^{\min}$	$V_i^-$	$V_i^+$	$V_i^+$	$V_i^{\max}$
<i>M1</i>	Murs porteurs en maçonnerie de pierres composées de :					
<i>M1.1</i>	Moellons	0,62	0,81	0,873	0,98	1,02
<i>M1.2</i>	Pierres appareillées	0,46	0,65	0,74	0,83	1,02
<i>M1.3</i>	Pierres de taille	0,3	0,49	0,616	0,793	0,86
<i>M2</i>	Adobe	0,62	0,687	0,84	0,98	1,02
<i>M3</i>	Murs porteurs en maçonnerie non armée:					
<i>M3.1</i>	Plancher en bois	0,46	0,65	0,74	0,83	1,02
<i>M3.2</i>	Voûtes en maçonnerie	0,46	0,65	0,776	0,953	1,02
<i>M3.3</i>	Planchers avec poutrelles métalliques et maçonnerie	0,46	0,527	0,704	0,83	1,02
<i>M3.4</i>	Plancher en béton armé	0,3	0,49	0,616	0,793	0,86
<i>M4</i>	Murs porteurs en maçonnerie armée ou confinée	0,14	0,33	0,451	0,633	0,7
<i>M5</i>	Constructions en maçonnerie renforcées dans leur ensemble	0,3	0,49	0,694	0,953	1,02
<i>RC1</i>	Système poteaux/poutres	-0,02	0,047	0,442	0,8	1,02
<i>RC2</i>	Murs de refend en béton	-0,02	0,047	0,386	0,67	0,86
<i>RC3.1</i>	Système poteaux/poutres avec mur de remplissage en maçonnerie non armée Structures régulières	-0,02	0,007	0,402	0,76	0,98
<i>RC3.2</i>	Système poteaux/poutres avec mur de remplissage en maçonnerie non armée Structures irrégulières (i.e. système porteur irrégulier, remplissages irréguliers, niveau souple)	0,06	0,127	0,522	0,88	1,02
<i>RC4</i>	Structure mixte en béton armé (portiques et murs en béton)	-0,02	0,047	0,386	0,67	0,86
<i>RC5</i>	Murs en béton préfabriqué	0,14	0,207	0,384	0,51	0,7
<i>RC6</i>	Structure en béton préfabriqué avec murs de refend en béton	0,3	0,367	0,544	0,67	0,86
<i>S1</i>	Système poteaux/poutres en acier	-0,02	0,467	0,363	0,64	0,86
<i>S2</i>	Structure en acier contreventé	-0,02	0,467	0,287	0,48	0,7
<i>S3</i>	Système poteaux/poutres en acier avec mur de remplissage en maçonnerie non armée	0,14	0,33	0,484	0,64	0,86
<i>S4</i>	Système poteaux/poutres en acier avec mur de refend béton coulés en place	-0,02	0,047	0,224	0,35	0,54
<i>S5</i>	Système de composant acier et béton armé	-0,02	0,257	0,402	0,72	1,02
<i>W</i>	Structure en bois	0,14	0,207	0,447	0,64	0,86

Tableau 50 - Typologies définies par la BTM (Building Typology Matrix) RISK-UE.

### 11.2.1.3. Identification typologique directe et indirecte

Quand le type d'un bâtiment est identifiée dans la matrice de typologie des bâtiments (BTM), les valeurs de l'indice de vulnérabilité ( $V_i^{\min}$ ,  $V_i^-$ ,  $V_i^+$ ,  $V_i^{\max}$ ) sont attribuées selon le Tableau 50. Si les données ne sont pas suffisantes pour une identification directe en termes de typologie, il peut être utile de définir des catégories spécifiques basées sur l'expérience et la connaissance de la construction.

### 11.2.1.4. Facteur de vulnérabilité régional $\Delta V_R$

Le facteur de la vulnérabilité régional  $\Delta V_R$  est introduit pour prendre en considération le caractère particulier de certains bâtiments à l'échelle régionale. Ce facteur modifie l'indice de vulnérabilité  $V_i^+$  sur la base de l'opinion d'un expert ou sur la prise en compte d'une vulnérabilité déjà constatée dans la région lors d'un séisme. Sur la commune de Lourdes la valeur du facteur de la vulnérabilité régional  $\Delta V_R$  est fixée à zéro.

### 11.2.1.5. Facteurs aggravants $\Delta V_M$

Il existe différents facteurs de nature géométrique ou structurelle qui aggravent le comportement dynamique des bâtiments lors d'un tremblement de terre. Ils sont pris en compte par la méthode « Niveau 1 » de RISK-UE en ajoutant (facteur aggravant) ou en retranchant (facteur favorable) un facteur à la valeur d'indice de vulnérabilité  $V_i^+$  du Tableau 50, afin d'obtenir la valeur de l'indice qui va caractériser la structure. Les valeurs des facteurs aggravants sont présentées dans le Tableau 51 pour la construction en béton et le Tableau 52 pour le bâti en maçonnerie.

Facteurs de vulnérabilité pour les bâtiments en béton	Niveau de code		
	Pre ou bas	Code Moyen	Code-réglées
Le niveau de code	+0.16	0	-0.16
Etat d'entretien	+0.04	+0.02	0
Nb d'étages : Bas (1, 2)	-0.04	-0.04	-0.04
Moyen (3, 4 ou 5)	0	0	0
Haut (6 ou plus)	+0.08	+0.06	+0.04
Irrégularités en plan : forme	+0.04	+0.02	0
torsion	+0.02	+0.01	0
Irrégularités en élévation	+0.04	+0.02	0
Poteaux courts	+0.02	+0.01	0
Fenêtres en arc	+0.04	+0.02	0
Interaction entre bâtiments (joints asismique insuffisants)	+0.04	0	0
Fondations : Poutres	-0.04	0	0
Réseau de poutres	0	0	0
Isolées	+0.04	0	0
Morphologie du sol: Falaise	+0.02	+0.02	+0.02
Pente	+0.04	+0.04	+0.04

Tableau 51 - Facteurs aggravants pour les bâtiments en béton.



Facteurs de vulnérabilité pour les bâtiments en maçonnerie	Paramètres	
Etat d'entretien	B = bon My = moyen M = mauvais	-0,04 0 +0.04
Nb d'étages	Bas (1 ou 2)	-0,02
	Moyen (3, 4 ou 5)	+0.02
	Haut (6 ou plus)	+0.06
Système structural	Epaisseur des murs Distance entre les murs Connections entre les murs Connections horizontal structure-murs	-0.04 ÷ +0.04
	Transparence - démolition	+0.04
Irrégularités en plan		+0.04
Irrégularités en élévation		+0.02
Etages ajoutés		+0.04
Irrégularité en toiture	Connexions, plus lourd	+0.04
Interventions de consolidations		-0.08 ÷
		+0.08
Dispositifs asismiques	Balcons, cheminées	
Position dans l'îlot	A = angle	+0.04
	M = milieu	-0.04
	T = tête d'îlot	+0.06
Interaction entre bâtiments : élévation	Différence de hauteur/voisin	+0.04
Fondation	Différents niveaux	+0.04
Morphologie du sol	Falaise	+0.04
	Pente	+0.02

Tableau 52 - Facteurs aggravants pour les bâtiments en maçonnerie.

### 11.2.1.6. Indice de vulnérabilité total

La valeur totale de l'indice de vulnérabilité est calculée de la manière suivante:

$$V_i^{\text{total}} = V_i + \Delta V_R + \Delta V_M \quad (1.1)$$

L'indice de vulnérabilité  $V_i^{\text{total}}$  est compris entre 0 (bâti non vulnérable) et 1 (bâti très vulnérable).

### 11.2.1.7. Degré moyen de dommage

Le degré moyen de dommage  $\mu_D$  est estimé, à partir de l'indice de vulnérabilité ( $V_i$ ), et de l'intensité sismique ( $I$ ), selon l'équation suivante :

$$\mu_D = 2.5 \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I + 6.25 V_i - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad (1.2)$$

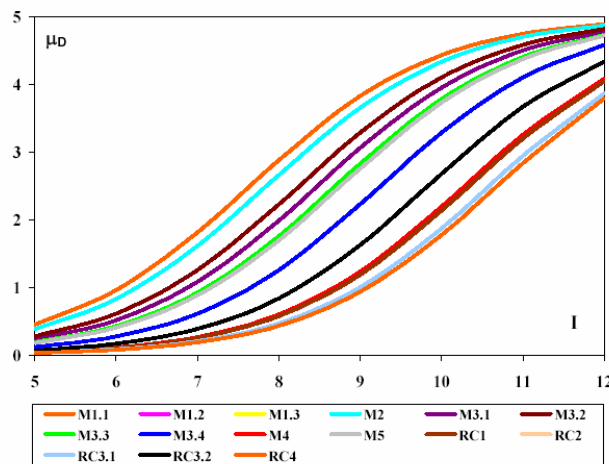


Figure 56 - Courbes de vulnérabilité.

La Figure 56 présente les courbes de vulnérabilité pour les typologies les plus courantes de la BTM de RISK-UE. Ces courbes sont calculées en utilisant l'équation 1.2 et relient l'agression sismique, exprimée en terme d'intensité macrosismique, à un indice de dommage moyen  $\mu_D$ , qui permettra de définir la distribution des probabilités correspondant aux différents degrés de dommage.

### 11.2.1.8. Répartition des dommages

La distribution des dommages se fait par l'intermédiaire d'une loi de probabilité dont les paramètres ont été calés d'après des observations réelles après différents séismes. La distribution de dommages est calculée en utilisant la loi « bêta ».

$$\text{PDF: } p_\beta(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(q)\Gamma(t-q)} \frac{(x-a)^{q-1}(b-x)^{t-q-1}}{(b-a)^{t-1}} \quad a \leq x < b \quad (1.3)$$

$$\text{CDF: } P_\beta(x) = \int_a^x p_\beta(\varepsilon) d\varepsilon \quad (1.4)$$

$$q = t(0.007\mu_D^3 - 0.052\mu_D^2 + 0.2875\mu_D) \quad (1.5)$$

Le paramètre  $t$  caractérise la dispersion de la distribution; si  $t=8$ , la distribution bêta s'approche de la distribution binomiale. Nous avons utilisé les valeurs de  $a$  et de  $b$  recommandées par Lagomarsino (Lagomarsino *et al.*, 2002), à savoir  $a = 0$  et  $b = 6$ .

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

$$p_k = P_\beta(k+1) - P_\beta(k) \quad (1.6)$$

Les courbes de fragilité, qui définissent la probabilité que le dommage atteint ou dépasse un niveau donné, sont issues de la probabilité cumulée de la distribution bêta selon l'équation (2.7):

$$P(D \geq D_k) = 1 - P_\beta(k) \quad (1.7)$$

### 11.2.2. Adaptation de la méthode pour la zone d'étude

La mise en œuvre de la méthode d'analyse de la vulnérabilité, décrite au chapitre précédant, demande un travail préalable d'acquisition, de traitement et de mise en forme des données brutes.

#### 11.2.2.1. Traitement des données brutes

Les données brutes qu'on utilise dans le cadre de ce projet sont les orthophotos (© IGN) et les contours IRIS INSEE de la commune de Lourdes. Les orthophotos comme les contours INSEE ont été prêtées par la ville de Lourdes pour la réalisation de cette étude. Les photos aériennes permettent d'apprécier le tissu (densité, homogénéité ou hétérogénéité) de l'occupation des sols du point de vue des bâtiments existants.

La Figure 57 présente les orthophotos de la zone d'étude.



Figure 57 - Orthophotos de la région de Lourdes.

A l'aide d'un outil spécifique, développé par le BRGM spécialement pour accomplir cette tâche dans un environnement MAP-INFO, on divise la carte de la région de Lourdes en zones de bâti homogènes. Ce zonage des orthophotos, consiste à délimiter des secteurs où l'on considère qu'il y a :

- un seul type de bâtiment ou
- plusieurs types mais répartis d'une manière homogène, telle qu'on puisse évaluer la proportion de chaque type.

Dès qu'un secteur est délimité, on évalue la densité des constructions de chacune de ces zones. Pour établir le nombre des logements une confrontation entre les données IRIS INSEE concernant les logements et la densité évaluée dans les zones est réalisée.

La Figure 58 montre la zone d'étude partagée en polygones de bâti homogène, c'est-à-dire, ayant approximativement la même structure de résistance, la même hauteur et le même âge.

Une fois cette délimitation faite, les polygones sont classés dans les types d'occupation des sols suivants: LOT (lotissements), ISO (habitat isolé), CV (centre ville), CH (centre historique), COL (habitat collectif). Dans le cadre de ce rapport on dénomme

lotissements (LOT), les zones ayant une densité assez importante de maisons individuelles, tandis que les zones des habitats isolés (ISO) sont beaucoup moins denses. Un lotissement n'est pas forcément constitué de maisons identiques. La Figure 59 présente la classification des polygones en fonction de leur typologie.

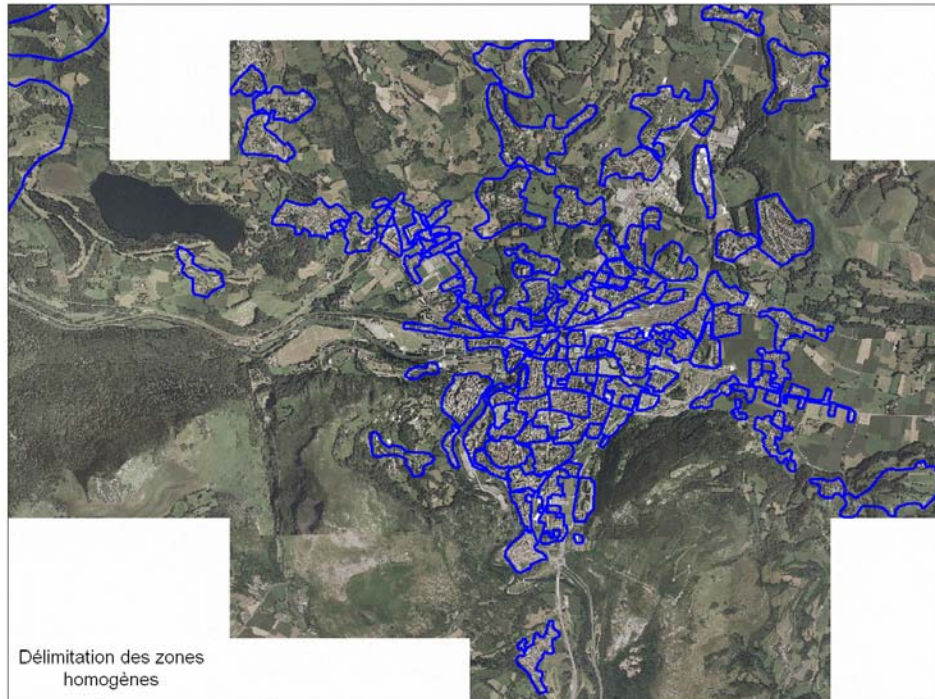


Figure 58 - Délimitation de zones homogènes.

