

Microzonage sismique des communes de Petit-Bourg, Goyave, Capesterre Belle-Eau, Trois-Rivières, Abymes, Morne à l'Eau, Gosier, Sainte-Anne, Saint-François, Le Moule (Guadeloupe) – Contexte et méthodologie suivie

Rapport final

BRGM/RP-61405-FR
septembre 2012

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM
CONVENTION 2009-51/SEMARD/C

M. Bengoubou-Valérius, A. Roullé, L. Agastin, E. Bourdon, G. Noury, D. Monfort-Climent, M. Terrier, D. Bertil, S. Auclair, L. Ducreux, J. Abad, E. Bayle, K. Samyn

Vérificateur :

Nom : Belvaux Myriam

Date : 30/11/2012

Signature :

Approbateur :

Nom : Mompelat Jean-Marc

Date : 07/12/2012

Signature :

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

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

Mots-clés : microzonage sismique, Guadeloupe, Trois-Rivières, Capesterre Belle-Eau, Goyave, Petit-Bourg, Les Abymes, Gosier, Sainte-Anne, Saint-François, Moule, Morne à l'Eau, effet de site, failles actives, aléa mouvement de terrain, vulnérabilité sismique.

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

Bengoubou-Valérius, Roullé A., M., Agastin, Bourdon E., Noury G., Monfort-Climent D., Terrier M., Bertil D., Auclair S., Ducreux L., Abad J., Bayle E., Samyn K. (2012) – Microzonage sismique des communes de Petit-Bourg, Goyave, Capesterre Belle-Eau, Trois-Rivières, Abymes, Morne à l'eau, Gosier, Sainte-Anne, Saint-François, Le Moule. Rapport final. BRGM/RP-61405-FR, 183p, 66 fig., 29 tab.

Synthèse

Dans le cadre du Plan Séisme, programme national de prévention du risque sismique, il est prévu de doter les communes de Guadeloupe d'un microzonage sismique. Ce document a vocation à être pris en compte dans l'aménagement et la construction, par le biais notamment de l'outil réglementaire que constitue le Plan de Prévention des Risques Naturels (PPR).

La Guadeloupe a fait l'objet dès la fin des années 90 d'un premier microzonage de la région pointoise qui a évolué par la suite. En 2003, c'est l'agglomération de Basse-Terre qui a été couverte, puis depuis 2009, les communes du Lamentin et de Baie-Mahault.

Afin de compléter la couverture des zones à enjeu et de couvrir les zones en périphérie des agglomérations déjà traitées, dix communes font l'objet d'un microzonage sismique : Petit-Bourg, Goyave, Capesterre-Belle-Eau, Trois-Rivières, Abymes, Morne-à-l'Eau, Gosier, Sainte-Anne, Saint-François, Le Moule. Ce choix a été entériné par les services de l'Etat lors d'une réunion en date du 17 mars 2009.

Ce travail est réalisé dans le cadre des actions de service public du BRGM (projet PSP09GUA19) et d'une convention de recherche et développement partagés avec la Préfecture de Guadeloupe, représentée par la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du logement (CONVENTION 2009-51/SEMARD/C).

La méthode retenue pour cette étude est cohérente avec d'une part, les méthodes développées et recommandées par l'AFPS en 1993 pour l'évaluation de l'aléa sismique local et d'autre part, avec les préconisations du guide PPR sismique rédigé par le ministère de l'Ecologie en 2002.

Le présent rapport est commun aux 10 communes. Il présente notamment les éléments de contexte, les données utilisées, la méthodologie suivie et les résultats à l'échelle régionale.

Les résultats sont par ailleurs fournis séparément sous forme de rapports spécifiques et de cartes pour chaque commune : à l'échelle 1/25 000 pour l'ensemble de la commune et à 1/10000 pour les centres-bourgs. Ces cartes concernent :

- Les zones de réponse sismique homogène (CARTE 1) ;
- Les zones d'amplification topographique et de zones susceptibles de liquéfaction (CARTE 2);
- L'aléa mouvement de terrain (CARTE 3);
- La présence potentielle de failles actives (CARTE 4);
- La vulnérabilité sismique des secteurs d'habitation (CARTE 5).

Sommaire

1. Introduction	13
2. Contexte sismotectonique.....	17
2.1. GENERALITES.....	17
2.2. CONTEXTE GEODYNAMIQUE ET TECTONIQUE.....	17
3. Analyse géologique.....	21
3.1. PRESENTATION GEOLOGIQUE GENERALE DE LA GUADELOUPE	21
3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA BASSE-TERRE	22
3.2.1. Données utilisées	22
3.2.2. Analyse géologique de la Basse-Terre.....	23
3.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA GRANDE-TERRE	24
3.3.1. Données utilisées	24
3.3.2. Analyse géologique des communes de la Grande-Terre.....	25
4. Aléa sismique régional	29
4.1. SISMICITE AU NIVEAU DE LA GUADELOUPE	29
4.1.1. Sismicité historique	29
4.1.2. Sismicité instrumentale	31
4.2. MOUVEMENT SISMIQUE DE REFERENCE AU ROCHER.....	32
4.2.1. Méthodologie adoptée	32
4.2.2. Aléa sismique régional d'après l'étude probabiliste de Geoter (Martin et al., 2002)	33
4.2.3. Spectre de réponse au rocher.....	34
4.2.4. Confrontation avec la réglementation.....	37
4.2.5. Choix des accélérogrammes.....	39
5. Effet de site lithologique	45
5.1. METHODOLOGIE.....	45
5.2. DONNEES DISPONIBLES.....	45
5.2.1. La Banque de données du Sous-Sol (BSS)	45
5.2.2. Rapports d'études géotechniques.....	46
5.2.3. Mesures H/V existantes	47
5.2.4. Données complémentaires acquises lors de l'étude.....	47
5.3. CARACTERISATION DES ZONES GEOLOGIQUES	50

5.3.1. Caractérisation des zones géologiques en Basse-Terre	50
5.3.2. Caractérisation des zones géologiques en Grande-Terre	57
5.4. DETERMINATION DES SPECTRES DE REPONSE.....	62
5.4.1. Méthodologie.....	62
5.4.2. Définition des colonnes de sol	63
5.5. CARTOGRAPHIE FINALE DES EFFETS DE SITE LITHOLOGIQUES ET SPECTRES SPECIFIQUES ASSOCIES	78
5.6. COHERENCE AVEC LES MICROZONAGES EXISTANTS.....	87
5.7. SYNTHESE DE LA REFLEXION MENEES SUR LE DECOUPLAGE ENTRE « ALEA LOCAL » ET « ALEA REGIONAL »	88
6. Effet de site topographique.....	91
6.1. DÉFINITION	91
6.2. PRINCIPE DE LA REGLEMENTATION	91
6.3. EVOLUTION DE LA CONNAISSANCE ET DE LA REGLEMENTATION.....	93
6.4. CARTOGRAPHIE.....	93
7. Failles actives.....	97
7.1. PREAMBULE – RAPPEL DES OBJECTIFS.....	97
7.2. LA PROBLEMATIQUE DE LA CARTOGRAPHIE DES FAILLES ACTIVES.....	97
7.2.1. Notions théoriques de failles actives.....	100
7.2.2. Réglementation en cours.....	101
7.3. LA DEMARCHE CARTOGRAPHIQUE	102
7.3.1. Principe	102
7.3.2. Identification des failles actives.....	102
Deux cas de figures sont à considérer en Guadeloupe :.....	102
7.3.3. Largeur des bandes d'incertitude.....	106
7.4. RECOMMANDATIONS	107
8. Aléa mouvements de terrain	109
8.1. CADRE GENERAL ET OBJECTIF DE L'ETUDE.....	109
8.2. GENERALITES	109
8.2.1. Typologie des mouvements de terrain	109
8.3. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA MOUVEMENT DE TERRAIN	114
8.3.1. Aléa, zonage et niveau d'aléa - définitions.....	114
8.3.2. Tendance de l'aléa mouvements de terrain pour le territoire étudié.....	115

9. Aléa liquéfaction.....	119
9.1. DEFINITIONS	119
9.1.1. Explication du phénomène.....	119
9.1.2. Effets induits par la liquéfaction.....	119
9.2. REGLEMENTATION ET DOCUMENTS DE REFERENCE	125
9.2.1. Etat de l'art réglementaire	125
9.2.2. Principe de la réglementation.....	126
9.2.3. Evaluation complète du risque de liquéfaction	127
9.3. DONNEES ANALYSEES	128
9.3.1. Analyse des documents existants	128
9.3.2. Localisation des zones présentant des lacunes d'information, programmation et réalisation d'investigations complémentaires	133
9.3.3. Analyse des investigations complémentaires	136
9.3.4. Synthèse de l'ensemble des analyses et cartographie de l'aléa liquéfaction 137	
9.4. CARTOGRAPHIE	138
10. Vulnérabilité sismique du bâti et simulation de dommages.....	141
10.1. INTRODUCTION	141
10.2. DEMARCHE SUIVIE.....	142
10.2.1. Principe de la méthode Risk-UE niveau 1	142
10.2.2. Logiciel de simulation ARMAGEDOM©.....	151
10.3. INVENTAIRE ET VULNERABILITE SISMIQUE DU BATI	152
10.3.1. Bâti courant à usage d'habitation	152
10.3.2. Bâtiments de catégorie d'importance III et IV	156
10.4. SIMULATION DE DOMMAGES	161
10.4.1. Scénario et calcul de l'ampleur de la secousse	161
11. Conclusion générale	165
12. Bibliographie	167

Liste des illustrations

Figure 1 : Carte des communes de Guadeloupe faisant et ayant fait l'objet d'un microzonage sismique.	15
Figure 2 : Schéma structural de l'arc Caraïbes, d'après Stephan et al. (1990), Feuillet (2000), Taboada et al. (2000).....	18
Figure 3 : Tectonique de l'arc antillais (Feuillet, 2000).....	19
Figure 4 : Coupe de la subduction à hauteur de la Guadeloupe (d'après Martin et al., 2002). ..	20
Figure 5 : Schéma géologique simplifié de la Guadeloupe.	22
Figure 6 : Colonne lithostratigraphique représentative de la Grande-Terre (Léticée,2008).....	26
Figure 7 : Principaux séismes fortement ressentis dans la Région (intensité MSK \geq VI). Données SisFrance/Antilles, 2009.	30
Figure 8 : Catalogue de sismicité instrumentale 1999-2005 du Centre de Données Sismologiques des Antilles (CDSA).	31
Figure 9 : Accélérations médianes (cm/s^2) pour une période de retour de 475 ans et pour les 10 communes étudiées (d'après Martin <i>et al.</i> , 2002).....	34
Figure 10 : Expression analytique du spectre de réponse élastique ;.....	35
Figure 11 : Spectres de réponse au rocher. En orange, l'accélération médiane calculée au Moule en 4 points pour l'étude Geoter. En bleu, le spectre recalculé en 12 points (médian + percentiles 15 et 85 % en pointillé). En noir le spectre de réponse retenu.	36
Figure 12 : Confrontation du spectre proposé avec les spectres issus de la réglementation	38
Figure 13 : Confrontation du spectre proposé avec les spectres issus des microzonages récents de Martinique et de Guadeloupe.....	39
Figure 14 : Accélérogrammes naturels sélectionnés et normalisés par rapport au PGA « cible »41	
Figure 15 - Accélérogrammes naturels modifiés correspondant au spectre au rocher	42
Figure 16 : Comparaison des spectres des accélérogrammes normalisés et naturels modifiés avec le spectre au rocher	43
Figure 17 : Diagramme en camembert présentant la répartition des sondages géotechniques recensés sur les dix communes étudiées.	46
Figure 18 : Diagramme en camembert présentant la répartition des différents types de sondages géotechniques recueillis.....	47
Figure 19 : Localisation de l'ensemble des données géologiques, géophysiques, géotechniques à disposition sur les 4 communes de Basse-Terre.....	49
Figure 20 : Localisation de l'ensemble des données géologiques, géophysiques et géotechniques à disposition sur les 6 communes de Grande-Terre.....	50
Figure 21 : Fréquences de résonance issues des données H/V sur les 4 communes de la Basse-Terre, superposées aux sous-ensembles géologiques (cf annexe 1).	55
Figure 22 : Zonage géotechnique pour les 4 communes étudiées de la Basse-Terre.	56
Figure 23 : Fréquences de résonance issues des données H/V sur les 6 communes de la Grande-Terre, superposées aux sous-ensembles géologiques (cf annexe 1).	60
Figure 24 : Zonage géotechnique pour les 6 communes étudiées de la Grande-Terre.	61
Figure 25 : forme du spectre de réponse élastique en accélération d'après la norme parasismique EC8 référencée NF EN 1998-1	63