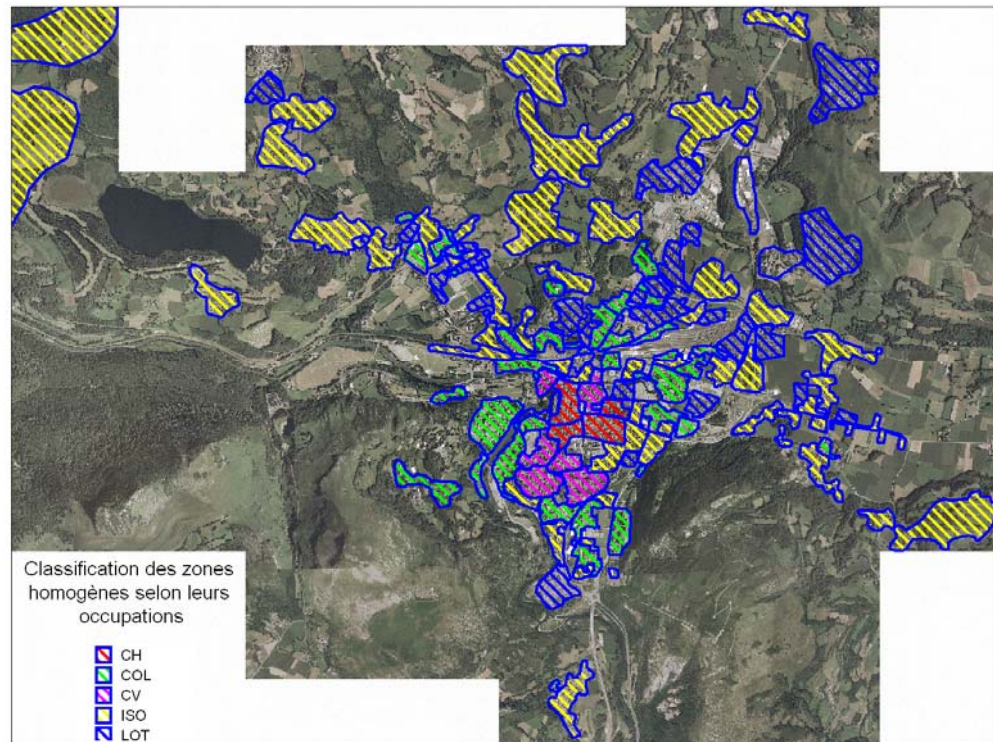


Figure 59 - Classification des zones homogènes selon leurs typologie d'occupation des sols.

Certaines zones homogènes sont facilement identifiables sur les orthophotos, mais pour d'autres, dont le tissu est complexe, il est nécessaire d'aller sur le terrain pour pouvoir les classer ou préciser leurs limites. Des exemples de zones homogènes sont présentés dans les Figure 60 et Figure 61.



Figure 60 - Zones homogènes des bâtiments représentant un lotissement (LOT).



Figure 61 - Zones homogènes des bâtiments représentant des habitats collectifs (COL).



chaque numéro de bâtiment du tableau correspond un point unique dans la table MapInfo.

Les pointages sont utilisés de deux manières distinctes en fonction du type de polygone dans lequel ils ont été faits. Pour les polygones de type LOT et ISO on utilise le pointage pour calculer la valeur moyenne de  $V_i$  pour la zone, tandis que pour les polygones de type CV, CH et COL on les utilise surtout pour mieux se positionner dans la zone et pour avoir une proportion entre l'habitat collectif et l'habitat individuel de la zone.

Les Figure 63 et Figure 64 présentent des pointages des bâtiments dans les zones de centre ville, centre historique et dans des lotissements.



*Figure 63 - Pointage des structures dans les zones CV et CH (gauche).*

*Figure 64 - Pointage des structures dans les zones LOT (droite).*

La démarche utilisée pour calculer la vulnérabilité des bâtiments de la commune de Lourdes est illustrée par les exemples ci-après. Les photos (Figure 65 à Figure 70) présentent différentes zones homogènes qui ont été inspectées pendant la mission qui a eu lieu en début du mois de mai.

**Zone ID58** : Dans la Figure 65 on remarque la zone ID58 qui a été classée, du point de vue occupation, comme étant constituée d'habitats collectifs (COL). À l'intérieur de cette zone les bâtiments ont la même structure en béton armé, approximativement le même nombre d'étages et ont probablement été construits à la même période. Dans l'une des photos on voit un détail de la structure du bâtiment qui nous aide à mieux comprendre le système constructif de ces blocs. On considère que ces bâtiments ayant le même système structural se comportent de manière identique, et donc, un seul indice de vulnérabilité  $V_i$  va caractériser 100 % des bâtiments de cette zone.





Figure 65 - Zone homogène des habitats collectifs (ID58) et photos des bâtiments appartenent à cette zone.

**Zone ID31 :** La Figure 66 présente la zone homogène ID31. En travaillant sur les orthophotos cette zone a été classée, comme représentative d'un habitat collectif. Sur le terrain on a pu constater qu'en plus des bâtiments collectifs en béton il existe des maisons individuelles construites en maçonnerie. 90 % des bâtiments de la zone vont être caractérisés par un indice de vulnérabilité  $V_i$  qui correspond aux structures en béton et 10% de bâtiments par un  $V_i$  qui correspond aux structures en maçonnerie.

**Zone ID 78 et ID 26 :** Les Figure 67 et Figure 68 présentent deux types de lotissements différents : un dans lequel toutes les maisons sont similaires et un autre dans lequel les maisons diffèrent de l'une à l'autre d'un point de vue structural et facteurs aggravants. Dans le premier cas, il suffit de calculer l'indice de vulnérabilité pour une seule maison et de l'affecter à toutes les structures de la zone, tandis que, pour le deuxième cas, il est nécessaire de faire pointage d'un nombre représentatif de constructions, puis de calculer l'indice moyen de vulnérabilité qui va caractériser la zone.



Figure 66 - Zone homogène des habitats collectifs (ID31) et photos des bâtiments appartenent à cette zone.



Figure 67- Zone ID78 (LOT) et photos des bâtiments appartenant à cette zone.



Figure 68 - Zone ID26 (LOT) et photos des bâtiments appartenent à cette zone.

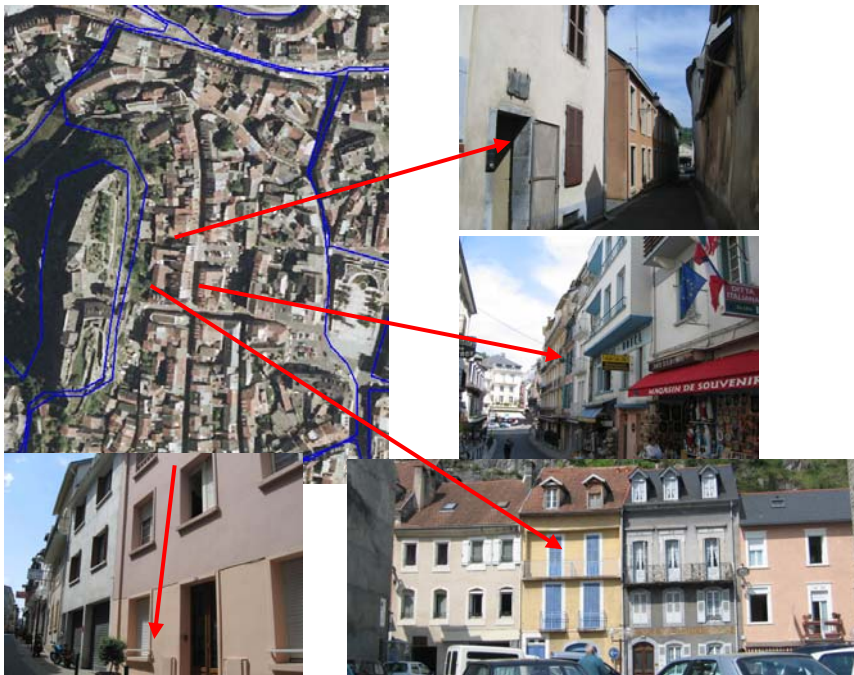


Figure 69 - Zone ID42 (CH) et photos des bâtiments appartenent à cette zone.

**Zone ID42** : La zone ID42 (Figure 69) se trouve dans le centre historique de la ville de Lourdes. Pour les zones de centre ville ou du centre historique, il est difficile d'établir le pourcentage exact des différents types de bâtiments et de leur époque de construction, car certains bâtiments ont été rénovés, d'autres renforcés et d'autres récemment reconstruits. Dans ces conditions, pour chacune de ces zones, les pourcentages de chaque type de structure et de leurs indices de vulnérabilité sont estimés. Cette estimation repose sur une évaluation qualitative effectuée lors d'un cheminement dans les rues du quartier.

**Zone ID 41** : Lourdes étant une ville très touristique, un grand nombre des bâtiments dans les zones du centre ville sont des hôtels. Cette particularité de la ville, n'a pas pu être identifiée lors de la délimitation des polygones homogènes sur les orthophotos, et les zones des hôtels ont été interprétées et classées comme étant soit des centres historiques (CH), soit des habitats collectifs (COL). Sur le terrain ces zones ont été identifiées comme zones hôtelières, n'appartenant pas aux bâtiments de classe B, qui font l'objet de cette étude. La Figure 70 nous montre la plus grande zone des hôtels (ID41) et quelques bâtiments représentatifs pour ce polygone.



Figure 70 - Zone ID41 (hôtels) et quelques bâtiments représentatifs.

### 11.2.3. Résultats de l'analyse de la vulnérabilité

Les résultats de l'analyse de la vulnérabilité consistent à donner, pour chaque polygone ou zone homogène d'occupation des sols, la répartition des types de structures et les facteurs aggravants des bâtiments. A partir des valeurs des Tableau 50, et Tableau 52, des informations recueillies dans les différentes zones et des pointages faits sur le terrain, on détermine pour chaque type présent dans la zone un indice de vulnérabilité unique,  $V_i$ .

De manière générale, on peut dire que les lotissements (LOT) et les zones d'habitat isolé (ISO) sont caractérisés par des bâtiments à 1 ou 2 niveaux ayant des murs porteurs en maçonnerie.

Les zones d'habitat collectif (COL) contiennent des structures en voiles en béton, des portiques en béton avec des remplissages en maçonnerie ou, moins souvent, des structures mixtes en béton armé (portiques et murs en béton). Certains de ces bâtiments collectifs peuvent présenter une structure irrégulière, des remplissages irréguliers et/ou un niveau souple au rez-de-chaussée.

Les zones du centre ville (CV) et du centre historique (CH) sont hétérogènes en ce qui concerne le système structural des bâtiments et leurs âges de construction. On trouve des maisons de 3-4 niveaux ayant des murs porteurs en maçonnerie composés de moellons ou de pierres appareillées, des maisons en parpaings et des petits habitats collectifs ou des hôtels en béton. Une grande majorité de ces structures a été rénovée et consolidée.

La Figure 71 illustre des constructions caractéristiques pour les différentes zones de l'étude.

La majorité des zones a fait l'objet d'une visite de terrain. Le pointage le long d'itinéraire n'est pas mis en œuvre lorsque :

- ce n'est pas « rentable », c'est-à-dire lorsque une appréciation globale des pourcentages de type est suffisamment efficace et si
- un type d'occupation des sols se répète à l'identique pour plusieurs polygones.

La Figure 72, présente une classification des zones homogènes en fonction de leur niveau d'inspection sur le terrain :

- en vert (43 zones), les polygones dans lesquels des itinéraires ont été réalisés ;
- en rouge (70 zones), les polygones qui ont été visités mais sans faire d'itinéraires ;
- en orange (6 zones), les polygones qui ont été visités mais ne vont pas être utilisés dans les analyses car les bâtiments n'appartiennent pas à la classe B, et ;
- en bleu hachuré (20 zones), les polygones qui n'ont pas été pris en compte dans l'analyse du risque sismique (nombre de bâtiments négligeable sur la commune).



Figure 71 - Structures caractéristiques pour les différentes zones considérées.

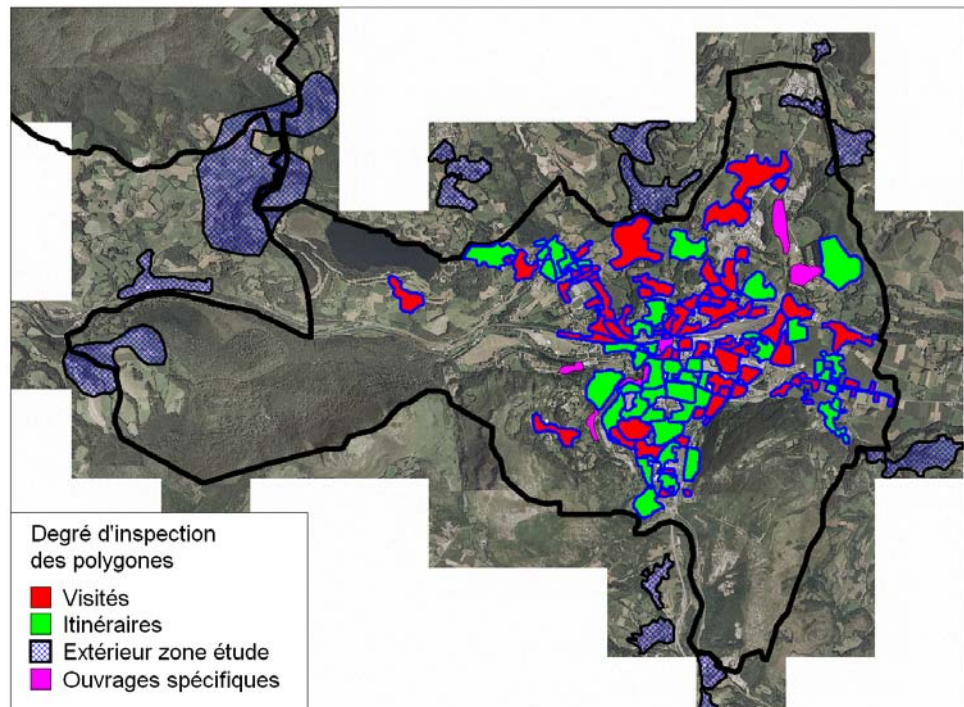


Figure 72 - Classification des zones homogènes en fonction de leur niveau d'inspection sur le terrain.