Figure 26 : Spectres de réponse spécifiques proposés pour les différentes classes d'effets de site lithologiques sur les communes de Basse-Terre.....	80
Figure 27 : Zonage spécifique des zones à effets de site lithologiques pour les communes de Basse-Terre.	82
Figure 28 : Spectres de réponse spécifiques proposés pour les différentes classes d'effets de site lithologiques sur les communes de Grande-Terre.....	85
Figure 29 : Zonage spécifique des zones à effets de site lithologiques pour les communes de Grande-Terre.	86
Figure 30 : Cartes des communes de Guadeloupe ayant fait l'objet d'un microzonage sismique.	87
Figure 31 : principe des effets topographiques	91
Figure 32 : Principe de calcul du coefficient τ pour l'évaluation des effets de site topographiques.	92
Figure 33 : Choix des profils pour le calcul du coefficient τ	93
Figure 34 : Zones susceptibles de connaître un effet de site topographique sur les communes étudiées de Basse-Terre. La cartographie de l'effet de site topographique dans la zone d'emprise du Parc National n'est montré qu'à titre indicatif sur cette figure.	95
Figure 35 : Zones susceptibles de connaître un effet de site topographique sur les communes étudiées de Grande-Terre.	96
Figure 36 : Critères géologiques pour l'évaluation de l'activité et du potentiel sismogénique d'une faille (d'après Valensi et Pantosti, 2001).	99
Figure 37 : Carte du tracé des failles actives identifiées sur les 4 communes de Basse-Terre. La différence entre tracé supposé et tracé confirmé est donné au paragraphe 7.3.3. La cartographie à l'intérieur du Parc National n'est montré qu'à titre indicatif.	104
Figure 38 : Carte du tracé des failles actives identifiées sur les 6 communes de Grande-Terre. La différence entre tracé supposé et confirmé est donné au paragraphe 7.3.3...	106
Figure 39 : Représentation schématique des chutes de blocs et écoulement de falaises.	112
Figure 40 : Représentation schématique des principaux types de glissements de terrain (BRGM).	113
Figure 41 : Cartographie de l'aléa mouvement de terrain sur les 4 communes de la Basse-Terre (reprise intégrale des données PPR sauf sur Petit-Bourg).....	116
Figure 42 : Cartographie de l'aléa mouvement de terrain sur les 6 communes de la Grande-Terre.	117
Figure 43 : Schéma d'explication du phénomène de liquéfaction.....	119
Figure 44 : Effet de la liquéfaction – Coulée de boue	120
Figure 45 : Effet de la liquéfaction – Glissement latéral	120
Figure 46 : Effet de la liquéfaction – Glissement latéral : Port-au-Prince (Haïti), séisme du 12/01/2010 (Magnitude 7.0).....	120
Figure 47 : Effet de la liquéfaction – Oscillation du sol	121
Figure 48 : Effet de la liquéfaction – Poinçonnement du sol de fondation	121
Figure 49 : Effet de la liquéfaction – Poinçonnement du sol de fondation : Niigata (Japon), séisme du 16/06/1964 (Magnitude 7.5) et Kocaeli (Turquie), séisme du 17/08/1999 (M. 7.4)	122
Figure 50 : Effet de la liquéfaction – Tassements	122
Figure 51 : Effet de la liquéfaction – Tassements : Kobe (Japon), séisme du 17/01/1995 (Magnitude 6.8).....	123

Figure 52 : Effet de la liquéfaction – Ejection de sables, séisme de Bhuj (Inde) du 26/01/2001 (Magnitude 7.7)	124
Figure 53 : aléa liquéfaction des atlas communaux en Grande-Terre	130
Figure 54 : aléa liquéfaction des atlas communaux en Basse-Terre	131
Figure 55 : Exemple d'un sondage complémentaire : Saint-François, sondage destructif SFR2135	
Figure 56 : Exemple d'un sondage complémentaire : Saint-François, essai de pénétration statique SFR2	136
Figure 57 : Exemple du traitement d'un essai de pénétration statique : Saint-François, essai de pénétration statique SFR2, calculs de I_L avec M6.3 et M8.0	137
Figure 58 : Carte de l'aléa liquéfaction pour les 6 communes étudiées de Grande-Terre.....	138
Figure 59 : Carte de l'aléa liquéfaction pour les 4 communes étudiées de Basse-Terre.....	139
Figure 60 : Définition des typologies EMS98 et la classe de vulnérabilité associée.....	144
Figure 61 : Classification et description des dommages pour les bâtiments en maçonnerie selon l'échelle EMS98.	145
Figure 62 : Définition de la caractérisation des dommages en fonction des intensités EMS98.	146
Figure 63 : Exemple de distribution de dommages et de courbe de fragilité pour $\mu_D=3$	148
Figure 64 : Organigramme d'un scénario de risque. En rouge sur fond gris, tâches à traiter par un modèle de simulation	152
Figure 65 : Exemples de zones à habitat collectif (à droite) et lotissement (à droite).....	154
Figure 66 : Exemples de zones d'abitat disparate (à gauche) et de centre-ville (à droite)...	154

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des séismes destructeurs ayant produit au moins une intensité MSK \geq VI sur l'une des communes de la zone d'étude (Données SISFRANCE/Antilles, 2009). Les magnitudes indiquées sont issues des catalogues de Martin <i>et al.</i> (2002), MIDAS-IPGH et de Global CMT.	29
Tableau 2 : Accélérations spectrales médianes (cm/s^2) pour une période de retour de 475 ans et pour les 10 communes étudiées (d'après Martin <i>et al.</i> , 2002).....	33
Tableau 3 : Accélérations spectrales normalisées pour un PGA mis à 1.	33
Tableau 4 : Caractéristiques du spectre de réponse élastique retenu pour les 10 communes. .	36
Tableau 5 : Expressions analytiques du spectre de réponse élastique au rocher horizontal affleurant préconisé pour les Antilles par la réglementation Eurocode 8.	37
Tableau 6 : Expressions analytiques du spectre de réponse élastique au rocher horizontal affleurant issu de la réglementation PS92.	37
Tableau 7 : Critères retenus pour la sélection des accélérogrammes.	40
Tableau 8 : Caractéristiques des séismes correspondant aux accélérogrammes réels choisis pour le calcul des spectres tenant compte des effets de site	41
Tableau 9 : Corrépondance pour les communes de Basse-Terre entre les zones géotechniques et les classes d'effets de site lithologiques.	80

Tableau 10 : Paramètres des spectres de réponse élastiques par classe d'effets de site lithologiques pour les communes étudiées de Basse-Terre.....	81
Tableau 11 : Correspondance entre classes d'effets de site lithologiques et types de sol selon les CP-MI Antilles(2004).....	83
Tableau 12 : Correspondance pour les communes de Grande-Terre entre les zones géotechniques et les classes d'effets de site lithologiques.....	84
Tableau 13 : paramètres des spectres de réponse élastiques par classes d'effets de site lithologiques pour les communes étudiées de Grande-Terre.....	85
Tableau 14 : Correspondance entre classes d'effets de site lithologiques et types de sol selon les CP-MI Antilles (2004).....	86
Tableau 15 : Failles actives identifiées sur les communes de Basse-Terre étudiées.	103
Tableau 16 : Failles actives identifiées sur les communes de Grande-Terre étudiées.	105
Tableau 17 : Répartition par commune des investigations géotechniques complémentaires réalisées en 2011	134
Tableau 18 : Matrice de typologies de bâtiments et indices de vulnérabilité (méthode Risk-UE).149	
Tableau 19 : Facteurs aggravants pour les bâtiments en acier et béton armé.....	150
Tableau 20 : Facteurs aggravants pour les bâtiments en maçonnerie.	151
Tableau 21 : statistiques de logements INSEE (2006)	153
Tableau 22: Typologie du bâti d'habitation pour la Guadeloupe et indice de vulnérabilité associé.	156
Tableau 23 : Vulnérabilité sismique des bâtiments scolaires.....	157
Tableau 24 : Inventaire des bâtiments abritant les PC communaux en Guadeloupe et résultats de pré-diagnostics (Davidovici, 2004).....	158
Tableau 25 : Vulnérabilité sismique des bâtiments visités.....	159
Tableau 26 : Inventaire des bâtiments sélectionnés et leur présomption de vulnérabilité.....	161
Tableau 27 : Coefficients d'amplification dans les classes d'effets de site lithologiques pour les communes de Basse-Terre.	162
Tableau 28 : Coefficients d'amplification dans les classes d'effets de site lithologiques pour les communes de Grande-Terre.	162
Tableau 29 : Répartition de dommages par commune.	163

1. Introduction

La Guadeloupe est située dans l'arc des Petites Antilles au niveau de la zone de subduction de la plaque Amérique sous la plaque Caraïbes. Les mouvements de plaque associés à cette tectonique active sont responsables d'une activité sismique relativement importante au niveau des Antilles. De ce fait, la Guadeloupe est exposée à un fort aléa sismique et se trouve en zone de sismicité forte V du zonage sismique de la France (Décret n°2010-1254 du 22 octobre 2010 relatif à la prévention du risque sismique).

Les derniers séismes ayant été fortement ressentis en Guadeloupe se sont produits le 21 novembre 2004 (intensité IV à VII EMS98), et le 29 novembre 2007 (intensité VI à VII MSK). Suite au séisme du 21 novembre 2004, une victime a été recensée sur la commune de Trois-Rivières.

A ce jour, le plus fort séisme connu en Guadeloupe est celui du 8 février 1843 d'intensité épicentrale IX.

Dans le cadre du Plan Séisme démarré en mars 2007, programme national de prévention du risque sismique, il est prévu de doter les communes de Guadeloupe d'un microzonage sismique. Ce document a vocation à être pris en compte dans l'aménagement et la construction, par le biais notamment de l'outil réglementaire que constitue le PPR (Plan de prévention des risques) de façon à intégrer les contraintes liées à l'aléa sismique.

Le présent travail vise à doter 10 communes de Guadeloupe d'un microzonage. Il est réalisé dans le cadre des actions de service public du BRGM (projet PSP09GUA19) et d'une convention de recherche et développement partagés avec la Préfecture de Guadeloupe représentée par la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du logement (CONVENTION 2009-51/SEMARD/C).

La Guadeloupe a fait l'objet dès la fin des années 90 d'un premier microzonage de la région pointoise qui a évolué par la suite. En 2003, c'est l'agglomération de Basse-Terre qui a été couverte (Mompelat et al., 2003), puis en 2009 les communes du Lamentin et de Baie-Mahault (Bertil et al., 2009). Afin de compléter la couverture des zones à enjeu et de couvrir les zones en périphérie des agglomérations déjà traitées, dix communes font l'objet de microzonage sismique. Les dix communes retenues sont les suivantes : Trois-Rivières, Capesterre Belle-Eau, Goyave, Petit-Bourg, Abymes, Gosier, Sainte-Anne, Saint-François, Le Moule, Morne à l'Eau (Figure 1). Ce choix a été entériné par les services de l'Etat lors d'une réunion en date du 17 mars 2009.

Parmi les dix communes qui feront l'objet d'un microzonage sismique, quatre font partie de la Basse-Terre : Petit-Bourg, Goyave, Capesterre Belle-Eau, Trois-Rivières, permettant de faire la jonction entre les microzonages des deux principales agglomérations de la Guadeloupe. Elles représentent elles-mêmes un enjeu important en termes de population notamment.

Ces communes situées sur la Côte-au-Vent de la Basse-Terre comptent 58 123 habitants (*Source INSEE, 2006*), soit 14% de la population totale de la Guadeloupe. Les communes de Capesterre-Belle-Eau et de Petit-Bourg regroupent un peu plus de 71% de la population et près de 75% des logements de ce secteur de l'île.

Pour les communes de la Grande-Terre, six sont concernées : Morne à l'Eau, Abymes, Gosier, Sainte-Anne, Saint-François, Le Moule, permettant d'étendre le microzonage de l'agglomération

de Pointe-à-Pitre qui date déjà de dix ans, en couvrant le sud de l'île de Grande-Terre où se concentrent de nombreux enjeux, notamment touristiques.

Ces communes situées au sud et à l'est de la Grande-Terre comptent 163 958 habitants (*Source INSEE, 2006*), près de 40% de la population totale guadeloupéenne. La commune des Abymes appartenant à l'agglomération de Pointe-à-Pitre (comme celle du Gosier) représente à elle-seule près de 37% de la population de ce secteur de l'île.

Ces dix communes sont déjà dotées de PPR multirisques (cyclones, mouvement de terrain, inondation, séismes). Cette étude de microzonage a pour objectif, pour chaque commune, de pouvoir disposer d'éléments techniques permettant, dans une phase ultérieure, de mettre en œuvre un PPR sismique en complément du PPR existant.

La méthode retenue pour cette étude est cohérente avec d'une part les méthodes développées et recommandées par l'AFPS en 1993 pour l'évaluation de l'aléa sismique local et d'autre part, avec les préconisations du guide PPR sismique rédigé par le ministère de l'Ecologie en 2002 (Fabriol et Garry, 2002).

Dans son guide méthodologique consacré au microzonage sismique (AFPS, 1993), l'AFPS classe les études de microzonage sismique en trois niveaux de précision et de complexité croissante (A, B, C : en allant du plus rudimentaire au plus élaboré). Le choix du niveau d'étude à adopter se fait en croisant la zone de sismicité, eu égard au zonage sismique national et les enjeux, c'est-à-dire l'importance démographique et socio-économique du périmètre d'étude (type d'agglomération : importante, moyenne).

Dans le cadre de cette opération, une étude de niveau intermédiaire entre B et C est réalisée, du fait notamment, des moyens mis en œuvre et de l'extension de la zone d'étude, même si la méthodologie employée est de niveau C.

L'étude a consisté à cartographier successivement les zones de mouvement sismique homogène, les zones susceptibles d'être soumises à des effets de site topographiques, au phénomène de liquéfaction, aux failles actives et aux mouvements de terrain.

En ce qui concerne les zones de mouvement sismique homogène, l'étude doit dans un premier temps, définir le ou les mouvements sismiques de référence et, dans un deuxième temps, quantifier sous forme de spectre de réponse élastique, les effets de site associés à des zones homogènes.

Pour les autres effets, le zonage est accompagné d'une appréciation qualitative du niveau d'aléa.

La cartographie est réalisée à l'échelle du 10 000ème pour les zones urbaines des différentes communes, au 25 000ème sur les autres parties du territoire étudié. Elle ne concerne pas la zone d'emprise du Parc National.

Enfin, une analyse du risque est réalisée sur le territoire des 10 communes, prenant en compte l'aléa local issu du microzonage sismique, un inventaire des enjeux exposés et la vulnérabilité du bâti.

Le présent rapport est commun aux 10 communes. Il présente notamment les éléments de contexte, les données utilisées, la méthodologie suivie et les résultats à l'échelle régionale.

Les résultats spécifiques sont par ailleurs donnés dans des rapports spécifiques à chaque commune :

- Microzonage sismique de la commune de Petit-Bourg : BRGM/RP-61787-FR,
- Microzonage sismique de la commune de Goyave : BRGM/RP-61785-FR,
- Microzonage sismique de la commune de Capesterre Belle-Eau : BRGM/RP-61786-FR,
- Microzonage sismique de la commune de Trois-Rivières : BRGM/RP-61784-FR,
- Microzonage sismique de la commune des Abymes : BRGM/RP-61984-FR,
- Microzonage sismique de la commune de Morne à l'eau : BRGM/RP-61985-FR,
- Microzonage sismique de la commune du Gosier : BRGM/RP-61986-FR,
- Microzonage sismique de la commune de Sainte-Anne : BRGM/RP-61987-FR,
- Microzonage sismique de la commune de Saint-François : BRGM/RP-61988-FR,
- Microzonage sismique de la commune du Moule : BRGM/RP-61989-FR.

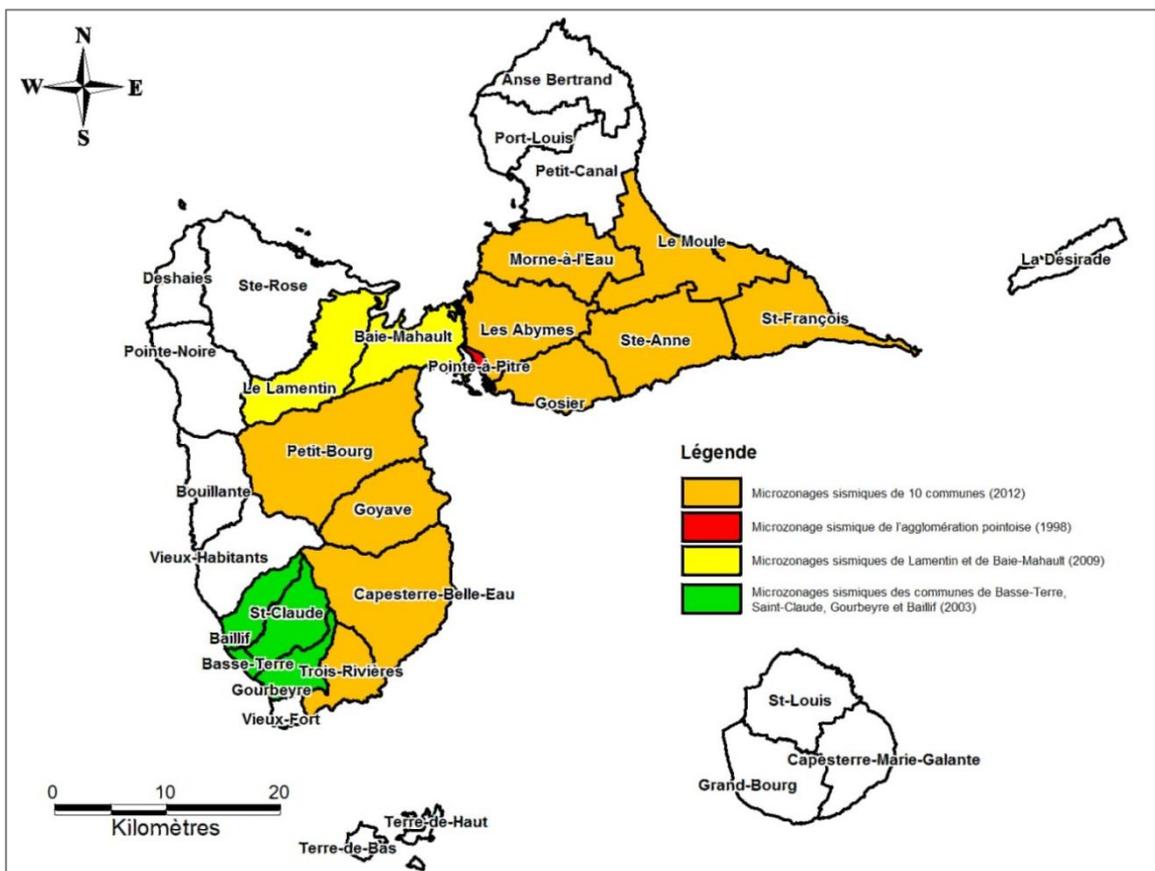


Figure 1 : Carte des communes de Guadeloupe faisant et ayant fait l'objet d'un microzonage sismique.

2. Contexte sismotectonique

2.1. GENERALITES

Pour comprendre le fonctionnement de la subduction au niveau de la Guadeloupe et de la Martinique, il est nécessaire de replacer cette région dans le contexte géodynamique global de l'arc insulaire des Petites Antilles. Nous ne reprenons ici que les grandes lignes du contexte géodynamique et tectonique. De nombreux travaux ont été récemment menés et nous invitons les personnes intéressées à consulter les rapports pour obtenir plus de détails ainsi que la bibliographie. Il s'agit de :

- Bengoubou-Valérius M. (2008). Contribution à la connaissance de l'aléa sismique dans les Antilles Françaises, Analyses des données sismologiques et accélérométriques régionales. *Thèse de doctorat, Université Antilles-Guyane, 187pp* ;
- Feuillet N. (2000). Sismotectonique des Petites Antilles. Liaison entre activité sismique et volcanique. *Thèse de Doctorat, Université Paris VII, 283 pp* ;
- Terrier M., Ph. Combes avec la collaboration de D. Carbon, B. Grellet, O. Sedan (2002) – Failles actives et évaluation de l'aléa sismique : Prise en compte des failles actives dans l'aménagement du territoire aux Antilles (Martinique et Guadeloupe). Partie 1 : Identification des systèmes de failles actives dans l'archipel de la Guadeloupe et l'île de la Martinique. *Rapport BRGM/RP-51258-FR, 118pp.*
- Terrier M., S. Bes-de-Berc (2007) - Réalisation d'un zonage sismique de la plaque caraïbe préalable aux choix de scénarios de tsunamis aux Antilles françaises - *Rapport BRGM/RP-55376-FR, 77pp.*

2.2. CONTEXTE GEODYNAMIQUE ET TECTONIQUE

Située à l'ouest de l'océan Atlantique, la plaque Caraïbe est un plateau océanique enchâssé entre les plaques Amérique du Nord et Amérique du Sud (Figure 2). Le contact de la plaque Caraïbe avec ces deux plaques est marqué au nord par le système décrochant sénestre de Polochic-Motagua et d'Enriquillo, puis au sud par le système décrochant dextre des failles de Pilar, Bocono, Oca et Dolorès-Guayaquil. La limite occidentale correspond à la subduction de la lithosphère océanique Cocos et Nazca à vergence Est. L'archipel des Petites Antilles constitue quant à elle la partie émergée d'une vaste structure qui borde à l'Est, la plaque Caraïbe. Cet arc insulaire est le résultat de la subduction de la lithosphère océanique Atlantique sous la plaque Caraïbe. Le taux de convergence est estimé à 2 cm/an.

L'arc insulaire des Petites Antilles est constitué d'une vingtaine d'îles principales qui s'étendent sur 850 km du passage d'Anégada au nord (marquant la limite actuelle avec les Grandes Antilles) à la marge continentale septentrionale de l'Amérique du Sud (zone de faille d'El Pilar au Venezuela oriental). Elle est divisée en deux arcs indépendants qui sont coalescents dans leur partie méridionale (de la Martinique à Grenade) et dédoublés de la Dominique au passage d'Anégada (*Andreieff et al., 1989*) : l'arc externe, dont l'activité volcanique est connue de l'Eocène à la base du Miocène, et l'arc interne, actif du Miocène supérieur à l'actuel.

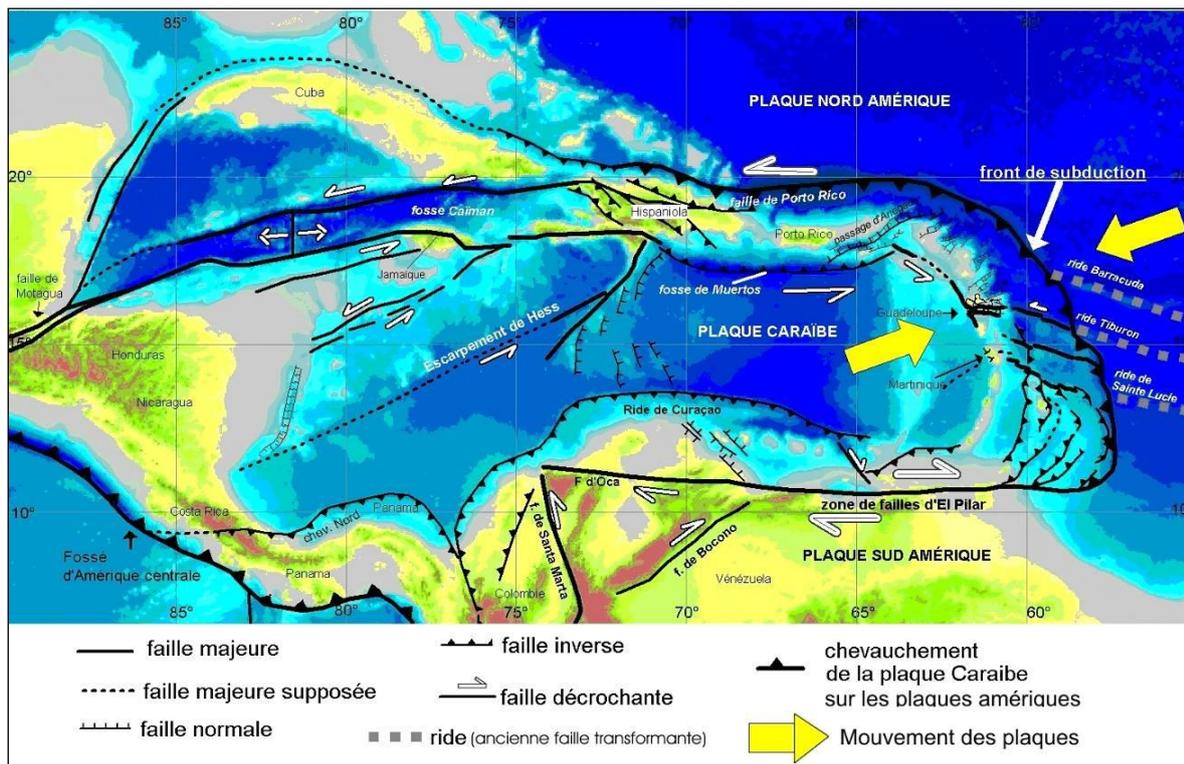


Figure 2 : Schéma structural de l'arc Caraïbes, d'après Stephan et al. (1990), Feuillet (2000), Taboada et al. (2000).

Le nord de l'arc des Petites Antilles est marquée dans le bassin d'avant arc par une tectonique distensive (Feuillet, 2000), avec une orientation de l'extension NW-SE, soit perpendiculaire à la direction de convergence des deux plaques. Ainsi entre les îles Vierges et la Guadeloupe, les failles actives de la plaque Caraïbe correspondent à deux directions majeures :

- les failles de direction E-W à NE-SW à jeu normal (Anegada, Anguilla, la Désirade, Marie-Galante) ;
- les failles de direction NW-SE à jeu normal à décrochant senestre (Bouillante, les Saintes).

A partir du sud de la Martinique, l'avant-arc est marqué par une tectonique compressive matérialisé par le prisme d'accrétion de la Barbade.

La convergence actuelle des plaques est non seulement marquée au niveau de l'arc des Petites Antilles par une activité volcanique importante (Soufrière Hills de Montserrat, Soufrière de Guadeloupe, Montagne Pelée de Martinique) mais aussi par une activité sismique importante, notamment dans la partie nord de l'arc.