Le résultat de l'analyse de vulnérabilité qui consiste à déterminer pour chaque polygone homogène les pourcentages des différents types de structure et de leurs facteurs aggravants, est présenté sous forme de deux tableaux.

Le tableau de la Figure 73 présente les polygones pour lesquels des itinéraires ont été réalisés et donc pour lesquels le pourcentage des différents types de bâtiments a été établi sur le terrain.

Le tableau de la Figure 74 présente les résultats pour les polygones dans lesquels n'ont pas été faites des visites détaillées et dont le pourcentage des différents types est déduit à partir d'autres zones qui ont été inspectées.

Ces tableaux vont être transformés dans des fichiers .txt qui vont être utilisés dans les scénarios de risque sismique.

ID	TYPE	Densité	Verif	M1M1M2	M13	M31	M32	M33	RC1	RC2	RC31	RC32	RC4	RC5	M31RC31	M31RC4	Vieale	
1	LOT	22	1	0	0	0	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7	ISO	6	1	10	0	30	30	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8	LOT	18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	
23	COL	10	1	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	
26	LOT	16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	
30	ISO	14	1	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
31	COL	8	1	0	0	5	10	0	0	0	0	0	0	0	85	0	0	
40	LOT	18	1	10	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
41	OH	8	1	0	0	0	15	0	0	15	0	0	0	0	40	30	0	
42	OH	18	1	55	25	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43	COL	20	1	15	10	0	25	0	0	0	20	0	0	0	20	10	0	
45	OH	22	1	20	0	15	30	0	0	0	0	0	0	0	30	5	0	
49	CV	40	1	50	10	0	20	0	0	0	0	0	0	0	10	10	0	
50	LOT	20	1	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
53	COL	12	1	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	
57	ISO	16	1	10	0	45	45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
58	COL	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	
60	ISO	16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	
61	LOT	12	1	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
62	COL	12	1	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	
64	ISO	24	1	15	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	
65	OH	16	1	30	0	0	65	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	
66	ISO	20	1	5	0	0	75	0	0	0	0	0	0	0	10	10	0	
67	ISO	28	1	40	20	10	20	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
71	COL	12	1	0	0	0	10	0	0	30	10	0	0	0	20	30	0	
72	CV	12	1	20	0	15	45	0	0	0	5	0	0	0	15	0	0	
74	ISO	24	1	20	0	0	60	0	0	10	0	0	0	0	10	0	0	
75	ISO	12	1	0	0	10	80	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
76	COL	24	1	5	0	0	55	0	0	0	0	0	0	0	40	0	0	
78	LOT	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
79	ISO	16	1	0	0	15	75	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
83	COL	16	1	70	0	15	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	LOT	16	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	COL	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	45	50	0
5	LOT	16	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	LOT	50	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	LOT	16	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	ISO	2	0	0	0	0	0	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	
12	ISO	2	0	0	0	0	0	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	LOT	12	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
14	COL	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	45	50	0
15	COL	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	45	50	0
16	LOT	22	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
17	LOT	10	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
18	LOT	18	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19	ISO	16	0	0	0	0	0	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	
20	COL	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	45	50	0
21	COL	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	45	50	0
22	COL	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	45	50	0
24	COL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	45	50	0
25	COL	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	45	50	0
27	ISO	8	0	0	0	0	0	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	
28	LOT	24	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
29	ISO	2	0	0	0	0	0	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	
32	COL	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	45	50	0
33	COL	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	45	50	0
34	ISO	20	0	0	0	0	0	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	
35	COL	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	45	50	0
36	LOT	12	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
37	COL	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	45	50	0
38	ISO	16	0	0	0	0	0	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	
39	COL	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	45	50	0
46	LOT	22	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
47	COL	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	45	50	0

Figure 73 - (gauche) Résultat de l'analyse : vulnérabilité constatée.  
 Figure 74 - (droite) Résultat de l'analyse : vulnérabilité déduite.

La base IRIS de l'INSEE permet de disposer d'un niveau d'information plus fin que celui disponible à l'échelle communale. La commune de Lourdes est ainsi délimitée en 10 niveaux IRIS qui sont intitulés : Centre Mairie, Centre Soum, Ophite Chanteclerc, Centre Gare, Sarsan Anclades, Pic du Ger, Bois de Mourles Foret, Secteur Hôtelier, La Bastide Lannedarré et Monge Saux.

Les dix contours IRIS INSEE donnent des informations concernant la population et le nombre de logements. Pour pouvoir prendre en compte ces informations les zones homogènes d'occupation des sols ont été groupées à l'intérieur des dix contours définis par IRIS INSEE. La Figure 75 présente la couche des contours IRIS INSEE superposée à la couche des polygones homogènes vectorisés à partir des orthophotos.

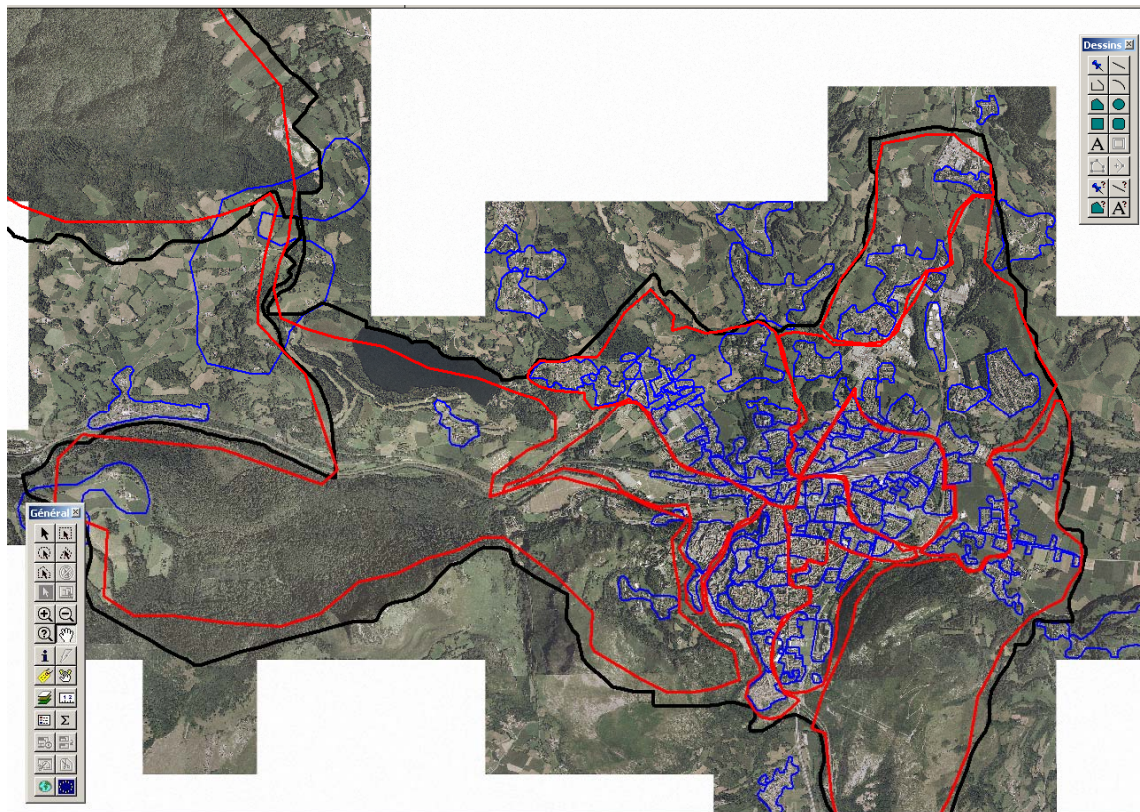


Figure 75 - Carte des contours de la commune de Lourdes : IRIS INSEE en rouge et zones homogènes BRGM en bleu.



## **11.3. SCÉNARIOS SISMIQUES**

### **11.3.1. Logiciel de simulation utilisé pour scénario sismique : Armagedom**

Le logiciel utilisé pour l'analyse de risque sismique de la commune de Lourdes est Armagedom. Armagedom, développé par BRGM, est un outil de simulation des conséquences des phénomènes naturels dangereux qui a pour objectif l'évaluation des dommages provoqués par ces phénomènes sur les éléments exposés.

Les résultats obtenus à l'aide d'Armagedom, vont mettre en évidence :

- une estimation des dégâts au bâti, éléments déterminant dans le dimensionnement et implantation des postes stratégiques de secours ;
- les zones présentant les niveaux de risque les plus importants, en raison de leur forte vulnérabilité et/ou de niveau d'aléa élevé, pour lesquels des actions de réhabilitation/renforcement devraient être engagés de manière prioritaire.

### **11.3.2. Degré de dommages**

La Figure 76 présente la classification des dégâts (D1 à D5) au travers de schémas de bâtiments présentant ces différents degrés de dommages. Pour une meilleure compréhension de la signification de ces différents degrés, pour chaque catégorie (sauf D1, pour laquelle les fissures sont très fines) un cas réel de bâtiment en maçonnerie qui a été endommagé lors des séismes qui ont eu lieu en Italie et Suisse, illustre également chaque degré de dommage (sauf le degré D1, pour lequel les fissures sont très fines). Pour les besoins de l'évaluation, un niveau de dommage nul, D0, a été introduit.



DEGRE 1



DEGRE 2



DEGRE 3

Fissures capillaires  
dans très peu  
de murs



(Grisson Suisse 1991 Vaz)



(Frioul, Italie 1976  
Gemona Udine)



DEGRE 4



DEGRE 5



(Frioul, Italie 1976 Braulins Udine)



(Campanie-Basilicate Italie 1980, Balvano)

Figure 76 - Classification des dégâts : l'Echelle Macrosismique Européenne.

### 11.3.3. Choix et méthodologie de scénario de risque

Le logiciel ARMAGEDOM, à l'aide de ses différents modules (« Phénomène » pour l'aléa et « Vulnérabilité » pour les structures), gère le croisement entre l'aléa et la vulnérabilité des structures afin d'estimer les degrés de dommages des bâtiments, c'est-à-dire le risque sismique des bâtiments de la zone d'étude.

Le module « Vulnérabilité » du logiciel introduit dans les calculs du risque sismique les valeurs des pourcentages de différents types de structures dans chaque polygone (présentées dans les Figure 73 et Figure 74 - Résultat de l'analyse : vulnérabilité constatée et vulnérabilité déduite). Ces valeurs caractérisent l'état des zones homogènes d'occupation des sols et sont déterminées suite au travail de terrain. Les valeurs d'indices de vulnérabilité des structures sont introduites dans ce même module.

Le module « Phénomène » du logiciel ARMAGEDOM intègre l'aléa sismique en intégrant les paramètres de sollicitation sismique au scénario de risque.

Pour la génération de la sollicitation sismique, ARMAGEDOM peut :

- générer des cartes d'accélération en fixant la position de l'épicentre, la profondeur du foyer, la magnitude et une loi d'atténuation ;
- générer des cartes d'accélération constante, ou
- importer des cartes élaborées par des études spécifiques.

Dans le cas spécifique de Lourdes, pour les simulations une carte d'aléa régional a été utilisée, et non un séisme de scénario, l'objet étant d'évaluer le risque sur une base identique pour tous les bâtiments de la zone et non pas d'évaluer les dommages provoqués par un séisme de scénario en particulier. En fixant à 0.2 g une valeur d'accélération constante pour l'ensemble de la commune on est cohérent avec l'analyse de l'aléa sismique réalisée dans le cadre de ce microzonage et le spectre au rocher proposé dans le paragraphe 2.11.

Armagedom va donc être utilisé pour :

- générer une carte d'accélération constante au rocher calée à 0.2 g sur l'ensemble de la commune ;
- la multiplier par le coefficient d'amplification dû à l'effet de site topographique (Chapitre 8) ;
- puis prendre en compte les effets de site lithologiques (Chapitre 7) grâce à la carte du microzonage sismique et un tableau associant les zones de cette carte à un **coefficient d'amplification** du mouvement du sol. Pour tenir compte de la période propre de la majorité des bâtiments de la zone, le facteur d'amplification est obtenu en divisant la valeur de l'accélération du plateau en accélération du spectre de la surface à la valeur correspondante du spectre au rocher.

Après avoir fourni les données - déterminées sur la zone d'étude lors de l'analyse de l'aléa et de la vulnérabilité - dans les modules « Phénomène » et « Vulnérabilité », le logiciel suit les étapes de la méthodologie RISK-UE Niveau 1, en déterminant les degrés de dommages des bâtiments.

Les figures ci-dessous présentent les cartes des accélérations créées avec le logiciel ARMAGEDON, sans tenir compte des effets de site (Figure 77), en tenant compte des effets de site topographiques (Figure 78), en tenant compte des effets de site lithologiques (Figure 79) et en tenant compte des effets de site lithologiques et topographiques (Figure 80). **La carte des accélérations utilisées dans les simulations est celle calculée avec tous les effets de site.**

Plus précisément, les Figure 79 et Figure 80 représentent les accélérations correspondant à l'accélération au rocher (sans effet de site) pondérée d'un facteur d'amplification obtenu en divisant la valeur de l'accélération du plateau du spectre du site par la valeur correspondante du spectre au rocher. Ce ne sont donc pas des accélérations maximales (pga) en surface du sol tenant compte des conditions de site, mais des accélérations de surface pondérées par un facteur traduisant l'amplification dans la gamme de fréquence impactant le comportement des structures. Enfin, l'intensité définie dans la formule du § 11.2.1.7. est déduite de ces accélérations par la relation d'Atkinson et Sonoey (2000) :  $I = 10.18 + 4.35 \log (pga)$ .

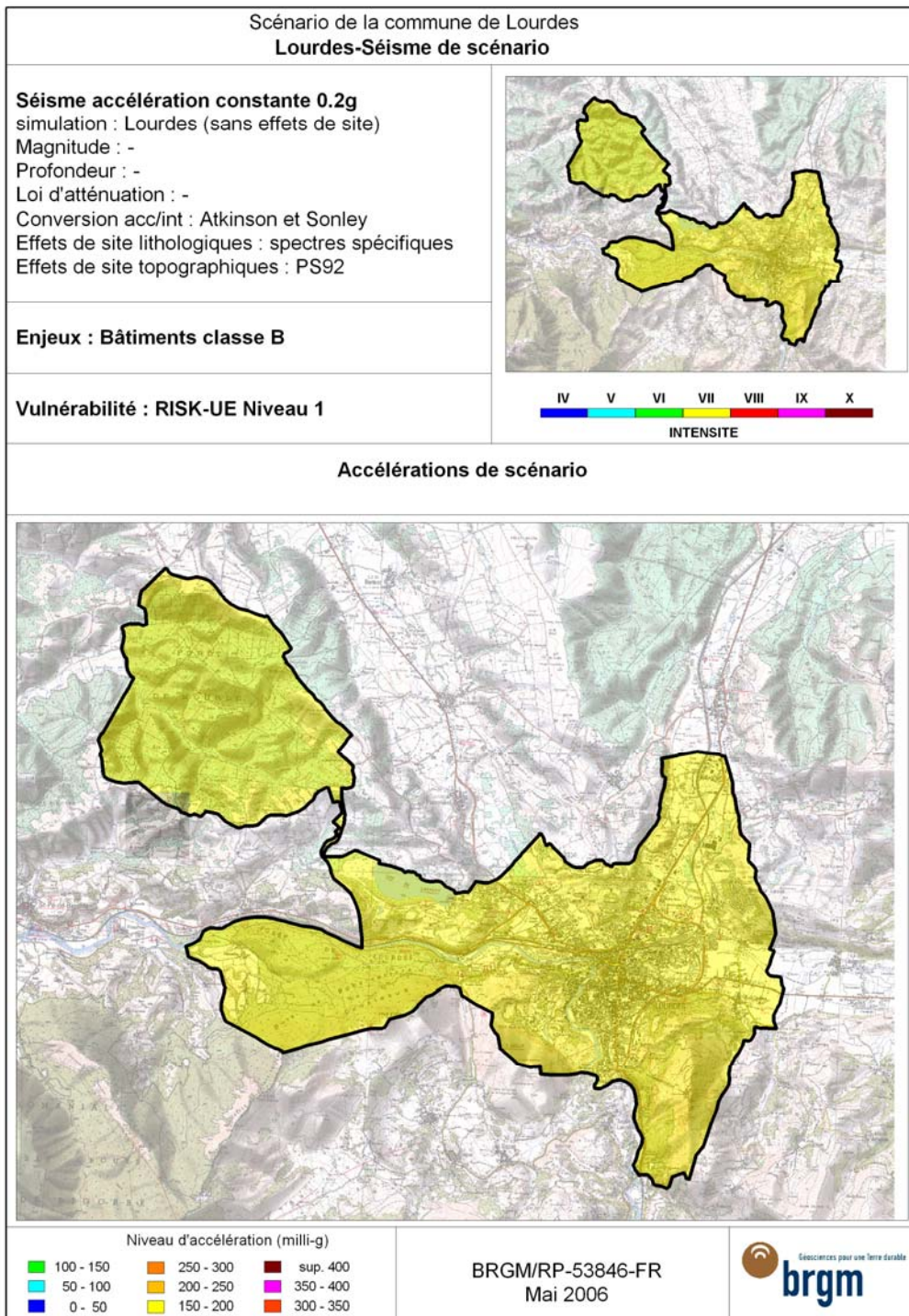


Figure 77 - Carte d'accélération : sans effet de site.

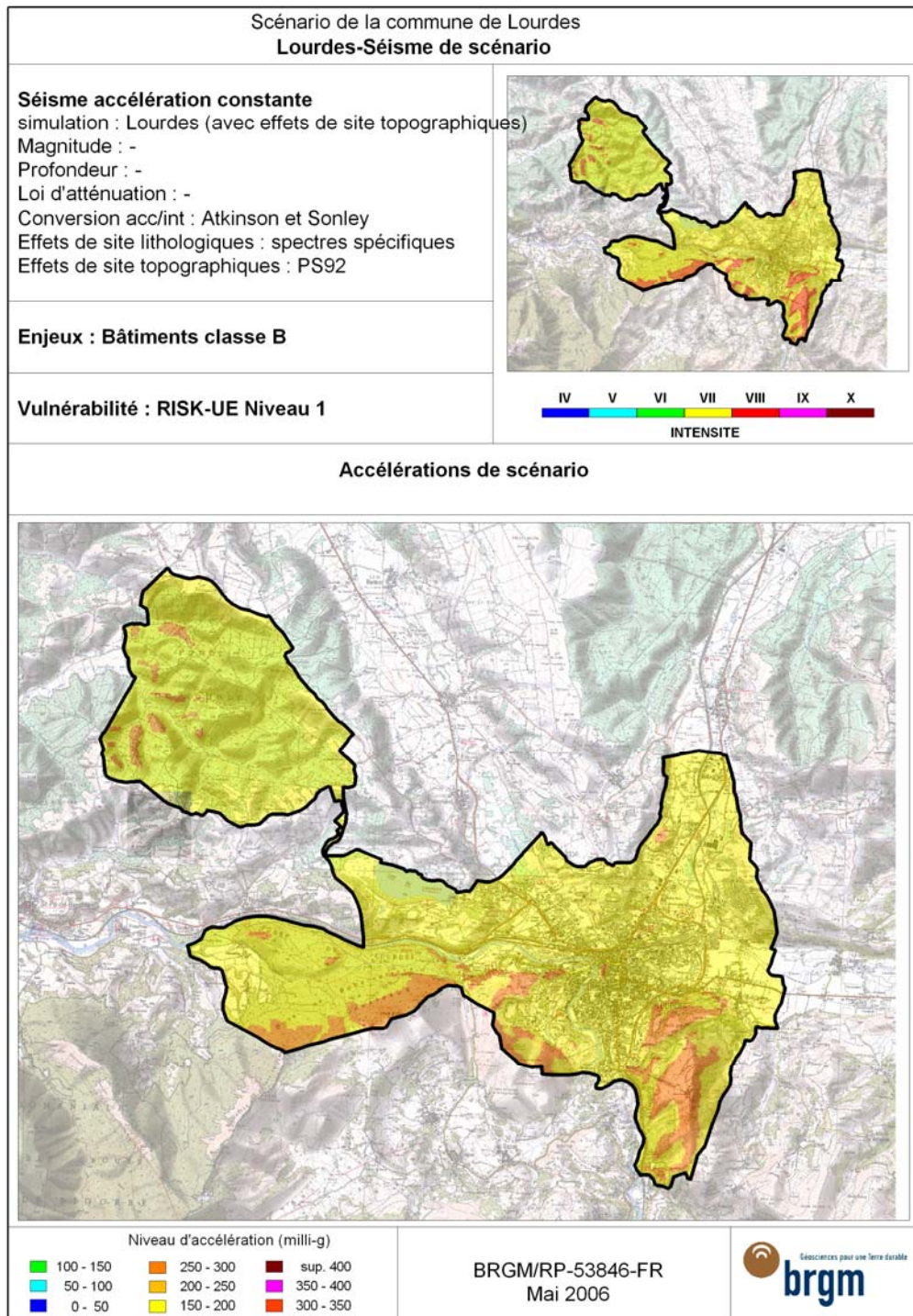


Figure 78 - Carte d'accélération : avec effets de site topographique.

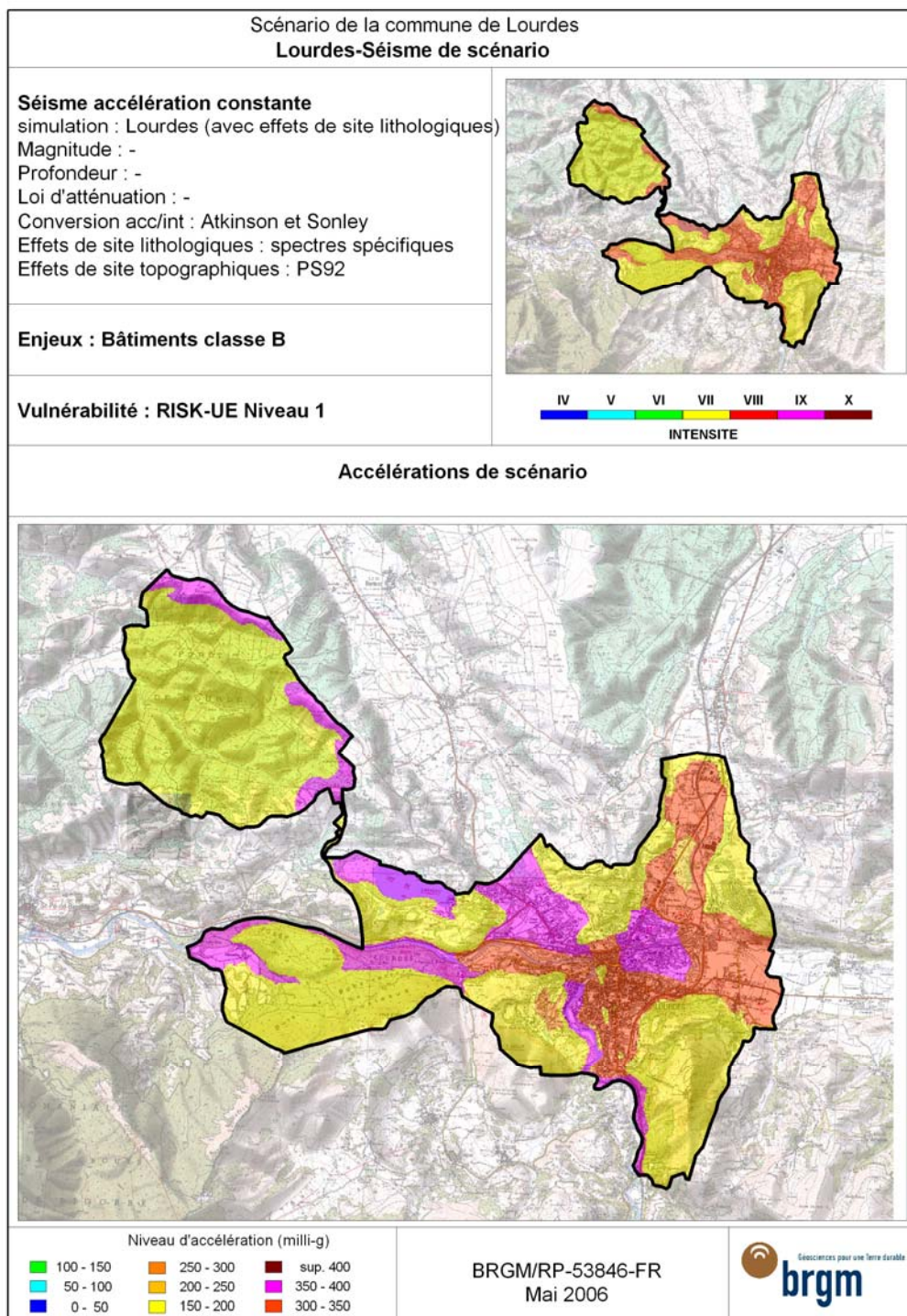


Figure 79 - Carte d'accélération : avec des effets de site lithologique.

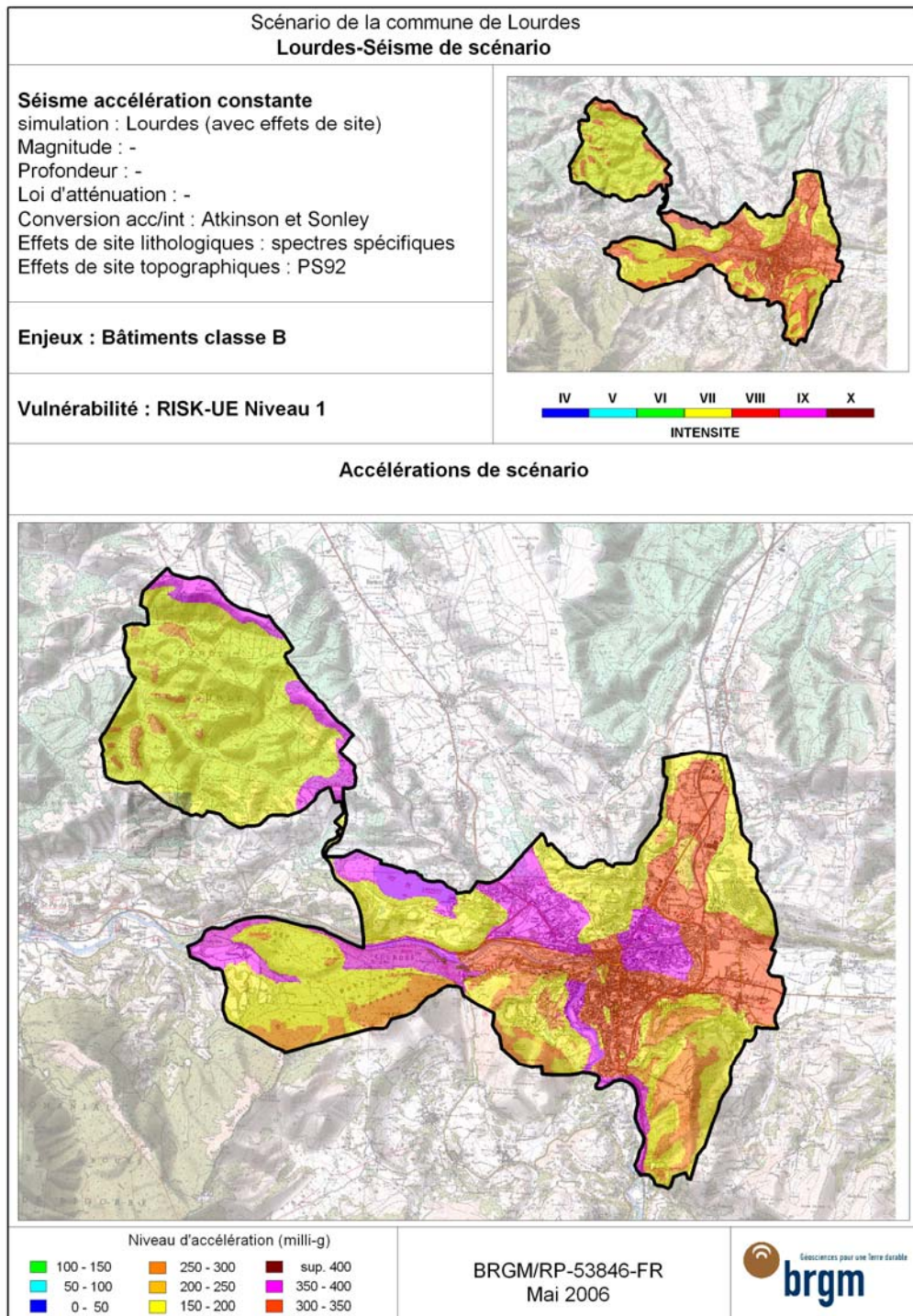


Figure 80 - Carte d'accélérations avec effets de site lithologique et topographique.