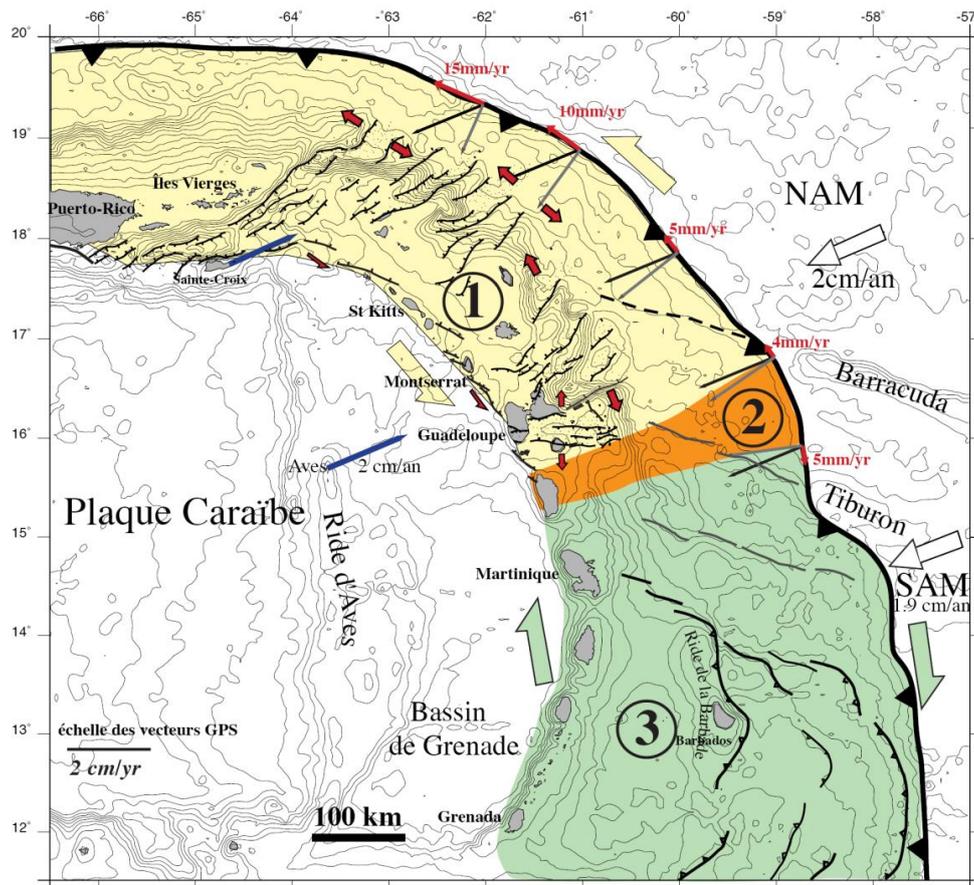


Figure 3 : Tectonique de l'arc antillais (Feuillet, 2000)

Flèche doubles rouges: direction locales d'extension déduites de la distribution et de la géométrie des failles. Demi-flèches rouges, glissement sur les failles normales-décrochantes ou décrochantes. 1, en jaune, zone de cisaillement normal-sénestre. 2, en orange, zone de transition. 3, en vert, zone de compression oblique dextre. Grandes demi-flèches jaunes et vertes: mouvement sénestre et dextre le long de la fosse, respectivement

La convergence actuelle des plaques est non seulement marquée au niveau de l'arc des Petites Antilles par une activité volcanique importante (Soufrière Hills de Montserrat, Soufrière de Guadeloupe, Montagne Pelée de Martinique) mais aussi par une activité sismique importante, notamment dans la partie nord de l'arc.

Certains séismes se produisent à l'interface de la subduction entre les plaques américaines et caraïbe. Le séisme du 8 février 1843, le plus fort connu dans l'Arc (magnitude estimée proche de 8, intensité IX en Guadeloupe et Antigua) est probablement dû à cette tectonique.

D'autres séismes, plus superficiels (foyer à moins de 30 km de profondeur et épicentre localisé à plusieurs dizaines de kilomètres à l'ouest du front de subduction), ont lieu dans la plaque chevauchante caraïbe. Ils sont dus au jeu des failles qui découpent la plaque caraïbe (séismes intraplaques caraïbes). Le séisme du 21 novembre 2004, de magnitude 6,3, localisé entre les îles de la Dominique et des Saintes, est lié au rejeu de l'une d'entre elles.

Le front de subduction principal est recoupé par des rides océaniques (rides de Barracuda, Sainte Lucie, Tiburon (Figure 3) qui correspondent vraisemblablement à d'anciennes failles transformantes liées à l'ouverture de l'Océan Atlantique. Ces rides auraient une influence sur la structure actuelle de la zone de subduction.

Ainsi, jusqu'à 50 à 60 km de profondeur, le pendage de la plaque subductée Amérique sous la plaque Caraïbe est de 25°W au nord de la ride de Sainte Lucie, tandis qu'au sud de la ride, le plan de subduction a une pente de seulement 10° à 15°W. (Godefroy *et al.*, 1990 et 1991 ; Martin *et al.*, 2002).

Entre 60 km et 150 km de profondeur environ, l'angle de plongement de la plaque Amérique sous la plaque Caraïbe s'accroît puisqu'il atteint entre 50 et 60°W (50°W sous la Guadeloupe, Figure 4).

Au-delà de 150 km de profondeur débute la fusion partielle de la plaque subductée, à l'origine des ascensions magmatiques de l'arc des Petites Antilles.

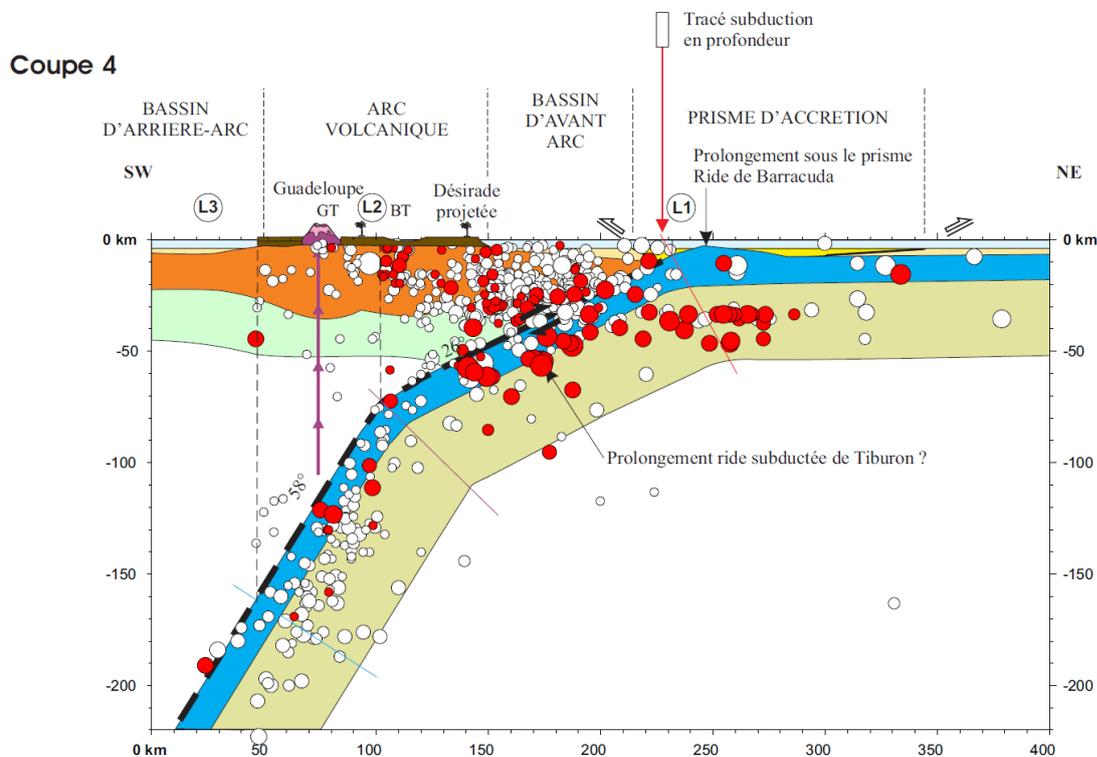


Figure 4 : Coupe de la subduction à hauteur de la Guadeloupe (d'après Martin *et al.*, 2002).

3. Analyse géologique

3.1. PRESENTATION GEOLOGIQUE GENERALE DE LA GUADELOUPE

La subduction de la plaque nord-américaine sous la plaque caraïbe (Figure 2) se caractérise par un magmatisme de type calco-alcalin important qui s'exprime en surface par la formation d'îles volcaniques alignées le long d'un arc insulaire (de Saba au Nord à Grenade au Sud). Sur ces îles, l'activité éruptive est dominée par des phénomènes effusifs (coulées de lave andésitique prédominantes et basaltique subordonnées) et surtout explosifs (éruptions pliniennes, formation et destruction de dômes, nuées ardentes, coulées de ponce dominées par des compositions andésitiques à dacitiques).

Les 2 îles principales (Basse-Terre et Grande-Terre) et les dépendances (La Désirade, Marie-Galante et les Saintes) peuvent être séparées en 2 ensembles géomorphologiquement bien distincts correspondant à des histoires géologiques très différentes.

Grande-Terre, la Désirade et Marie-Galante appartiennent à l'Arc externe des Antilles ou arc éteint (ou Antilles Calcaires). Elles sont essentiellement constituées de terrasses calcaires subhorizontales d'origine marine et d'âge pléistocène (1 à 2 Ma) qui se sont édifiées sur des socles volcaniques très anciens (probablement pré-miocènes ; 30 à 50 Ma) et aujourd'hui disparus, sauf à la Désirade où du magmatisme d'âge Jurassique et oligocène subsiste à l'affleurement sous forme de rhyolites (Westercamp et Tazieff, 1980).

Basse-Terre et les Saintes appartiennent à l'arc interne des Antilles ou arc actif, dont des îles sont essentiellement constituées de formations volcaniques récentes et de leurs produits de démantèlement. Basse-Terre et les Saintes se sont édifiées au cours des 3 à 4 derniers millions d'années, mais le volcanisme actif ne se limite plus qu'au massif de la Grande Découverte-Soufrière où subsiste à ce jour une activité de fumeroles intense.

Le zonage géologique préliminaire a pour but d'affiner la carte géologique (Reynal de Saint-Michel, 1966 ; 1/50 000ème) sur les différentes lithologies en profondeur et dans l'espace. Il initie l'analyse géotechnique qui identifiera et caractérisera une ou plusieurs colonnes de sol représentatives de chaque zone qui sera définie par un spectre de réponse sismique.

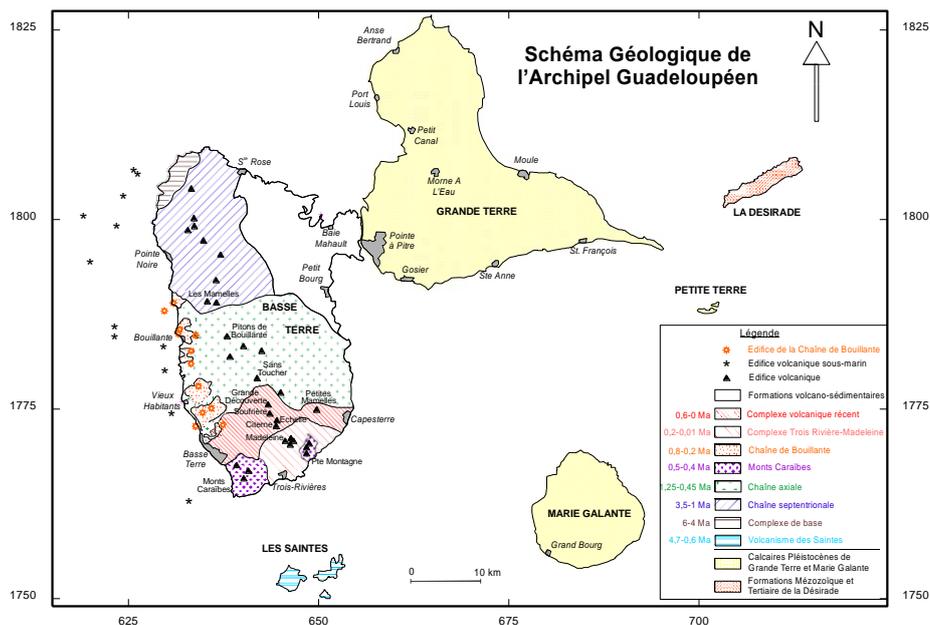


Figure 5 : Schéma géologique simplifié de la Guadeloupe.

3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA BASSE-TERRE

Quatre des dix communes étudiées sont situées au sud-est de l'île de Basse-Terre. L'île de Basse-Terre résulte de la juxtaposition spatio-temporelle de sept complexes éruptifs principaux (du plus vieux au plus jeune) : le complexe de base, le massif septentrional, la chaîne axiale, les Monts Caraïbes, la chaîne de Bouillante, le complexe de Trois-Rivières-Madeleine et le massif Grande Découverte – Soufrière (Figure 5).