### 11.3.4. Résultats des scénarios

Les résultats des calculs d'endommagement faits avec Armagedom peuvent être visualisés par celui-ci (résultats bruts) ou exportés pour être restitués à l'aide des logiciels spécifiques, comme MapInfo ou ArcGis. La Figure 81, ci-dessous, affiche les identifiants de chaque zone homogène. Cette figure aide à mieux interpréter les résultats suivants obtenus lors de la simulation du scénario de risque sismique.

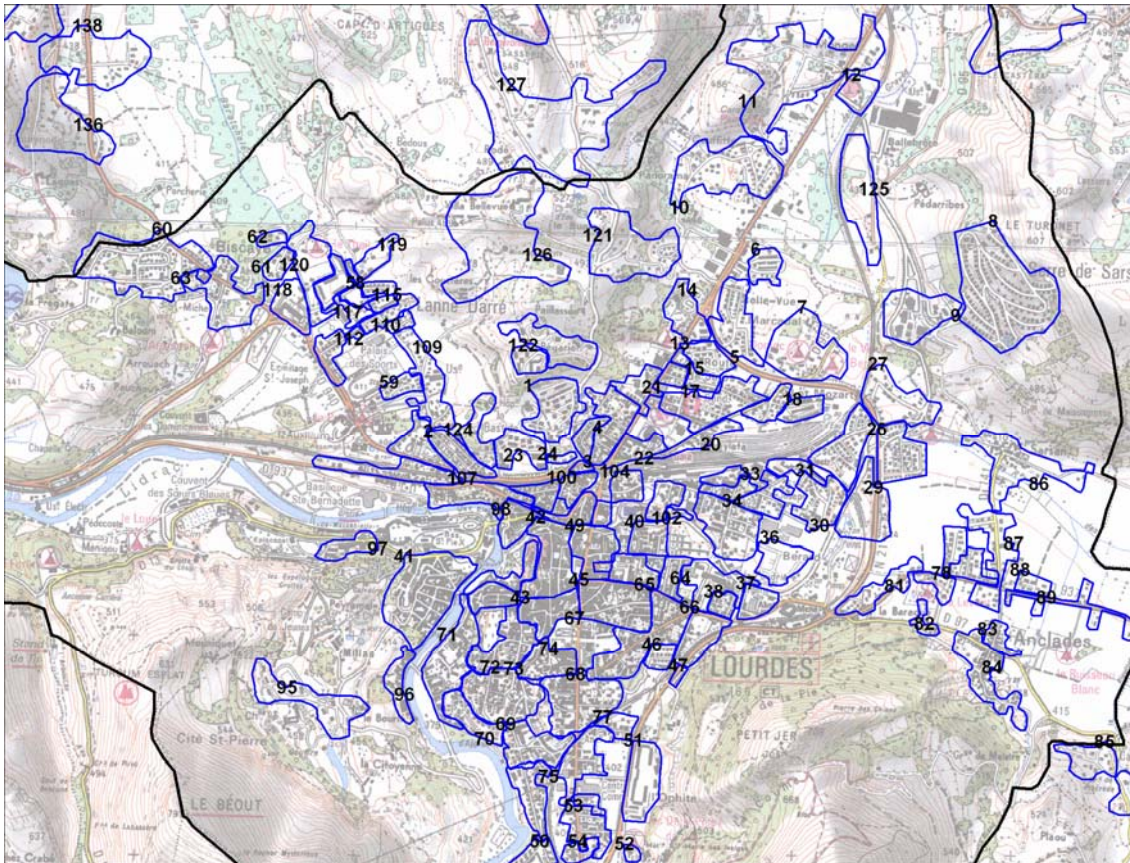


Figure 81 - Identifiants des zones homogènes.

Les restitutions de ces résultats bruts sont de plusieurs types, intégrant :

- la probabilité de se trouver ou de dépasser un certain degré de dommage pour chaque polygone (Figure 82) ;
- le nombre de structures à l'intérieur d'une zone homogène qui se trouvent ou dépassent un certain degré de dommage (Figure 83), ou
- une certaine probabilité que les bâtiments compris dans le polygone se trouvent dans les degrés de dommages affichés dans la légende (Figure 84 et Figure 85).

Le Tableau 53 créé par le logiciel Armagedom présente les données correspondant aux modes de restitution des figures 82, 83, 84 et 85.

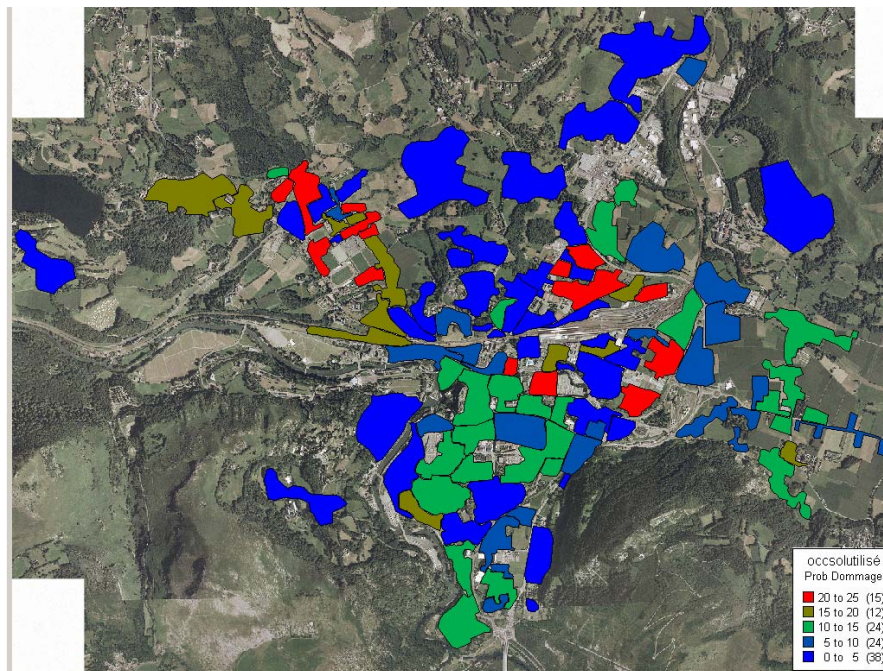


Figure 82 - Pourcentage de bâtiments atteignant ou dépassant le degré de dommage D4 pour chaque polygone.

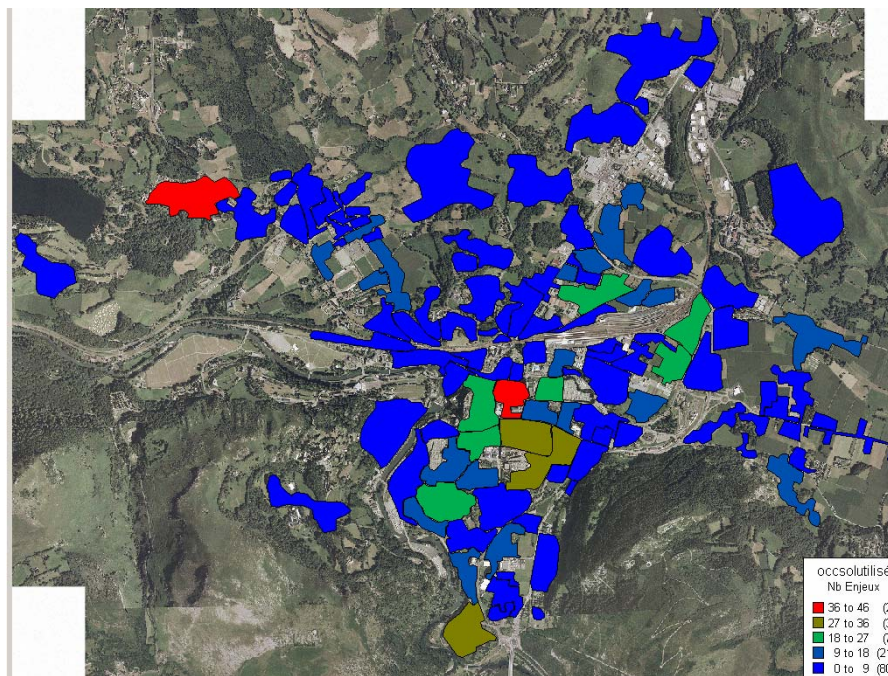


Figure 83 - Nombre de bâtiments atteignant ou dépassant le degré de dommage D4 pour chaque polygone.

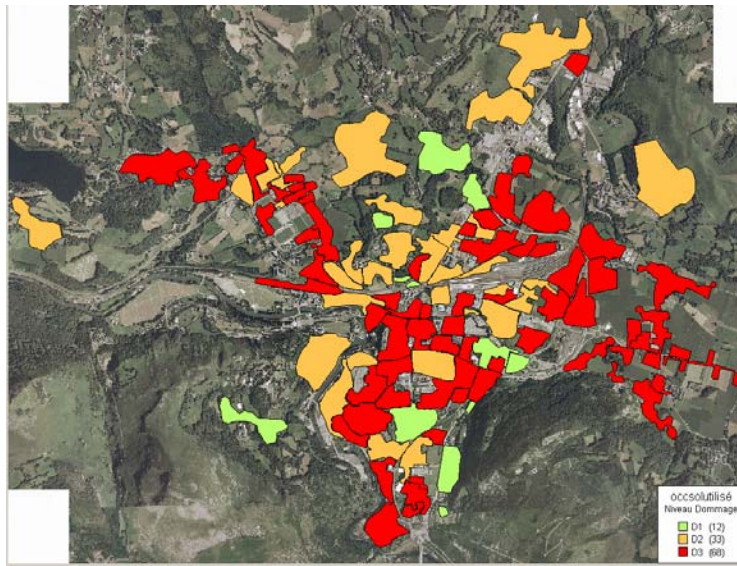


Figure 84 - Probabilité de 30 % pour que les bâtiments compris dans le polygone se trouvent dans le degré de dommage.

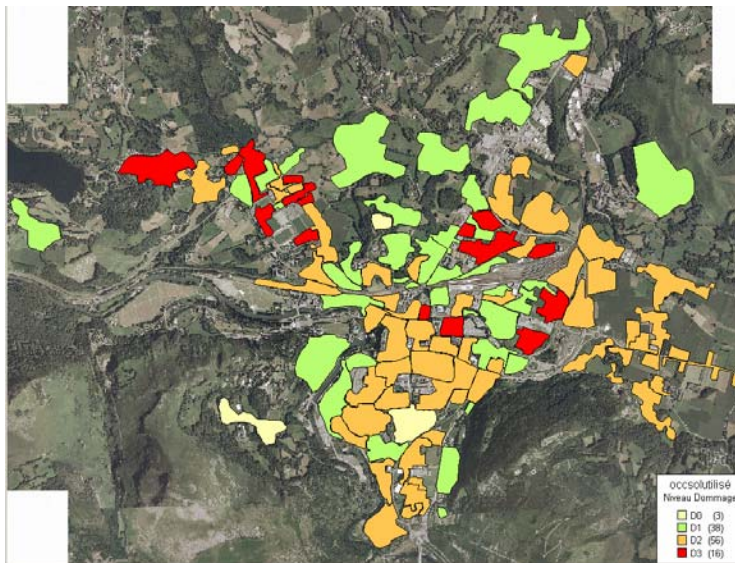


Figure 85 - Probabilité de 50 % pour que les bâtiments compris dans le polygone se trouvent dans le degré de dommage.

ID	ID SIG	Type	Verif	Code IRIS	ND0	ND1	ND2	ND3	ND4	ND5	P30
1	1	LOT	1	109	46	72	44	15	2	0	D2
2	2	COL	0	109	11	21	15	6	1	0	D2
3	3	LOT	0	105	1	4	8	6	3	0	D3
4	4	COL	0	105	19	38	27	10	2	0	D2
5	5	LOT	0	105	2	15	26	22	9	1	D3
6	6	LOT	0	105	3	18	31	26	10	1	D3
7	7	ISO	1	105	2	10	15	11	4	0	D3
8	8	LOT	1	105	59	103	65	22	3	0	D2
9	10	LOT	0	110	32	69	51	20	3	0	D2
10	11	ISO	0	110	10	16	10	3	1	0	D2
11	12	ISO	0	105	0	1	1	1	0	0	D3
12	13	LOT	0	104	0	5	14	17	10	1	D3
13	14	COL	0	105	2	3	1	0	0	0	D1
14	15	COL	0	104	7	14	10	4	1	0	D2
15	16	LOT	0	104	0	4	12	14	8	1	D3
16	17	LOT	0	104	1	11	28	34	20	3	D3
17	18	LOT	0	104	1	6	15	19	11	2	D3
18	19	ISO	0	104	1	8	16	16	8	1	D3
19	20	COL	0	104	4	8	6	2	0	0	D2
20	21	COL	0	105	3	5	4	1	0	0	D2
21	22	COL	0	104	8	15	11	4	1	0	D2
22	23	COL	1	109	8	14	13	8	3	0	D2
23	24	COL	0	109	1	1	0	0	0	0	D1
24	25	COL	0	109	4	4	2	1	0	0	D1
25	26	LOT	1	105	3	17	25	18	6	0	D3
26	27	ISO	0	105	2	11	14	10	3	0	D3
27	28	LOT	0	104	6	40	68	57	22	2	D3
28	29	ISO	0	104	1	5	7	5	2	0	D3
29	30	ISO	1	104	1	11	27	33	19	3	D3
30	31	COL	1	104	3	6	5	3	1	0	D2
31	32	COL	0	104	7	14	10	4	1	0	D2
32	33	COL	0	104	5	9	6	2	0	0	D2
33	34	ISO	0	104	1	7	15	15	7	1	D3
34	35	COL	0	104	32	63	45	17	3	0	D2
35	36	LOT	0	104	1	7	19	23	13	2	D3
36	37	COL	0	103	7	8	4	1	0	0	D1
37	38	ISO	0	103	2	11	15	11	4	0	D3
38	39	COL	0	103	25	29	14	4	0	0	D1
39	40	LOT	1	103	1	10	26	32	19	3	D3

Tableau 53 - (première partie) Répartition du nombre des logements qui se trouvent dans le degré de dommage D5 et D4 ou D5 par zones homogènes, pour le scénario de risque et le Vi moyen.