Chaque complexe contient plusieurs centres éruptifs distincts qui forment une chaîne volcanique de 55km de long pour 25 km de large et de direction NNW, culminant à 1467 m au dôme de la Soufrière, formé au cours de la dernière éruption magmatique datant de 1530 AD.

3.2.1. Données utilisées

L'établissement de l'analyse géologique de la Basse-Terre a été défini à partir des documents suivant :

- La carte géologique de la Basse-Terre au 1/50000ème et de sa notice (Reynal de Saint-Michel, 1966). Les informations géologiques contenues dans cette carte sont généralement considérées aujourd'hui comme obsolètes. Les âges indiqués sont souvent erronés. Si la nature complexe de l'ensemble volcano-sédimentaire du nord-est de la Basse-Terre est reconnue, son extension sur la carte est sans doute trop large par rapport à la réalité.
- la carte géologique de la Soufrière au 1/20000ème et de sa notice (IPGP-BRGM, 1988),
- La carte géologique interprétée des sondages électriques du Nord-Est de la Basse-Terre (Paulin, 1988) ;
- L'atlas des zones inondables et zones alluviales de Egis Eau (2002) ;
- La carte IGN 2002 ;
- L'orthophotographie 2004 ;
- Les sondages de la banque de données du Sous-Sol (BSS) ;

- Les sondages des études géotechniques rassemblés lors de la synthèse documentaire.

3.2.2. Analyse géologique de la Basse-Terre

La zone d'étude est située au sud-est de la Basse-Terre, marquée par la présence du volcan actif de la Soufrière. La Soufrière est un volcan andésitique d'arc insulaire. C'est le plus récent et le plus élevé (1467 m) de l'île de Basse-Terre. La Soufrière proprement dite correspond à la zone d'activité actuelle du massif qui se caractérise par un volcanisme fissural : il est composé par la juxtaposition d'appareils volcaniques monogéniques alignés le long d'un axe fissural majeur de direction NNW-SSE.

Le massif de la Soufrière, composé de la juxtaposition d'édifices, présente une structure complexe. Son substratum est constitué par les produits volcaniques appartenant aux trois ensembles volcano-structuraux présents sur l'extrémité méridionale de l'île :

- La « chaîne axiale », au nord composée d'un ensemble de volcans (Pitons de Bouillante, Sans-Toucher, Montagne de Capesterre) mis en place entre -1.5 et -0.6 Ma. Le caractère effusif se traduit par la mise en place de nombreuses coulées massives ;
- Les Monts Caraïbe au sud, volcans morphologiquement bien individualisés, mis en place il y a environ -0.5 Ma, suivant une direction originale ENE-WSW. L'activité volcanique débute sous la mer et se prolonge par des éruptions de type subaquatique. Il en résulte une importante accumulation de hyaloclastites. L'activité s'achève par l'effusion aérienne de coulées et de dômes ;
- La chaîne de Bouillante affleurant sur la côte occidentale, représentée « à travers le massif », est constituée d'une série de petits appareils volcaniques, au dynamisme essentiellement hydromagmatique, dont l'activité s'étend entre environ -0.8, -0.6 Ma et le début de l'édification du Massif de la Soufrière c'est à dire -0.25/-0.14 Ma.

Le massif de la Madeleine-Soufrière représente le volcanisme récent et actuel de l'île. Sa mise en place est synchrone de l'activité terminale de la chaîne de Bouillante. On y distingue trois principales unités :

- Le volcan composite de la Grande Découverte ;
- L'ensemble éruptif de la Madeleine. Il est essentiellement effusif et a donné lieu vers le sud et l'est, à d'importantes coulées massives dont les points d'émission sont ponctués par des dômes ;
- Le dernier ensemble est constitué d'un groupe de volcans récents, dont la dernière manifestation effusive se traduit par la mise en place du dôme de la Soufrière, en l'an 1530 de notre ère.

L'activité actuelle de la Soufrière est marquée par l'émission continue de fumerolles, la présence de nombreuses sources chaudes et l'occurrence régulière d'éruptions phréatiques. On en dénombre six depuis trois siècles.

L'analyse de la carte géologique du massif de la Soufrière et de sa notice (Dagain et al., 1988) montre que trois grands types de formations volcaniques constituent le massif et son substratum :

- Des coulées de laves massives, en quasi-totalité de nature andésitique ;
- Des formations pyroclastiques, généralement de même nature pétrographique : coulées de ponces, scories, cendres, nuées ardentes. Ces dépôts ne couvrent en général, à l'affleurement que de faibles surfaces ;

- Des coulées de débris et lahars. Ces formations se rencontrent principalement dans les vallées et couvrent de vastes étendues à l'Est de l'édifice volcanique. Leur épaisseur varie de quelques mètres à une dizaine de mètres.

Les formations superficielles sont :

- soit des alluvions récentes ou anciennes, essentiellement développées dans la partie aval du lit des cours d'eau. Elles sont remplacées par les vases à palétuviers à proximité des embouchures ou de sables volcaniques.
- soit des argiles issues de l'altération des roches volcaniques sous climat tropical. Leur épaisseur est variable selon l'âge de la formation. L'altération des laves massives se fait au dépend d'un réseau préexistant de fractures (générées pour l'essentiel lors du refroidissement de la lave et de sa solidification, équivalentes à des fentes « de retrait »). L'eau s'y infiltre et individualise ainsi des boules de laves. Ces boules s'altèrent à leur tour, de façon concentrique, et donnent des structures en « pelures d'oignon ». La matrice est argilo-sableuse, riches en minéraux altérés résiduels.

3.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA GRANDE-TERRE

Six des dix communes étudiées se situent en Grande-Terre (Figure 1).

3.3.1. Données utilisées

Le contexte géologique général est défini sur la base de :

- la carte géologique au 1/50 000^{ème} de Grande-Terre et de sa notice (Garrabé et Andreieff, 1988),
- la thèse de doctorat de J. L. Léticée sur l'étude de la plate-forme carbonatée de Grande-Terre (Léticée, 2008),
- du modèle géologique 3D du sous-sol de la région pointoise (Bourdon et al, in prep)
- des rapports du BRGM Guadeloupe (cf bibliographie) traitant de l'île de Grande-Terre (et notamment des études réalisées par le BRGM dans les années 70 pour la recherche en eau souterraine) qui fournissent localement des indications sur la nature des terrains, leur comportement géomécanique, leur épaisseur, etc.
- des dossiers de sondages référencés dans la BSS
- de plusieurs études géotechniques récoltées lors de la synthèse documentaire.

Par ailleurs, une centaine de dossiers de sondages référencés dans la banque de données du sous-sol ont été consultés. En complément, cette analyse a aussi tenu compte de plusieurs études géotechniques disponibles auprès des bureaux d'études et obtenus avec l'accord des services techniques des mairies concernées. 416 points de sondages supplémentaires ont pu ainsi être obtenus, la moitié concernant les six communes étudiées, l'autre moitié située sur les territoires des Abymes et de Gosier. Enfin, ce travail de synthèse a été complété par quelques observations sur le terrain.

En plus de ces données, l'analyse géologique a pris en compte les cartes IGN de 2002 et de 1950 (pour identifier notamment les zones remblayées) ainsi que localement, l'orthophotographie de 2004 de l'IGN.

3.3.2. Analyse géologique des communes de la Grande-Terre

L'ensemble du sous-sol de Grande-Terre est constitué par une immense et épaisse plate-forme carbonatée (>120 m) qui a enregistré la séquence stratigraphique Plio-pléistocène la plus complète des petites Antilles. Cette plate-forme carbonatée repose sur un soubassement d'origine volcanique et/ou plutonique probablement d'âge Eocène ou Oligocène qui n'a jamais été retrouvé (aussi bien en forage qu'à l'affleurement).

L'ensemble de cette plate-forme carbonatée se serait déposée selon les dernières études depuis le Pliocène supérieur jusqu'à l'émersion finale de l'île il y a environ 450 000 ans. Pendant et postérieurement à sa construction, elle a subi une tectonique active qui s'exprime par la présence de nombreuses failles dont certaines sont encore morphologiquement très bien marquées dans le paysage (Ex : Faille du Gosier). Sous les effets de déformations de la lithosphère à l'échelle de l'arc des Petites Antilles cette fois, la plate-forme carbonatée de Grande-Terre présente un basculement généralisé vers l'Ouest de quelques degrés, ce qui explique la présence de hautes falaises à l'Est et de côtes basses à l'Ouest. Localement, ce basculement généralisé peut être contrarié par la présence de compartiments effondrés créés par la tectonique locale (Ex : sud du Gosier, avec un basculement vers le sud). Du point de vue géographique, cela a conduit à former 3 grandes entités remarquables. La première est constituée par les Grands-Fonds qui correspondent aux sommets les plus élevés de l'île et présentent un modelé karstique très évolué constitué de collines (ou « mornes ») entourés de vallées hydrographiques. Dans cette partie de l'île, surélevée par rapport au reste, l'érosion a fait disparaître presque entièrement le haut de la colonne stratigraphique de Grande-Terre (et notamment la formation des calcaires à polypiers ; cf. ci-dessous). La deuxième entité est constituée par les Plateaux du Nord, située précisément au Nord des Grands-Fonds et séparée de ces derniers par un remarquable bassin d'effondrement aujourd'hui pour partie comblé par des remplissages argileux : la plaine des Grippons. A l'Est enfin, on retrouve les Plateaux de l'Est, qui comme ceux du Nord, possèdent une topographie peu accidentée, sauf présence de blocs soulevés ou basculés par des failles locales. Sur ces deux entités où l'érosion est faible, on retrouve presque uniquement la partie haute de la colonne stratigraphique de Grande-Terre et notamment les calcaires à polypiers. On notera enfin à l'Ouest des Grands-Fonds, une plaine de taille plus réduite ; la Plaine des Abymes qui occupe une partie de la commune du même nom ainsi qu'une portion de la commune de Morne à l'Eau.

Depuis l'établissement de la carte géologique de Grande-Terre en 1988, des études récentes (Léticée, 2008) ont revu significativement le découpage des unités lithostratigraphiques définies auparavant. Nous nous baserons sur le résultat de leurs études pour la description lithostratigraphique à venir en rappelant la terminologie utilisée dans la carte de 1988.

Dans cette colonne lithostratigraphique (Figure 6), on distingue 3 entités principales : le groupe des calcaires à rhodolites en partie inférieure, le groupe des calcaires à polypiers, en partie supérieure et les formations superficielles de natures très variées.

a) Le groupe des Calcaires à rhodolites

La série calcaire la plus ancienne de Grande-Terre est constituée par l'unité des calcaires inférieurs. Elle comprend elle-même trois niveaux (du plus ancien au plus récent) : P1, PvS et P2IV rebaptisés P1, P2 et P3 par Léticée (2008). L'unité la plus ancienne, P1 est constituée de calcaires pulvérulents biodétritiques à rhodolites qui sont des nodules à encroûtement calcaire d'origine algale et qui sont typiques d'un environnement de plate-forme peu profonde à haute énergie. Localement, ces calcaires sont connus sous le nom de « tufs ocres » en raison de leur couleur rouille à orangé. Son épaisseur maximale est estimée à une soixante de mètres.

Au-dessus de cette série à rhodolites, on retrouve une surface d'érosion majeure (S0) correspondant à un arrêt de la sédimentation carbonatée et au dépôt d'un niveau volcano-sédimentaire peu induré, constitué de sables et de conglomérats à éléments volcaniques présentant parfois un début d'encroustement algaire. Il s'agit d'un niveau repère que l'on retrouve sur l'ensemble de la Grande-Terre même si son épaisseur diminue fortement de l'Ouest (env. 10 m) vers l'Est (<1 m). Baptisé PvS (ou P2 par Léticée, 2008), l'organisation interne de ce niveau indique qu'il correspond probablement à un ancien environnement de type deltaïque (avec la présence de nombreux chenaux) dont l'origine des éléments volcaniques serait située (compte-tenu de l'âge estimé de ce niveau entre 1,95-1,77 Ma) au niveau de l'actuelle Chaîne Septentrionale de Basse-Terre. En raison de son épaisseur relativement faible, il n'est pratiquement jamais figuré sur la cartographie du zonage géologique (sauf sur la commune des Abymes), mais systématiquement indiqué dans les colonnes de sols lorsqu'il est présent.

Au-dessus de cet horizon volcano-sédimentaire, on retrouve une nouvelle formation à rhodolites liée à une surface de transgression. Il s'agit du P2IV ou P3 de Léticée (2008). Elle est constituée d'un calcaire à rhodolites avec des apports volcanogènes nets, un peu plus indurée que la formation à rhodolites inférieure. Au sommet de cette formation, on trouve une calcarénite relativement massive à apports volcanogènes et à rhodolites mais qui contient également des blocs coralliens isolés qui annoncent un changement de faciès. Son épaisseur maximum est estimée à une trentaine de mètres.