ID	ID SIG	Type	Verif	Code IRIS	ND0	ND1	ND2	ND3	ND4	ND5	P30
40	41	COL	1	108	11	12	7	3	1	0	D2
41	42	CH	1	102	13	43	60	49	21	2	D3
42	43	COL	1	102	16	23	19	12	4	0	D2
43	45	CH	1	103	42	88	96	68	26	2	D2
44	46	LOT	0	101	2	10	18	15	6	1	D3
45	47	COL	0	101	1	1	1	0	0	0	D1
46	48	ISO	0	101	1	7	9	6	2	0	D3
47	49	CV	1	103	35	84	104	84	35	4	D3
48	50	LOT	1	102	7	47	82	68	27	2	D3
49	51	COL	1	101	25	29	14	4	0	0	D1
50	52	COL	0	101	4	4	2	1	0	0	D1
51	53	COL	1	101	6	17	23	17	7	1	D3
52	54	ISO	0	101	1	6	9	6	2	0	D3
53	55	ISO	0	101	2	10	14	10	3	0	D3
54	58	COL	1	109	6	13	9	3	1	0	D2
55	59	LOT	0	109	0	5	13	16	9	1	D3
56	60	ISO	1	109	4	35	78	82	41	5	D3
57	61	LOT	1	109	0	3	7	9	5	1	D3
58	62	COL	1	109	1	4	4	3	2	0	D3
59	63	ISO	0	109	1	6	12	12	6	1	D3
60	64	ISO	1	103	4	20	33	27	11	1	D3
61	65	CH	1	103	4	18	31	27	11	1	D3
62	66	ISO	1	101	24	66	87	67	26	2	D3
63	67	CH	1	102	12	43	58	45	18	2	D3
64	68	CV	1	102	108	55	28	10	2	0	D1
65	69	COL	0	102	35	44	28	12	3	0	D2
66	70	ISO	0	102	1	10	20	19	10	1	D3
67	71	COL	1	102	40	47	31	14	4	0	D2
68	72	CV	1	102	11	23	31	24	9	1	D3
69	73	CV	0	102	16	46	62	49	20	2	D3
70	74	CV	1	102	17	30	42	35	14	1	D3
71	75	ISO	1	102	3	16	26	21	8	1	D3
72	76	COL	1	101	26	49	50	34	13	1	D2
73	77	ISO	0	101	2	8	11	8	3	0	D3
74	78	LOT	1	105	0	2	3	2	1	0	D3
75	79	ISO	1	105	1	6	9	7	3	0	D3
76	80	ISO	0	105	1	5	7	5	2	0	D3
77	81	ISO	0	105	2	9	12	8	3	0	D3
78	82	ISO	0	105	1	4	6	4	1	0	D3

Tableau 53 - (deuxième partie) - Répartition du nombre des logements qui se trouvent dans le degré de dommage D5 et D4 ou D5 par zones homogènes, pour le scénario de risque et le Vi moyen.

ID	ID SIG	Type	Verif	Code IRIS	ND0	ND1	ND2	ND3	ND4	ND5	P30
79	83	COL	1	106	1	4	7	7	3	0	D3
80	84	ISO	1	106	3	18	30	25	10	1	D3
81	86	ISO	0	106	3	18	31	27	11	1	D3
82	87	ISO	1	106	1	8	14	12	5	0	D3
83	88	LOT	0	106	0	2	4	3	1	0	D3
84	89	ISO	0	106	1	3	4	3	1	0	D3
85	95	COL	0	107	28	10	3	0	0	0	D1
86	98	CV	1	108	1	4	6	6	2	0	D3
87	99	COL	1	108	6	6	5	3	1	0	D2
88	101	ISO	1	109	5	21	29	20	7	1	D3
89	102	ISO	0	103	2	12	24	24	12	1	D3
90	103	COL	0	103	2	3	2	1	0	0	D2
91	104	COL	0	103	25	49	35	14	2	0	D2
92	105	CV	0	103	1	4	7	7	4	1	D3
93	106	ISO	0	109	4	18	24	17	6	0	D3
94	107	ISO	0	108	0	3	6	6	3	0	D3
95	108	ISO	0	109	1	6	12	12	6	1	D3
96	109	ISO	0	109	2	15	30	30	15	2	D3
97	110	LOT	0	109	0	2	5	6	4	1	D3
98	111	LOT	0	109	0	5	12	14	8	1	D3
99	112	COL	0	109	1	2	1	0	0	0	D2
100	113	LOT	0	109	1	6	15	19	11	2	D3
101	114	LOT	1	109	0	2	6	8	5	1	D3
102	115	ISO	0	109	1	5	9	9	5	1	D3
103	116	COL	1	109	8	19	16	9	3	0	D2
104	117	ISO	0	109	0	2	4	4	2	0	D3
105	118	COL	1	109	11	21	15	6	1	0	D2
106	119	ISO	0	109	3	4	3	1	0	0	D2
107	120	ISO	1	109	0	3	7	8	5	1	D3
108	121	ISO	1	105	18	20	10	3	0	0	D1
109	122	COL	0	109	18	6	2	0	0	0	D1
110	123	ISO	0	109	12	18	11	4	1	0	D2
111	124	ISO	0	109	2	4	2	1	0	0	D2
112	126	ISO	0	109	8	12	7	2	0	0	D2
113	139	ISO	0	107	6	9	6	2	0	0	D2

Tableau 53 - (troisième partie) - Répartition du nombre des logements qui se trouvent dans le degré de dommage D5 et D4 ou D5 par zones homogènes, pour le scénario de risque et le Vi moyen.

Pour permettre une vision synthétique des résultats d'endommagement potentiels, les données ont été exportées sous MapInfo et agrégées au niveau des zones IRIS de l'INSEE.

Les bâtiments dont les logements ne sont plus utilisables (D4 et D5) sont représentés sur les Figure 86 (nombre des logements en D4-D5, D5), Figure 87 (pourcentage des logements en D4-D5, D5) et dans le Tableau 54. « D4-D5 » rassemble à la fois les logements ayant subi des dommages de type D4 et ceux ayant subi des dommages de type D5. Les zones en rouge représentent des secteurs où le pourcentage de logements se trouvant dans les degrés de dommages D4-D5 est supérieur à 10 %, celles en verts entre 5 % et 10 % et celles en jaunes inférieur à 5 %. La colonne P30 du Tableau 53 signifie qu'il y a 30 % de probabilité que les bâtiments compris dans le polygone se trouvent dans les degrés de dommages indiqués. Pour toutes les simulations on a utilisé des indices de vulnérabilité moyens  $V_i$ . A titre indicatif, le nombre total de logements (Nb. L) de chaque secteur est donné sur la Figure 86.

Code IRIS	Commune	Nb. Logements	ND0	ND1	ND2	ND3	ND4	ND5	ND4 (%)	ND5 (%)
101	Centre Mairie	774	94	207	238	168	62	5	8.01	0.65
102	Centre Soum	1703	279	427	487	358	140	12	8.22	0.70
103	Ophite Chanteclerc	1314	150	336	391	300	124	13	9.44	0.99
104	Centre Gare	1038	79	233	314	269	127	16	12.24	1.54
105	Sarsan Anclades	862	119	271	264	156	50	2	5.80	0.23
106	Pic du Ger	262	9	53	90	77	31	2	11.83	0.76
107	Bois de Mourles	64	34	19	9	2	0	0	0.00	0.00
108	Secteur Hôtelier	92	18	25	24	18	7	0	7.61	0.00
109	La Bastide Lannedarré	1408	159	349	407	325	149	19	10.58	1.35
110	Monge Saux	215	42	85	61	23	4	0	1.86	0.00
<b>Total</b>		<b>7732</b>	<b>983</b>	<b>2005</b>	<b>2285</b>	<b>1696</b>	<b>694</b>	<b>69</b>	<b>8.98</b>	<b>0.89</b>

Tableau 54 - Répartition de dommages ND5 et ND4-ND5 par contours IRIS INSEE, pour l'indice de vulnérabilité moyen.

Le Tableau 55 permet d'évaluer le risque pour chaque type d'occupation des sols, en faisant la somme des logements en D4-D5 et leur pourcentage.

Type	% ND4-ND5	ND4-ND5
CH	10.64	83
COL	3.43	60
CV	9.27	95
ISO	12.73	283
LOT	12.38	242

*Tableau 55 - Répartition de dommages ND4-ND5 en fonction du type d'occupation des sols (pourcentage et nombre de logements).*

On constate que les lotissements, l'habitat isolé, le centre historique et le centre ville présentent, tant en valeur absolue, qu'en pourcentage, un niveau de risque similaire, beaucoup plus important que le bâti d'usage collectif.

Ce type de résultat peut être utile à intégrer dans les réflexions qui pourraient être conduites dans le cadre d'un PPR, en matière de réduction du risque par le biais de proposition d'action sur la réhabilitation et le renforcement du bâti existant.



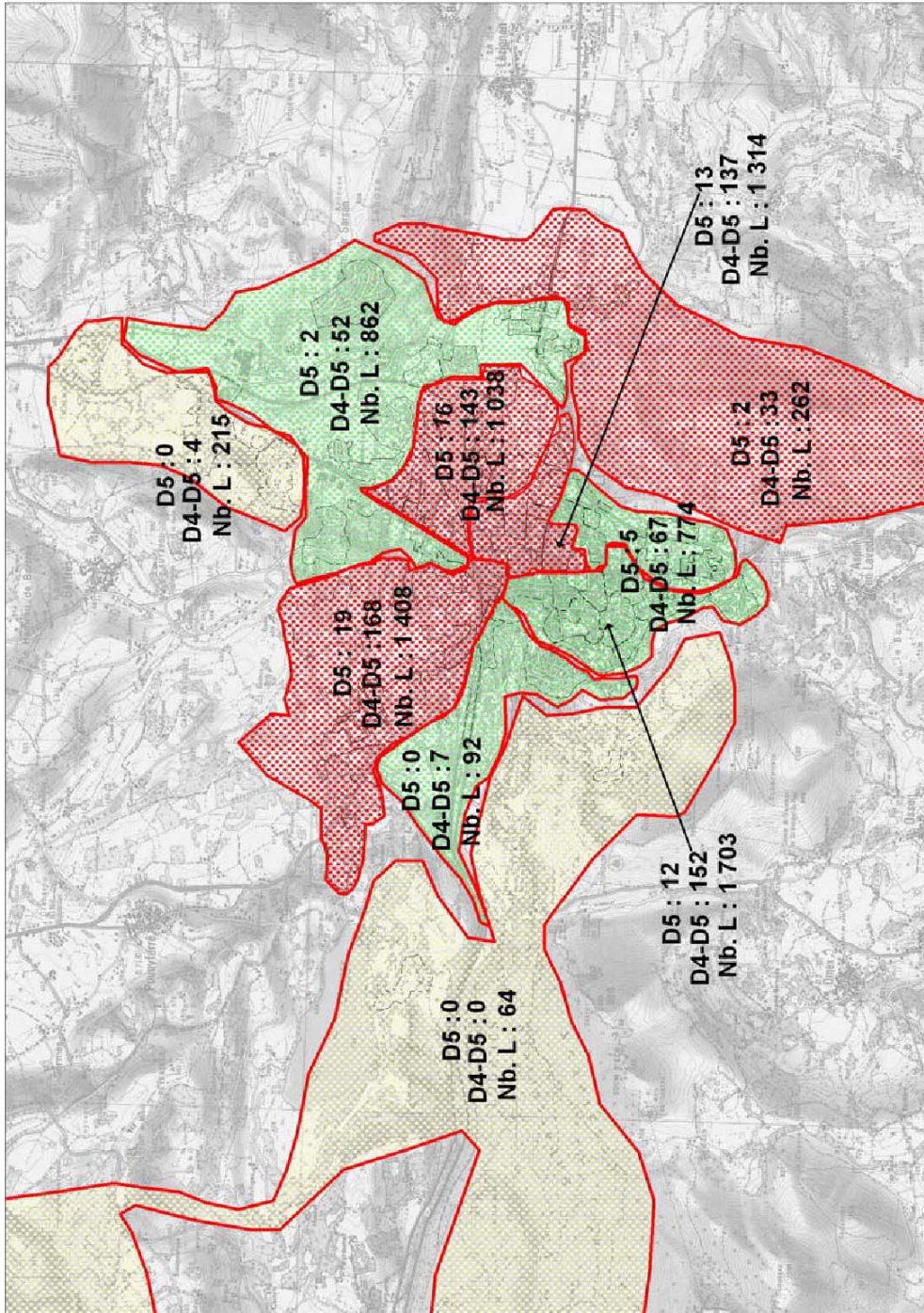


Figure 86 - Nombre de logements qui se trouvent dans les degrés de dommages D5 et D4-D5 par contours IRIS INSEE.

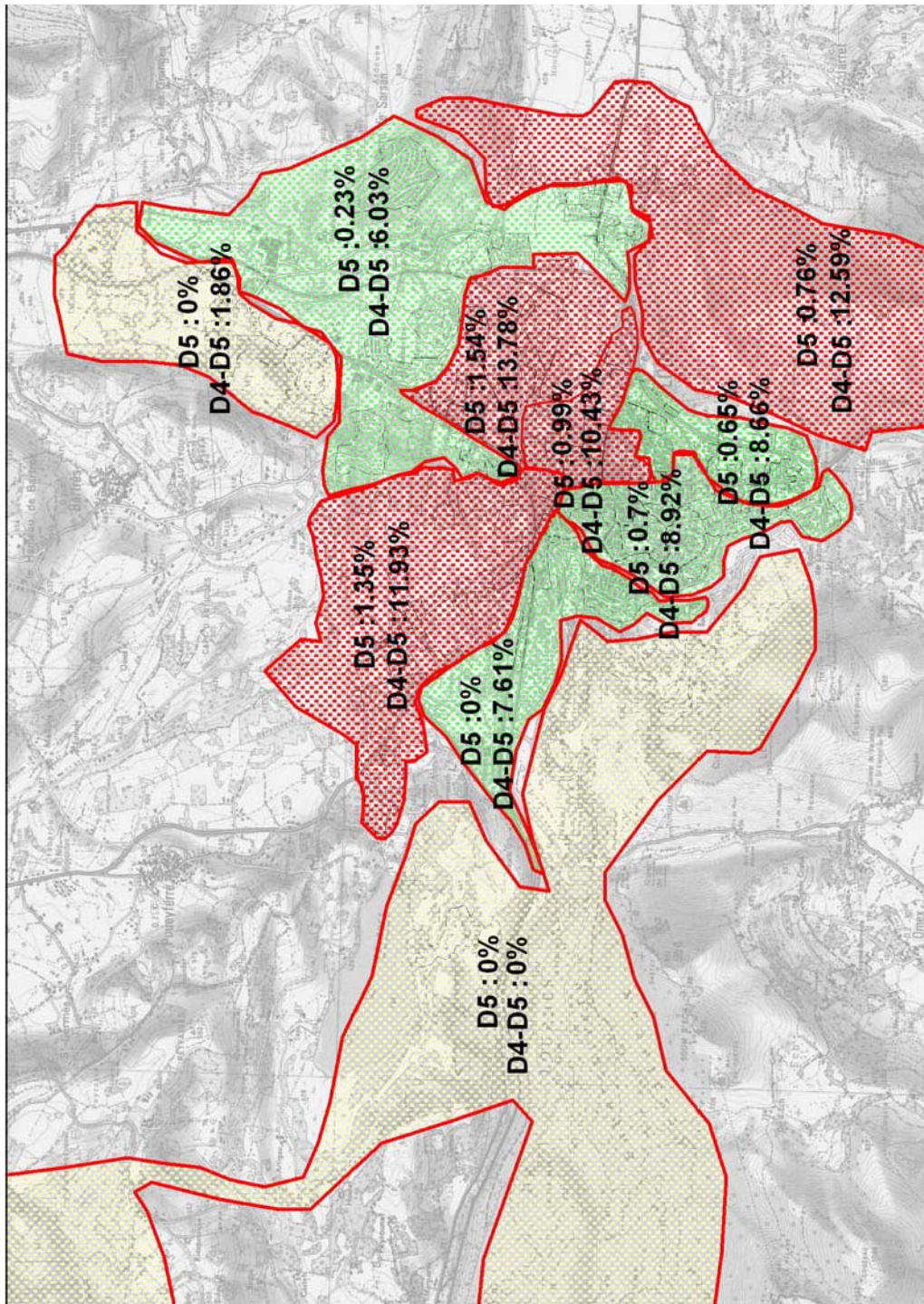


Figure 87 - Pourcentage de logements qui se trouvent dans les degrés de dommages D5 et D4-D5 par contours IRIS INSEE.

### 11.3.5. Conclusions

L'évaluation du risque sismique sur la commune de Lourdes a conduit à une estimation des dommages pour les bâtiments courants selon le scénario de risque défini dans le chapitre «11.3.3. Choix et méthodologie de scénario de risque».

L'analyse de risque sismique a tenu compte des points ci-après :

- une estimation de l'aléa sismique régional, permettant entre autre de choisir le scénario de risque plausible et raisonnable, dans le contexte sismotectonique de Lourdes ;
- une évaluation de l'aléa sismique local, afin de prendre en compte les effets dus à la lithologie (géologiques et géotechniques) et à la topographie ;
- une estimation de la vulnérabilité physique de l'ensemble des constructions, à partir de la méthodologie du projet européen RISK-UE, Niveau 1 ;
- une évaluation finale du risque sismique.

L'analyse de risque permet de combiner les résultats de l'aléa sismique local (agression sismique) et de la vulnérabilité physique des constructions grâce à l'outil ARMAGEDOM, afin d'aboutir aux estimations des degrés de dommages D0, D1, D2, D3, D4 (dommages sévères) et D5 (destruction complète) de l'ensemble de la zone d'étude pour le bâti courant.

L'évaluation du risque sismique sur la zone d'étude, constituée par la commune de Lourdes a conduit à une estimation des dommages pour les bâtiments courants (classe B) et spécifiques (classe C et D).

Les bâtiments de classe B ont été analysés par la méthode RISK-UE Niveau 1. Il faut tenir compte du fait que cette méthode (approche empirique) repose sur une analyse dite «macrosismique», basée sur des retours d'expérience post-sismique, et qu'elle est plus adaptée à l'étude d'un ensemble de structures que pour une seule structure.

L'Annexe présente les résultats de l'analyse faite par CETE Méditerranée d'Aix en Provence pour les bâtiments de classes C, D et quelques bâtiments de classe B de la commune de Lourdes. La méthode utilisée pour cette étude est Vulnéralp 1.1 du LCPC/LGIT qui s'appuie sur les méthodes GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti) et RISK-UE. L'analyse fait une hiérarchisation de ces bâtiments en fonction de la vulnérabilité.

Il sera donc nécessaire, pour les bâtiments considérés comme prioritaires (bâtiments qui ont l'indice IV supérieur à 50) de réaliser un diagnostic beaucoup plus élaboré, d'une part pour confirmer les résultats obtenus, d'autre part, pour engager des analyses plus détaillées, par exemple correspondant au Niveau 2 de la méthodologie RISK-UE.

L'analyse de risque concernant les degrés de dommages des bâtiments peut être complétée par une analyse concernant les victimes, en termes de morts, de blessés et

de sans-abris, pour le scénario considéré. Cette analyse doit tenir compte de la fréquentation touristique, qui varie fortement dans la zone d'étude.

En effet, l'évaluation des préjudices humains (morts, blessés, sans abris) est particulièrement complexe et dépend de multiples facteurs : à quel moment survient le séisme, comment la crise sera gérée, compte tenu des dommages aux infrastructures, réaction sociale...

En ce qui concerne le moment du séisme, le jour (religieux, férié ou non par exemple), le moment du jour (nuit ou jour), l'heure (de la journée) va avoir une conséquence importante sur la répartition de la population dans les bâtiments et à l'extérieur et même selon les différents secteurs de la ville.



## 12. Conclusion générale

L'objectif de cette étude portait sur l'évaluation de l'aléa sismique local sur le territoire de la ville de Lourdes.

À cette fin, le BRGM a réalisé un microzonage sismique, en adoptant les méthodes préconisées par l'Association Française du Génie Parasismique et les guides méthodologiques de réalisation des Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRN) édités par les Ministères concernés.

Les résultats sont fournis, sous la forme de cartes à 1/10 000. Leur lecture permet de connaître, en tout point de coordonnées de la commune :

- les zones de réponse sismique homogène selon l'approche spécifique (niveau C) donnée par le Guide méthodologique : « *Prévention des risques naturels (PPR) Risques sismiques, 2002* » (**planche 1**) ;
- l'existence de phénomènes d'amplification topographique et de zones susceptibles de liquéfaction (**planche 2**) ;
- le type et l'intensité de l'aléa mouvement de terrain (**planche 3**) ;
- la synthèse des niveaux d'aléa considérés (**planche 4**).

**À titre d'information**, nous avons fourni les planches qui pourraient être issues de la réglementation nationale :

- le type de site selon les Règles de construction parasismique en vigueur, (PS 92) (**planche 5**) ;
- le type de site selon les Règles de construction parasismique en projet, (Eurocode 8) (**planche 6**) ;

**La cartographie qui suit les calculs spécifiques** (planche 1) réalisés dans le cadre de cette étude **est la plus pertinente**. En effet, que ce soit la définition des spectres ou la classification des sols, les normes PS92 et EC8 sont, en raison de leur caractère forfaitaire, nécessairement peu précises et ne rendent pas compte de la spécificité des sites étudiés. Les mouvements issus d'une étude spécifique locale peuvent depuis la loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003 se substituer à la réglementation nationale.

Les résultats d'un scénario de risque mené sur la base des mouvements issus du microzonage sismique montrent que les lotissements, l'habitat isolé, le centre historique et le centre ville présentent, tant en valeur absolue, qu'en pourcentage, un niveau de risque similaire, beaucoup plus important que le bâti d'usage collectif.

L'analyse de risque concernant les degrés de dommages des bâtiments peut être complétée par une analyse concernant les victimes, en termes de morts, de blessés et de sans-abris, pour le scénario considéré. Cette analyse doit tenir compte de la fréquentation touristique, qui varie fortement dans la ville de Lourdes selon les périodes de l'année (périodes scolaires, liturgiques, fériées,...) et l'heure (jour, nuit, périodes de repas,...). De même, l'analyse de la vulnérabilité des réseaux et des moyens de communication ainsi qu'une analyse fine de la vulnérabilité des ouvrages à fort enjeu (classes C et D) jugés fragiles en première approche doit permettre de proposer des mesures de confortement prioritaires et ainsi de réduire à terme l'exposition des populations et des biens au risque sismique.

Les différentes composantes de l'aléa sismique local peuvent désormais être prises en compte dans les documents d'urbanisme, afin que les aménageurs et urbanistes intègrent les différentes contraintes liées à cet aléa, dès la conception d'un projet, au même titre que les contraintes liées au fonctionnement actuel de l'agglomération.

Ceci constitue la phase dite technico-administrative de prise en compte des résultats purement techniques de l'étude et d'approbation de mesures préventives, au sens de l'élaboration des Plans de Prévention des Risques (PPR). Cette phase peut être réalisée très rapidement, dès lors que la volonté est exprimée par les représentants de l'Etat ou les élus locaux.

Si au cours de ces dernières années, différentes actions, visant à réduire le risque et à mieux se protéger pour l'avenir, ont été entreprises, la difficulté majeure reste la mise en œuvre pratique et effective des différents volets de la prévention du risque sismique.

Le problème réside en fait aujourd'hui principalement dans la vulnérabilité du milieu construit existant. En revanche, pour le milieu construit futur, on peut penser que l'arsenal réglementaire concernant la prise en compte des risques est la garantie d'une construction parasismique, assurant la protection des biens et des personnes. La problématique n'est cependant pas aussi simple :

- en termes de protection parasismique, et malgré cette réglementation contraignante, il reste encore à convaincre tous les acteurs, notamment les particuliers, mais aussi les professionnels de se conformer aux règles de l'art ;
- en termes d'occupation des sols et d'aménagement, il reste à prendre en compte les contraintes liées à l'aléa sismique dans les pratiques d'aménagement.

La prise en compte du risque sismique dans les projets de construction apparaît bien comme un enjeu majeur pour la sécurité des générations futures.

L'analyse des séismes destructeurs récents, indique en effet que la plupart des dégâts sont causés sur les constructions qui n'ont pas fait l'objet de dispositions constructives parasismiques. En revanche, les constructions pour lesquelles les dispositions élémentaires ont été appliquées, se comportent bien.

Pour appliquer ces dispositions élémentaires, encore faut-il qu'elles soient connues, et qu'un cadre réglementaire astreigne les constructeurs, aménageurs et urbanistes à les suivre. Une des priorités serait donc de transposer les constats techniques des études de microzonage en documents opposables aux tiers. C'est précisément l'objet des plans de prévention des risques (PPR) dont la réalisation doit être une priorité pour la commune de Lourdes.





## 13. Références bibliographiques

**Abrahamson N.A., Silva W.J.** (1996) - Empirical ground motion models, *Report to Brookhaven National Laboratory*.

**Abrahamson N.A., Silva W.J.** (1997) - Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seism. Res. Lett.*, Vol. 68, p 94-126.

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

**AFPS** (2003) - Le séisme de 21 Mai 2003 en Algérie, Résumé du rapport préliminaire de la mission AFPS, Organisée avec le concours du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

**AFPS** (2005) - Vulnérabilité sismique du bâti existant : Approche d'ensemble, Cahier Technique, n° 25, 121 p.

**Alasset, P.J.** (2005) - Sismotectonique et identification des sources sismiques en domaine à déformation lente : cas des Pyrénées Occidentales et des Alpes du Nord (France). Le Tsunami créé par le séisme de Zemmouri (MW=6.9, Algérie) du 21 Mai 2003. Thèse de Doctorat de l'université Louis Pasteur, 214 p., 68 fig., 24 tabl.

**Alasset, P.J., Meghraoui M.** (2005) - Active faulting in the western Pyrénées (France) : Paleoseismic evidence for late Holocene ruptures. *Tectonophysics*, 409, 39-54.

**Ambraseys N.N., Simpson K. and J.J. Bommer** (1996) - Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earth. Eng. Struc. Dyn.*, Vol. 25, p 371-400.

**Ambraseys, N., Smit, P., Sigbjornsson, R., Suhadolc, P. and Margaris, B.** (2002), Internet-Site for European Strong-Motion Data, European Commission, Research-Directorate General, Environment and Climate Programme.

**Anderson J. G.** (1979) - Estimating the seismicity from geological structure for seismic-risk studies. *Bull. Seism. Soc. Am.* 71, 827-843.

**Anderson J. G., Luco J. E.** - (1983) - Consequences of slip rate constraints on earthquake occurrence relations. *Bull. Seism. Soc. Am.* 73, 471-496.

**Atkinson G. and E. Sonley** (2000) - Empirical relationships between Modified Mercalli Intensity and response spectra. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 537-544.

**Baroux E., Pino N.A., Valensise G., Scotti O., Cushing M.E.** (2003) - Source parameters of the 11 June 1909, Lambesc (Provence, southeastern France) earthquake: a reappraisal based on macroseismic, seismological and geodetic observations. *J. Geophys. Res.*, **108**, n° B9, 2454, doi :10.1029/2002JB002348.

**Blès J.L., Bour M., Dominique P., Godefroy P., Martin C., Terrier M.** (1998) - Zonage sismique de la France métropolitaine pour l'application des règles parasismiques aux installations classées. Document BRGM, n° 279, 56 p.

**Bouchut J., Negulescu C., Mouroux P., Vincent M. avec la collaboration de : De Martin F. et Mathon C.** (2006) - Etude de réduction de la vulnérabilité du massif de Bouzaréah aux catastrophes naturelles-Études des interventions dans les zones pilotes, pour les risques mouvements de terrain et séismes, BRGM/RC-54587-FR, Rapport de tache 4, Volume 2, 54 p.

**BRGM, EDF, IRSN, SisFrance** (2006).

**Caillot V., P.Y. Bard, (1993)** - Magnitude distance and site dependent spectra from Italian accelerometric data. *Europ. Earth. Eng.*, Vol 1, p 37-48.

**Campbell K.W., Bozorgnia Y.** (2003) - Updated near-source ground motion (Attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 314-331.