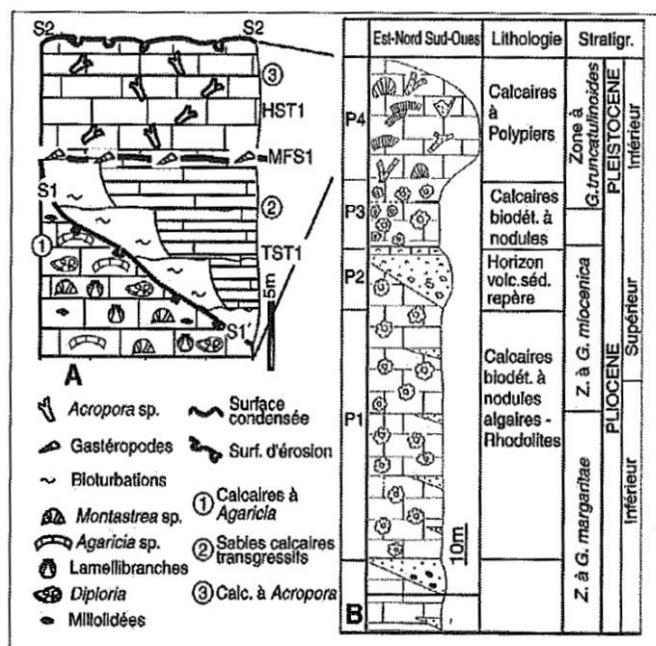


Figure 6 : Colonne lithostratigraphique représentative de la Grande-Terre (Léticée,2008).

b) Le groupe des calcaires à polypiers

Initialement nommé PIVi lors de l'établissement de la carte géologique en 1988, le niveau des calcaires à polypiers a récemment été subdivisé en 2 unités distinctes par Léticée (2008) sur la base de la reconnaissance d'une discontinuité émergitive majeure au sein de cette plate-forme carbonatée. Contrairement aux niveaux à rhodolites, les calcaires à polypiers sont généralement beaucoup plus massifs.

Dans ce groupe, on distingue donc à la base une formation de calcaires massifs blancs biodétritiques à *Agaricia* (polypiers) et quelques rhodolites contenant des colonies coralliennes isolées et des éléments volcanogènes. Cette unité a été nommée R1 par Léticée (2008).

Au-dessus, on retrouve une surface d'érosion majeure correspondant à l'émersion de la plateforme carbonatée aux environs de 670 000 ans. Elle présente des encoches karstiques remplies d'argiles de décalcification et des paléosols.

Au-dessus, l'unité R2 correspond à des faciès de transgression où on retrouve des niveaux sableux calcaires à éléments volcaniques correspondant à des faciès de plage, immédiatement recouverts par des calcaires bioclastiques et gréseux à constructions coralliennes isolées.

Enfin, au sommet de l'unité, un calcaire dur et massif à *Acropora* (polypiers) signe la fin de la sédimentation de la plate-forme calcaire de Grande-Terre qui émerge définitivement aux environs de 400 000 ans. Au sommet de la série à *Acropora*, on retrouve donc classiquement des faciès karstifiés parfois sur plusieurs mètres d'épaisseur remplis d'argiles de décalcification. Cette karstification est marquée par la présence de gouffres, dolines et quelques cavités souterraines qui sont particulièrement visibles sur les falaises Est et Nord de Grande-Terre.

c) Les formations récentes et superficielles

Les formations récentes ou superficielles sont principalement de 5 types.

- **Les argiles de décalcification** et sols associés.

Ces argiles sont le résultat de la dissolution des calcaires par l'eau météorique légèrement acide qui va laisser intacte en surface la fraction argileuse toujours présente (quoique dans des proportions variables) dans les formations calcaires (et notamment via les éléments d'origine volcanique). En Grande-Terre, cependant, ces argiles de décalcification et le sol peu développé (généralement constitué de vertisols à montmorillonite) qu'elles portent, sont généralement peu épaisses et facilement mobilisées par les pluies tropicales. Au sommet des mornes de Grande-Terre, il n'est donc pas rare d'être au contact direct du substratum calcaire. Ces argiles vont cependant préférentiellement s'accumuler dans les points bas topographiques et notamment en fond de vallées ou dans des fossés d'effondrement (ex. Plaine des Grippons, Plaine de la Simonière, plaine des Abymes). Suivant leur position géographique, leur épaisseur peut grandement varier et elles peuvent se former aux dépens des différentes formations calcaires déjà recensées ci-dessus ou aux dépens d'anciennes surfaces d'abrasion liées à des récifs soulevés.

- **Les vases de mangrove**

Elles constituent des zones de transition entre les zones argileuses des plaines ou vallées de Grande-Terre et le milieu marin et sont caractérisées par de fortes teneurs en matières organiques. On y retrouve des proportions importantes d'argiles, de sables et de graviers limoneux interstratifiés (dont les dépôts sont liés aux variations du niveau marin au cours de l'Holocène) parfois surmontés d'un niveau de tourbière à proximité de la terre ferme.

- **Les sables de plages et paléoplages**

Très nombreuses notamment sur la côte sud de Grande-Terre, les plages sont essentiellement constituées d'un sable calcaire corallien dont l'origine est le démantèlement de la barrière corallienne ou des récifs frangeants. Ces plages dépassent rarement quelques dizaines de mètres de large mis à part quelques situations exceptionnelles comme le bourg de Sainte Anne

ou la Grande Baie à Gosier où l'urbanisation a gagné sur des paléoplages de plusieurs mètres d'épaisseur.

- **Les récifs soulevés**

Il s'agit de formations coralliennes massives soulevées au grès des mouvements tectoniques régionaux à l'échelle des petites Antilles et/ou des variations eustatiques du niveau marin. On les retrouve essentiellement sur la côte Est, de Saint-François au Moule.

- **Les remblais anthropiques**

Bien qu'il ne s'agisse pas de formations superficielles naturelles et que leur nature soit souvent difficile à déterminer, nous avons choisi de faire figurer les remblais anthropiques sur le zonage géologique pour deux raisons principales : 1) ils recouvrent parfois des superficies très étendues, suffisamment pour être cartographiées (ex : Aéroport de Pointe-à-Pitre, Gosier, Bourgs de Saint-François et du Moule) et 2) ils ont souvent été réalisés au détriment de zones humides et notamment de zones vaseuses de mangrove (que l'on retrouve dans des forages réalisés *a posteriori*). Leur influence en termes de réponse sismique peut donc être potentiellement importante. La nature de ces remblais est souvent difficile à déterminer mais il s'agit dans la grande majorité des cas de tout-venant calcaire provenant de Grande-Terre (et notamment du groupe des calcaires à rhodolites, cf. ci-dessus).

Une présentation détaillée de l'analyse géologique de chacune des communes étudiées est présente dans les rapports spécifiques à chaque commune.

4. Aléa sismique régional

4.1. SISMICITE AU NIVEAU DE LA GUADELOUPE

4.1.1. Sismicité historique

L'activité sismique des Antilles est particulièrement intense, et de nombreux séismes destructeurs ont affecté les îles de Guadeloupe et Martinique. Les principaux séismes historiques de la région sont reportés sur la Figure 7 d'après la base de données SISFRANCE. Une dizaine de séismes sont ressentis avec au moins une intensité VI MSK sur au moins une des 10 communes étudiées (cf. Tableau 1).

An	mois	jour	Long.	Lat.	Prof.	Source loc.	Mi	Mw	Intensité épicrotrake	Source mag.
1735	7	27	-61.80	16.65		SISFRANCE	7		VII	Martin et al. (2002)
1843	2	8	-61.15	16.75	50	BRGM	8		IX	Martin et al. (2002)
1851	5	16	-61.47	16.03	10	SISFRANCE	5.5		VII	Martin et al. (2002)
1870	6	9							-	
1897	4	29	-61.53	16.20	7	SISFRANCE	6.5		VII	Martin et al. (2002)
1966	11	13	-61.94	17.05	92	ISC		5.4	-	IPGH
1967	12	24	-61.19	17.42	42	ISC		6.7	-	IPGH
1969	12	25	-59.64	15.79	1	ISC		7	VII	IPGH
1974	10	8	-61.99	17.37	41	ISC		7.3	VIII	IPGH
2004	11	21	-61.53	15.76	14	CDSA		6.3	VIII	GCMT

Tableau 1 : Liste des séismes destructeurs ayant produit au moins une intensité MSK \geq VI sur l'une des communes de la zone d'étude (Données SISFRANCE/Antilles, 2009). Les magnitudes indiquées sont issues des catalogues de Martin *et al.* (2002), MIDAS-IPGH et de Global CMT.

Les dommages proviennent aussi bien de séismes superficiels proches (1851, 1897, 2004) que de forts séismes de subduction (1843, 1969).

- Nous avons très peu d'observations sur le séisme de 1735 pour lequel une intensité VII-VIII a été atteinte à Petit-Bourg.
- Le plus destructeur est le séisme du 8 février 1843 (au Nord Est de la Guadeloupe) avec une intensité VIII ou IX sur toutes les communes.
- Le séisme de 1851 a produit des dommages sur Capesterre B.E. (VI-VII), Goyave, Petit Bourg, Trois-Rivières mais pas sur la Grande Terre.

- Le séisme de 1870 (vers la Dominique, pas de localisation précise) a produit des intensités VI-VII à Trois-Rivières et Capesterre-B.E., VI au Moule et à Saint François.
- Le séisme du Petit Cul de Sac marin de 1897 a affecté avec une intensité VII à VII-VIII les communes de Petit-Bourg, Goyave, Capesterre B.E., Gosier, Abymes. Pas de dommages signalés pour Trois-Rivières, Sainte Anne, Morne à l'eau, le Moule et Saint François.
- Le séisme de 1974 (Mw ~7.3 au Nord d'Antigua) a affecté les 10 communes avec une intensité VI.
- 4 autres séismes (1966, 1967, 1969 et 2004) ont produit des dommages légers (intensité VI) sur quelques communes de la zone d'étude.

La période de retour d'une intensité VI ou plus se situe entre 30 à 70 ans d'après les observations disponibles depuis 1800. La sismicité historique ne permet de disposer d'informations que sur une courte période (trois siècles et demi), ce qui reste insuffisant pour avoir une vision exhaustive de la sismicité locale et régionale.

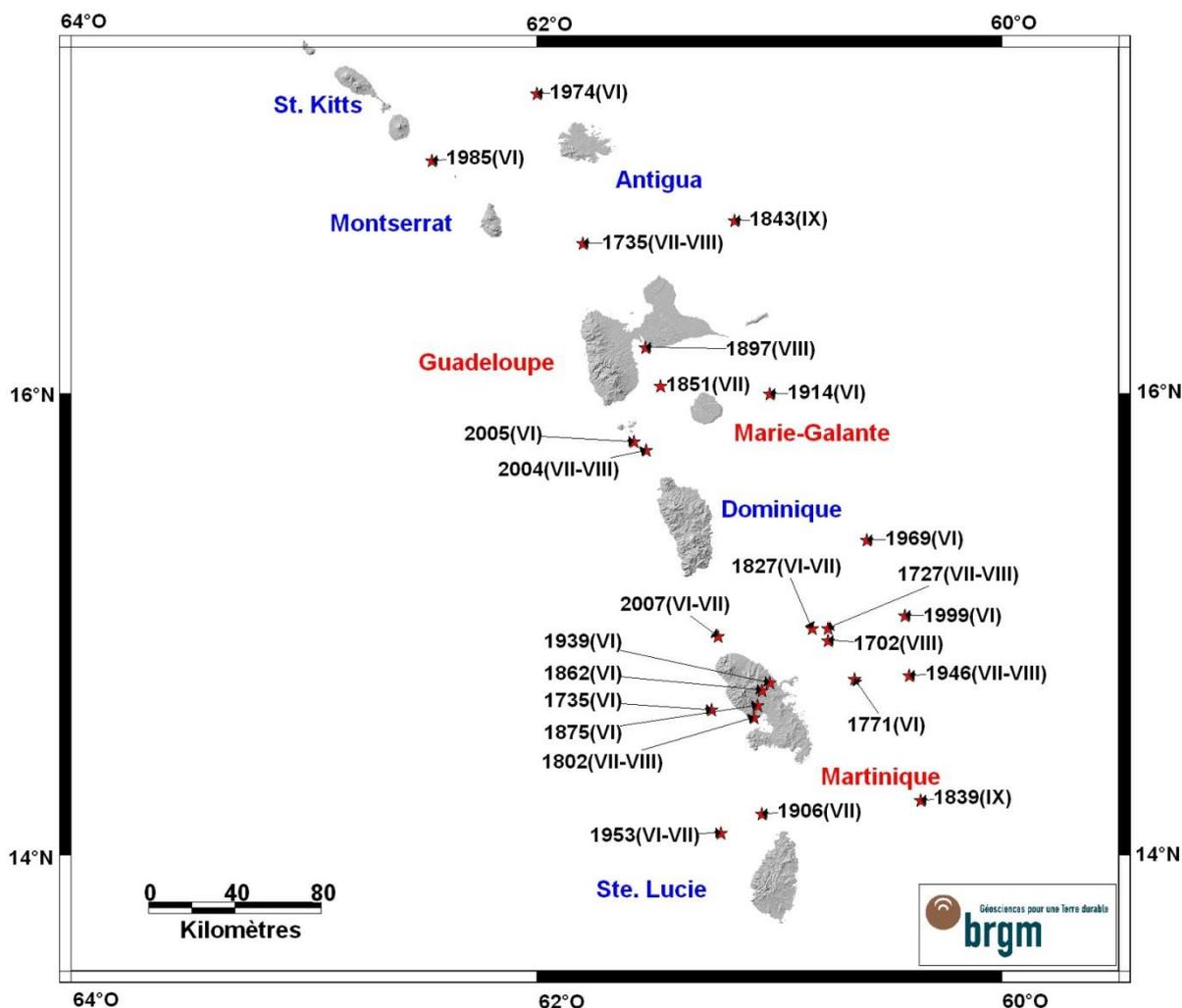


Figure 7 : Principaux séismes fortement ressentis dans la Région (intensité MSK ≥ VI). Données SisFrance/Antilles, 2009.

4.1.2. Sismicité instrumentale

La sismicité instrumentale au niveau de l'arc antillais se caractérise par trois types de séismes distincts :

- Les séismes volcaniques liés au fonctionnement des volcans actifs ;
- Les séismes de subduction parmi lesquels on distingue les séismes interface (à l'interface des plaques Caraïbes et Amérique) des séismes intraplaque (dans la plaque Amérique) ;
- Les séismes superficiels crustaux intraplaques Caraïbe.

La sismicité instrumentale sur la Guadeloupe pour la période 1999-2005 est représentée sur la Figure 8. La sismicité superficielle à proximité des communes étudiées est faible et diffuse mais pas inexistante. Aucun n'atteint la magnitude 4 en dehors de la zone des Saintes.

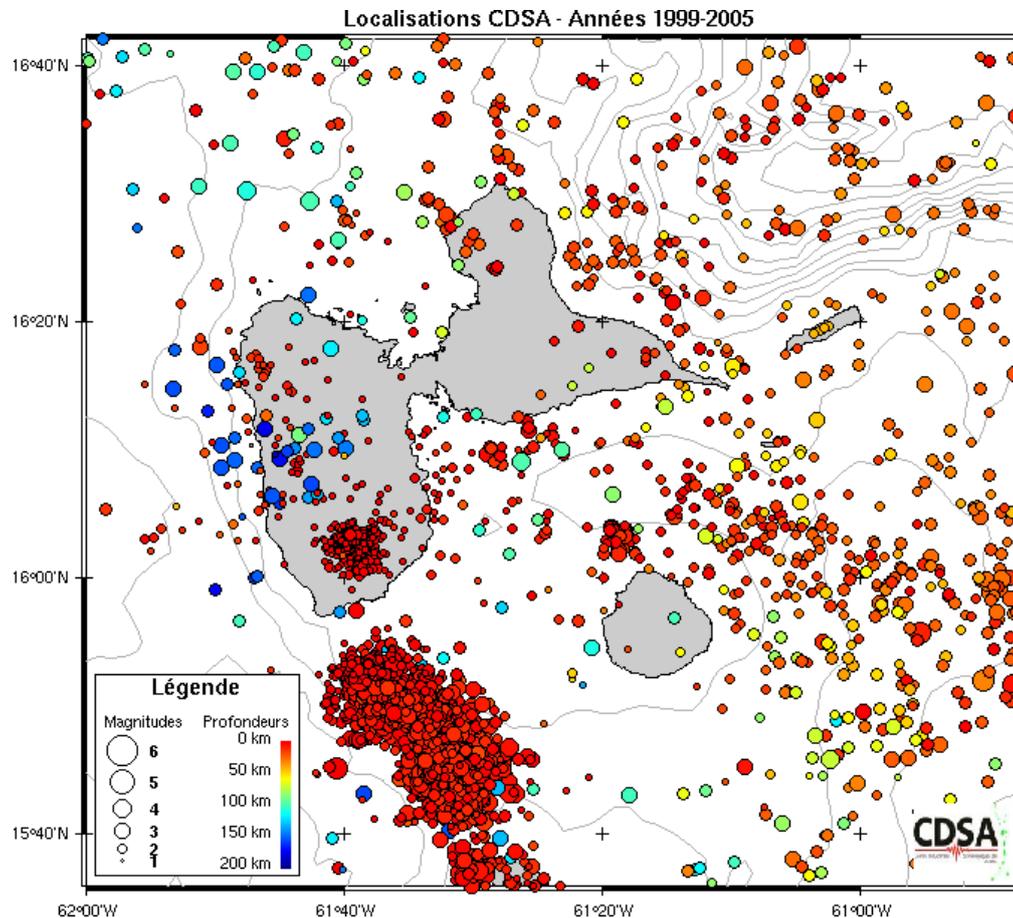


Figure 8 : Catalogue de sismicité instrumentale 1999-2005 du Centre de Données Sismologiques des Antilles (CDSA).

On observe deux essais majeurs, le plus important au sud de la Guadeloupe qui se concentre sur les Saintes, est dû aux répliques suite au séisme du 21 novembre 2004, le second qui se concentre au sud de la Basse-Terre est dû à la sismicité volcanique qui reflète l'activité volcanique de la Soufrière.

4.2. MOUVEMENT SISMIQUE DE REFERENCE AU ROCHER

4.2.1. Méthodologie adoptée

D'après le guide de réalisation des PPR sismique (Fabriol et Garry, 2002), l'aléa sismique régional et donc du mouvement sismique de référence se définit de la manière suivante : ***Le niveau C se caractérise, entre autres, par la possibilité de définir un séisme de référence propre au périmètre d'étude à partir d'une approche déterministe ou probabiliste. La méthodologie suivie est comparable à celle utilisée pour les installations classées « à risque spécial ». Le spectre de réponse au rocher du séisme de référence est calculé à l'aide d'une ou plusieurs lois d'atténuation du signal sismique en fonction de la distance. Le bureau d'étude doit expliquer les procédures suivies.***

En l'absence d'étude spécifique pour évaluer le niveau d'aléa sismique régional et le spectre de réponse au rocher à retenir sur les 10 communes, on se basera sur l'étude d'aléa sismique probabiliste de Geoter (Martin et al., 2002). Le spectre de réponse au rocher du séisme de référence aura des caractéristiques similaires à ceux des autres microzonages sismiques récents des Antilles françaises pour lesquels des études spécifiques ont été conduites (en particulier Basse Terre, Baie-Mahault-Lamentin pour la Guadeloupe et Vauclin et Saint Joseph pour la Martinique). De même, les séismes de référence ne changent pas par rapport aux études précédentes de microzonages.

Dans la démarche adoptée dans notre étude :

- on vérifiera s'il y a besoin de définir un ou plusieurs spectres au rocher pour l'ensemble des 10 communes ;
- le spectre de réponse au rocher sera choisi en cohérence avec l'étude d'aléa sismique probabiliste de Geoter (Martin et al., 2002) ;
- le spectre de réponse retenu est comparé aux spectres forfaitaires de la réglementation et à ceux des autres études régionales.

L'aléa sismique local est défini comme une modification d'un mouvement sismique de référence défini au rocher (aléa régional) par les caractéristiques géomécaniques ou topographiques des sites.

Dans notre démarche il est également proposé de rendre le résultat de « l'aléa local » indépendant de « l'aléa régional » préconisé. En effet, dans les démarches classiques de microzonage sismique, les caractéristiques de l'aléa local intègrent le niveau d'agression régional qui a été utilisé. En cas de changement de la réglementation nationale ou si la puissance publique décide de changer le niveau d'agression sismique régionale à prescrire dans le PPR, des études complémentaires sont alors nécessaires pour redéfinir les formes de spectres.

La méthodologie présentée au paragraphe 5.5 explique comment reconstituer les spectres des différentes classes de sols identifiées en fonction de la référence au rocher que l'on décide de prendre. Ainsi, même si dans notre étude, nous utilisons un niveau d'aléa régional fixé, les spectres des classes de sols peuvent être recalculés facilement si la référence de mouvement sismique au rocher change.

4.2.2. Aléa sismique régional d'après l'étude probabiliste de Geoter (Martin et al., 2002)

En 2002, le bureau d'étude GEOTER a réalisé, pour le compte du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), une étude d'aléa sismique probabiliste couvrant l'ensemble du territoire français. Cette étude a servi de base à la carte nationale d'aléa sismique transposée en zonage sismique réglementaire accompagnant la réglementation de construction parasismique basée sur les règles Eurocode 8 (AFNOR, 2005).

Cette étude (Martin *et al.*, 2002) propose pour les Antilles un spectre d'aléa uniforme pour une période de retour de 475 ans et pour des accélérations spectrales de 0, 0.2, 0.5 et 1 seconde. Le spectre est calculé sur une grille de points espacés de 0-1° répartis sur l'ensemble de l'Arc Antillais. Les incertitudes sur les paramètres d'activité sismique et les modèles d'atténuation sont pris en compte avec une représentation du spectre en valeurs médianes et des percentiles 15% et 85 %.

Pour chacune des 10 villes et pour une période de retour de 475 ans, les valeurs de PGA (Peak Ground Acceleration) et les accélérations spectrales à 0.2s, 0.5s et 1.0 s sont illustrées sur le Tableau 2 et la Figure 9.

Le niveau d'aléa le plus fort correspond à la ville du Moule (PGA 283 cm/s²), le plus faible à Trois-Rivières (246 cm/s²). L'écart entre le minimum et le maximum est de 13 %. Pour les 10 communes, ces PGA de 250-280 cm/s² correspondraient à une intensité ressentie de VII sur des sols rocheux et supérieure à VII en présence d'effets de site.

En faisant l'exercice de normaliser toutes les accélérations spectrales par rapport au PGA (Tableau 3), il n'y a pas de différence significative d'un spectre à un autre.

Du fait de cette différence de forme négligeable et du faible écart d'accélération (< 13%) d'une commune à l'autre, **nous choisissons de n'utiliser qu'un seul spectre de référence au rocher pour les 10 communes.**

Période	Abymes	Morne à l'eau	Gosier	Ste Anne	St François	Le Moule	Petit Bourg	Goyave	Capesterre	3 rivières
pga	268.1	277.9	253.9	258.4	269.9	283.1	257.3	251.3	244.1	245.9
0.2 s	691.8	714.5	648.3	653.5	676.5	717.5	664.0	647.0	629.0	638.0
0.5 s	332.5	345.7	317.4	327.1	344.5	354.7	314.8	309.8	301.7	296.7
1.0 s	139.7	145.4	135.8	142.7	150.7	151.8	132.5	131.0	127.8	122.9

Tableau 2 : Accélérations spectrales médianes (cm/s²) pour une période de retour de 475 ans et pour les 10 communes étudiées (d'après Martin *et al.*, 2002).

Période	Abymes	Morne à l'eau	Gosier	Ste Anne	St François	Le Moule	Petit Bourg	Goyave	Capesterre	3 rivières
pga	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
0.2 s	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6
0.5 s	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
1.0 s	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Tableau 3 : Accélérations spectrales normalisées pour un PGA mis à 1.

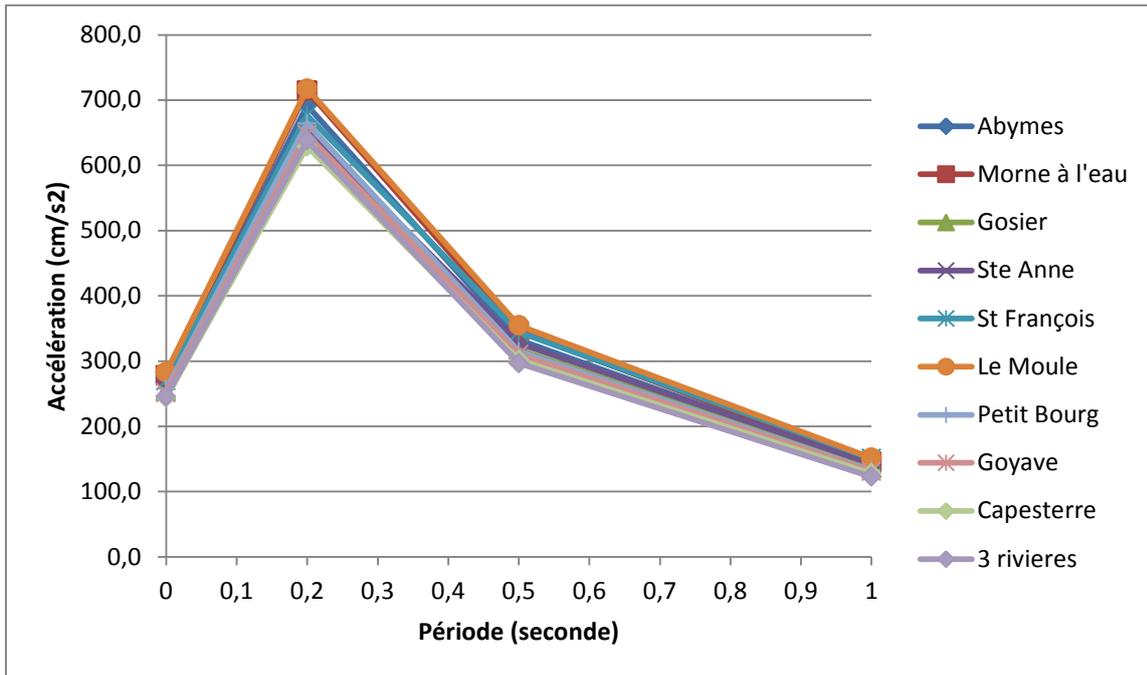


Figure 9 : Accélérations médianes (cm/s^2) pour une période de retour de 475 ans et pour les 10 communes étudiées (d'après Martin *et al.*, 2002).