**Castéras M. et al.** (1970) - Carte géologique de la Feuille de Lourdes (échelle du 1/50 000), n° 1052.

**Chardon D., Hermitte D., Nguyen F., Bellier, A.,** (2005) - First paleoseismological constraints on the strongest earthquake in France (Provence) in the twentieth century, *Geology* (Geological Society of America); November 2005; vol. 33; n° 11; p. 901-904; doi: 10.1130/G21713.1; 4 figures; 1 table.

**Darendeli M.B.** (2001) - Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves, Ph. D. dissertation, University of Texas, Austin, USA.

**Dominique P., Fouissac D., Bour M., collaboration Martin C.** (1996) - Etude pilote de surveillance sismique d'une zone à risque des Bouches-du-Rhône – Microzonage sismique des sites industriels de Fos-sur-Mer, phase 1996. Rapport BRGM, R39092, 58 p., 24 fig., 4 tableaux, 1 annexe.

**Dubos, N.** (2003) - Contribution à l'évaluation du risque sismique dans les Pyrénées centrales. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 205 p.

**Dubos N., Souriau A., Ponsolles C., Fels J.F., Sénéchal G.** (2003) - Etude des effets de site dans la ville de Lourdes (Pyrénées, France) par la méthode des rapports spectraux. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 174, p. 33-44.

**Dubos N., Sylvander M., Souriau A., Ponsolles C., Chevrot S., Fels J.F., Benahmed S.,** (2004) - Analysis of the 2002 may earthquake sequence in the central

Pyrénées, consequences for the evaluation of the seismic risk at Lourdes, France. *Geophys. J. Int.*, 156, p. 527-540.

**Fitzgerald, P. G., Munoz, J. A., Coney, P. J. et Baldwin, S. L.** (1999) - Asymmetric exhumation across the Central Pyrenees: Implications for the tectonic evolution of a collisional orogen. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 173, p. 157-170.

**Gasparini D., Vanmarcke E.H.** (1976) - Simulated earthquake motions with prescribed response spectra. M.I.T. Departement of Civil Engineering Research Report R76-4, order n°527, January 1976.

**Giovinazzi S.** (2005) - The vulnerability assesement and the damage scenario in seismic risk analysis, 199 p.

**Goula, X., Olivera, C., Fleta, J., Grellet, B., Lindo, R., Rivera L.A., Cisternas, A. and Carbon, D.** (1999) - Present and recent stress regime in the eastern part of the Pyrenees. *Tectonophysics*, 308, p. 487-502.

**Kokusho T.** (1980) - Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range. *Soils and foundations*, 20(4):45-60.

**Le Brun B. et Imbault M., avec la collaboration de Bertrand E., Bour M., Dominique P. et Mouroux P.** (2003) - Participation du BRGM au sous groupe zonage sismique du GEPP. Rapport BRGM, RP-52342-FR.

**Levret A., Backe J.C., Cushing M.** (1994) - Atlas of macroseismic maps for French earthquakes with their principal characteristics. *Natural Hazards*, 10, p. 19-46.

**Mc. Guire R.** (2004) - Seismic Hazard and Risk Analysis, Earthquake Engineering Research Institutue, 221 p.

**Modaressi H., Foerster E., Mellal A.** (1997) - Computer aided seismic analysis of soils. *Proc. Of the 6<sup>th</sup> Int Symp. On Numerical Models in Geomechanics*, NUMOG VI, Montréal, Québec, Canada July 2-4.

**Mouroux P., Le Brun B., Depinois S., Bertrand E., Masure P.** (2004) - Projet européen RISKUE: application à la ville de Nice. Rapport BRGM/RP-53202, 137 p., 43 ill., 3 ann.

**Nakamura Y.** (1989) - A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface. *QR of RTI*, 30, 1, p. 25-33.

**Nakamura Y.** (1996) - Real-Time Information Systems for Seismic Hazards Mitigation UrEDAS, HERAS and PIC. *QR of RTI*, 37, 3, p. 112-127.

**Newmark N.M., Hall W.I., Mohraz B.** (1976) - Statistical studies of vertical and horizontal earthquake spectra. Report for the Division of Safety U.S.N.R.C., Washington D.C., 20 555.

**Nocquet, J.-M.** (2002) - Mesure de la déformation crustale en Europe Centrale par Géodésie Spatiale. Ph.D Thesis, University of Nice Sophia Antipolis, 311 pp.

**Nogoshi M., Igarashi T.** (1971) - On the propagation characteristics of microtremors. *Journ. Seism. Soc. Japan*, Vol. 23, p. 264-280.

**RFS 2001-01** (2001) - Proposition de modification de la Règle Fondamentale de Sûreté I.2c. relative à la détermination des mouvements sismiques à prendre en compte pour la sûreté des tranches nucléaires comportant un réacteur à eau sous pression, applicable à l'ensemble des installations nucléaires de base, IPSN (Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire), Rapp. DES n° 348.

**Rigo A., Souriau A., Dubos N., Sylvander M., Ponsolles C.** (2005) - Analysis of the seismicity in the central part of the Pyrenees (France), and tectonic implications. *Journal of Seismology*, 9, 211-222.

**Sabourault P.** (1999) - Du microzonage à la prédiction des mouvements forts : confrontation des mesures de terrain, de simulations numériques et de modélisations sur modèles réduits centrifugés. Thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée.

**Sadigh K., Chang C.-Y., Egan J.A., Makdisi F., Youngs R.R.** (1997) - Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. *Seism. Res. Lett.*, Vol. 68, p. 180-189.

**Secanell R., Martin C., Goula X., Susagna T., Tapia M., Bertil D., Dominique P.** (2006) - Probabilistic seismic hazard assessment of the Pyrenean Region. Soumis au *Journal of Seismology*.

**Sedan O., Bouchut J., Mouroux P., Negulescu C., Bertrand G., Winter T., Vincent M., Bernardie S., Douglas J.** (2006) - Etude de réduction de la vulnérabilité du massif de Bouzaréah aux catastrophes naturelles. Rapport BRGM/RC-54378-FR. Rapport de tache 2, Vol. 4 - Evaluation du risque sismique, 151p.

**Sibuet J.-C., Srivastava P.H., Spakman W.** (2004) - Pyrenean orogeny and plate kinematics. *J. Geophys. Res.*, 109, B08104, doi : 10.1029/2003JB002514.

**Souriau, A., Sylander, M., Rigo, A., Fels, J.-F., Douchain, J.-M. and Ponsolles C.,** (2001) - Sismotectonique des Pyrénées : principales contraintes sismologiques. *Bull. Soc. Géol. France*, 172, n° 1, p. 25-39.

**Terrier M.** (2005) - Identification et hiérarchisation des failles potentiellement actives de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur- Phase 3 : Hiérarchisation des failles. Rapport final. Rapport BRGM/RP-53930-FR.

**UNIGE** - Draft document (2003) - I level methodology for the vulnerability assessment of current buildings and guidelines for the implementation-RISK-UE WP4. Vulnerability assessment of current buildings. 28 p.

**Wells D.L., & Coppersmith K.J.** (1994) - New empirical relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, pp. 974-1002.

**Youngs R. R. and Coppersmith K. J.** (1985) - Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. *Bull. Seism. Soc. Am.* 75, 939-964.



## 14. Glossaire

### **Aléa**

Événement menaçant ou probabilité d'occurrence d'un phénomène pouvant engendrer des dommages.

### **BCSF**

Bureau Central Sismologique Français. Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg (EOST) - Centre National de la Recherche Scientifique - Institut National des Sciences de l'Univers. [www.sismo.prd.fr](http://www.sismo.prd.fr)

### **Cohérent (sol, roche, couche ou matériau)**

Propriété qui témoigne d'une liaison étroite (cohésion). Roche, sol ou formation consolidé.

### **Compétent (sol, roche, couche ou matériau)**

Propriété qui témoigne d'une plus grande aptitude à se rompre qu'à se déformer.

### **Croûte terrestre**

Couche supérieure de la surface de la Terre, d'une épaisseur d'environ 10 km sous les océans, de 70 km sous les chaînes de montagne et de 30 à 40 km sous les continents.

### **Essaim sismique**

Série de faibles séismes, dont aucun d'entre eux n'est identifié comme séisme principal, se produisant dans une période et sur une zone limitée.

### **Echelle MSK**

Echelle d'intensité des séismes, mise au point en 1964 par Medvedev, Sponheuer et Karnik.

Historiquement, en France, l'échelle la plus communément utilisée est l'échelle MSK (cf. glossaire). C'est la première échelle à prendre en compte la diversité des types d'ouvrages. La base de données de sismicité historique SisFrance gérée par le BRGM, en collaboration avec Electricité de France (EDF) et l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) est toujours en échelle MSK.

En 1998, une nouvelle échelle « l'Echelle Macrosismique Européenne » EMS (Grünthal, 2001) prend en compte l'évolution récente des techniques de construction. Ainsi, depuis début 2000, les enquêtes macrosismiques du BCSF sont en échelle d'intensité EMS.

**Degré I** : Secousse non perceptible mais ressentie par les instruments.

**Degré II** : Secousse à peine perceptible, ressentie par des personnes au repos et aux étages élevés de bâtiments.

**Degré III** : Secousse faible, ressentie de façon partielle ; balancement des objets suspendus.

**Degré IV** : Secousse largement ressentie dans et hors les habitations, tremblement des objets.



**Degré V** : Secousse forte, réveil des dormeurs, chutes d'objets, parfois de légères fissures dans les plâtres.

**Degré VI** : Frayeur de nombreuses personnes, légers dommages, parfois fissures dans les murs.

**Degré VII** : Dommages aux constructions, chutes de cheminées, larges lézardes dans les murs de nombreuses habitations.

**Degré VIII** : Destructures des bâtiments dégâts massifs de tous les types de constructions.

**Degré IX** : Dommages généralisés aux constructions, même de bonne qualité, chutes de monuments et de colonnes.

**Degré X** : Destruction générale des bâtiments

**Degré XI** : Catastrophe, toutes les constructions sont détruites.

**Degré XII** : Changement de paysage, vallées barrées, lits de rivières déplacés.

### **Epicentre**

Point, à la surface de la Terre, situé à la verticale du foyer.

### **Faille**

Zone de faiblesse de la croûte terrestre où les différentes couches de roches se rompent et glissent parallèlement à la surface de la fracture.

### **Faille active**

Une faille est dite active si les deux blocs qu'elle sépare sont déplacés l'un par rapport à l'autre durant les derniers 100 000 ans.

### **Faille sismogénique**

Une faille est dite sismogénique lorsque les contraintes accumulées au cours du temps par le mouvement relatif des deux blocs qu'elle sépare sont relâchées brutalement sous la forme d'un séisme. Par opposition, une faille asismique est caractérisée par un lent déplacement plus ou moins continu au cours du temps, appelé **fluage**.

### **Formation**

Terrains possédant des caractères communs, et constituant un ensemble que l'on juge utile de distinguer ou ensemble de strates formant une unité lithologique à laquelle on associe généralement un nom de lieu.

### **Foyer (ou hypocentre)**

Point à l'intérieur de la Terre où commence la rupture et qui génère le premier mouvement du séisme.

### **Intensité**

Mesure des effets d'un séisme sur les hommes et/ou les structures en un lieu donné à la surface. L'intensité en un point dépend non seulement de la taille du séisme (magnitude) mais aussi de la distance au foyer, de la géologie locale et de la topographie. Il existe plusieurs échelles d'intensité.

**Krigeage**

Méthode géostatistique d'estimation de valeurs locales en considérant l'organisation spatiale des variables étudiées. C'est une interpolation spatiale.

**LDG/CEA**

Laboratoire de Détection et de Géophysique - Commissariat à l'Energie Atomique.  
[www-dase.cea.fr](http://www-dase.cea.fr)

**Ligne isoséiste**

Ligne reliant les points de même intensité à la surface de la Terre. Il s'agit couramment de lignes entourant l'épicentre.

**Limite de plaque**

Endroit où deux plaques tectoniques ou plus se rencontrent.

**Macrosismicité**

Sismicité historique.

**Magnitude**

Mesure de la force d'un séisme ou de son énergie libérée, déterminée à partir des enregistrements sur les sismographes. Il existe plusieurs échelles de magnitude.

**Microsismicité**

Sismicité instrumentale.

**Mur**

Surface inférieure d'une formation, ou bien les terrains situés immédiatement sous elle.

**Ondes sismiques**

Ondes (élastiques) générées par un séisme et se propageant à l'intérieur de la Terre.

**Plaque tectonique**

Grande structure géométrique qui compose la croûte terrestre. Les plaques tectoniques sont en continuel mouvement.

**Précurseur**

Petit séisme qui précède de quelques secondes à quelques semaines un fort séisme. Le précurseur a lieu à l'emplacement ou à proximité du gros séisme.

**Portance**

Capacité d'un sol à supporter une charge.

**RéNaSS**

Réseau National de Surveillance Sismique. [renass.u-strasbg.fr](http://renass.u-strasbg.fr)

**Réplique**

Séisme qui suit un important séisme, dit principal, et qui a lieu à proximité ou sur le foyer de celui-ci. Généralement, les très forts séismes sont suivis par un grand nombre de répliques qui décroissent en fréquence et en énergie avec le temps. Elles peuvent se produire jusqu'à près d'un an après le choc principal.

**Seiche**

Variation du niveau de l'eau près du littoral ou dans un lac.

**Sismicité**

Distribution géographique des séismes en fonction du temps.

**Sismogramme**

Enregistrement écrit d'un séisme.

**Sismographe ou sismomètre**

Instrument qui enregistre les mouvements du sol, de la Terre.

**Sismotectonique (étude)**

Etude ayant pour but de mettre en relation la sismicité, la géologie et les déformations récentes.

**Source sismique**

Zone de la faille, dont la rupture et le glissement sont à l'origine du tremblement de terre.

**Substratum**

Terme très général désignant ce sur quoi repose une formation géologique prise comme référence. On parle ainsi de substratum géologique, sismique ou géotechnique.

**Toit**

Surface supérieure d'une formation, ou bien les terrains la surmontant immédiatement.



**Centre scientifique et technique  
Service ARN**  
3, avenue Claude-Guillemain  
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France –  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Service géologique régional Midi-Pyrénées**  
Parc technologique du Canal  
3, rue Marie Curie – Bât. Aruba – BP 49  
31527 Ramonville-Saint-Agne – France -  
Tél. : 05 62 24 14 50