4.2.3. Spectre de réponse au rocher

Un spectre de réponse en accélération $R_E(T)$ est entièrement déterminé par l'accélération à période nulle (ou PGA) définie ici par le paramètre R_A , par les valeurs de période du début et fin de plateau en accélération (T_B et T_C) et par la valeur au point d'inflexion du spectre T_D ; ce qui se traduit par les formules suivantes (Figure 10) :

$$\text{Branche AB : } R_E(T) = R_A + (R_M - R_A) (T/T_B)$$

$$\text{Branche BC : } R_E(T) = R_M$$

$$\text{Branche CD : } R_E(T) = R_M (T_C/T)$$

$$\text{Branche DE : } R_E(T) = R_M (T_C/T) (T_D/T)$$

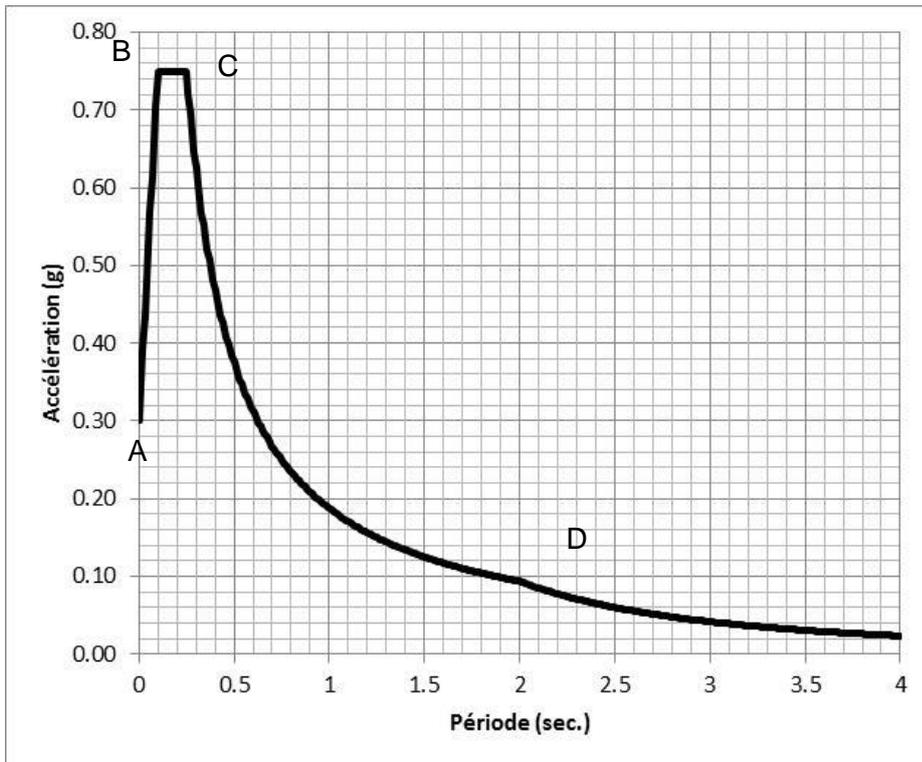


Figure 10 : Expression analytique du spectre de réponse élastique

Le niveau du plateau BC ainsi que sa largeur sont ajustés par rapport au spectre d'aléa uniforme à 475 ans de période de retour pour la commune du Moule, celle des 10 communes ayant le niveau d'aléa le plus élevé.

Pour pouvoir affiner la forme du spectre à retenir, nous avons recalculé l'aléa probabiliste régional sur la commune du Moule avec toutes les hypothèses du modèle de Geoter mais avec 12 périodes spectrales au lieu de 4 (Figure 11).

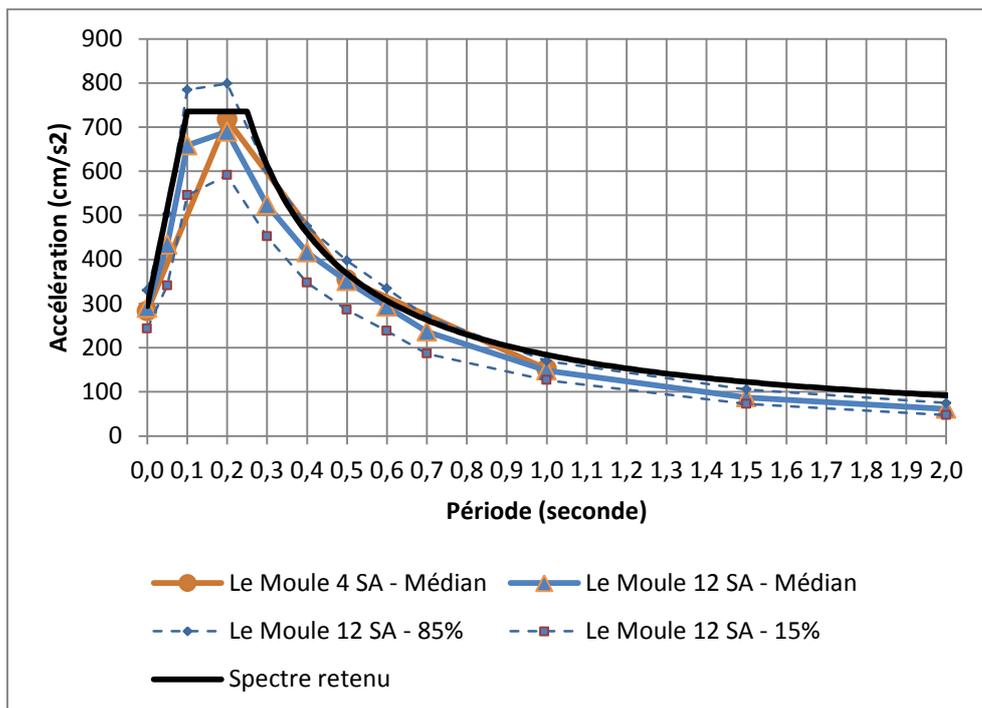


Figure 11 : Spectres de réponse au rocher. En orange, l'accélération médiane calculée au Moule en 4 points pour l'étude Geoter. En bleu, le spectre recalculé en 12 points (médian + percentiles 15 et 85 % en pointillé). En noir le spectre de réponse retenu.

Le spectre de réponse retenu est illustré sur la Figure 11, et ses caractéristiques sur le Tableau 4.

R_A (g)	R_M (g)	T_B (sec.)	T_C (sec.)	T_D (sec.)
0.30	0.75	0.1	0.25	2.0

Tableau 4 : Caractéristiques du spectre de réponse élastique retenu pour les 10 communes.

L'accélération maximale horizontale est prise à 0,30 g (Seuil pour la zone 5 de la réglementation parasismique en vigueur). Le plateau est situé entre les périodes 0,1 et 0,25 seconde. L'accélération au niveau du plateau est 0,75 g.

A noter aussi qu'une récente étude d'aléa sismique probabiliste de l'arc Antillais (Bozzoni *et al.*, 2011) donne un aléa à 475ans de 0,32 g-0,37 g pour l'Archipel de Guadeloupe. Plusieurs points peuvent expliquer les différences avec l'étude de Martin *et al.* (2002) notamment un modèle de zonage très simplifié par rapport à celui de Martin *et al.* (2002), l'utilisation d'un catalogue de sismicité ne tenant pas compte des données de réseaux locaux de surveillance (Observatoires de Martinique, Guadeloupe et Catalogue de Trinidad) et l'utilisation de modèles d'atténuation différents. Il n'y a pas eu d'analyse quantitative permettant de juger laquelle des deux études donne le résultat le plus fiable sur la Guadeloupe. Nous avons choisi de garder comme référence l'étude de Martin *et al.* (2002) qui est à la base de la réglementation française.

4.2.4. Confrontation avec la réglementation

La France dispose depuis le 24 octobre 2010 d'une nouvelle réglementation parasismique, entérinée par la parution au Journal Officiel des décrets 2010-1254 et 2010-1255 sur le nouveau zonage sismique national et d'un arrêté du 22 octobre 2010 fixant les règles de construction parasismique à utiliser pour les bâtiments sur le territoire national. Ces textes permettent l'application de nouvelles règles de construction parasismique telles que les règles Eurocode8. Ces nouveaux textes réglementaires sont en vigueur de manière obligatoire depuis le 1er mai 2011.

Ces nouvelles règles préconisent des spectres de réponse élastiques normalisés à caler à l'accélération maximale adaptée à chaque zone d'aléa sismique.

Les Antilles françaises sont situées en zone de sismicité 5 (aléa fort) pour laquelle l'accélération maximale à prendre en compte est 3 m/s^2 . Pour un sol de type A c'est-à-dire constitué de rocher ou autre formation géologique de ce type comportant une couche superficielle d'au plus 5 m de matériau moins résistant, et d'une manière générale avec $V_{s,30} > 800 \text{ m/s}$, les expressions analytiques du spectre de réponse élastique sont les suivantes (Tableau 5) :

Gamme de période (secondes)	Expression analytique (g)
$0 \leq T \leq 0,15$	$S(T) = 0,3 + (3T)$
$0,15 \leq T \leq 0,4$	$S(T) = 0,75$
$0,4 \leq T \leq 2$	$S(T) = 0,3/T$
$2 \leq T \leq 4$	$S(T) = 0,6/T^2$

Tableau 5 : Expressions analytiques du spectre de réponse élastique au rocher horizontal affleurant préconisé pour les Antilles par la réglementation Eurocode 8.

Les anciennes règles PS92

Avec l'ancienne réglementation reposant sur les règles PS92, l'accélération maximale de la zone d'aléa sismique fort est égale à 0,35 g, et les expressions analytiques du spectre de réponse élastique sont les suivantes (Tableau 6) :

Gamme de période (secondes)	Expression analytique (g)
$0 \leq T \leq 0,15$	$S(T) = 0,35 + (3,5T)$
$0,15 \leq T \leq 0,3$	$S(T) = 0,875$
$0,3 \leq T \leq 2,5$	$S(T) = 0,2625/T$

Tableau 6 : Expressions analytiques du spectre de réponse élastique au rocher horizontal affleurant issu de la réglementation PS92.

Le spectre proposé ainsi que les spectres réglementaires basés sur l'Eurocode 8 et les PS92 sont reportés sur la Figure 12. Le spectre retenu est de même niveau que celui de la réglementation parasismique en vigueur, mais la bande fréquentielle du plateau est moins large

(0,1-0,25 s au lieu de 0,15-0,4s) en accord cependant avec l'étude probabiliste de référence de Martin *et al.* (2002).

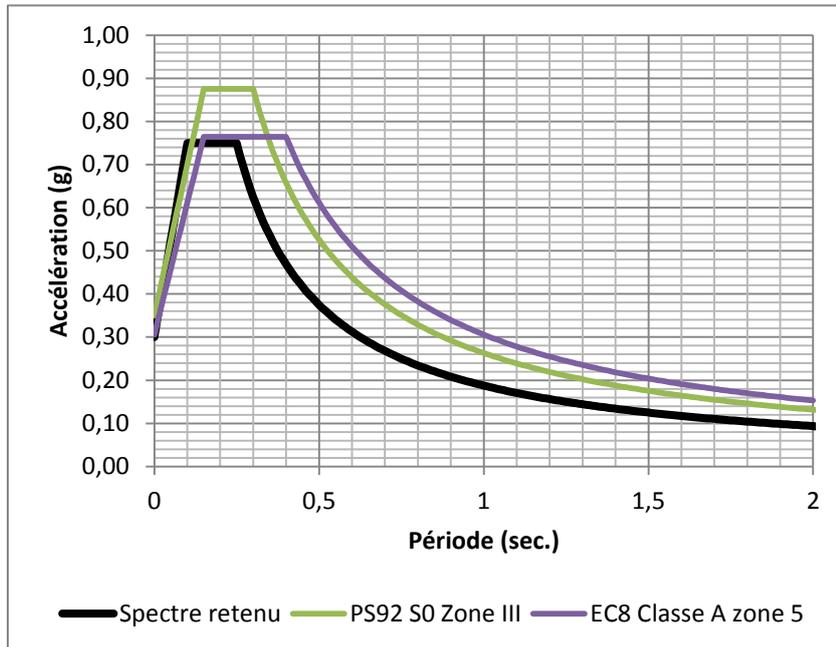


Figure 12 : Confrontation du spectre proposé avec les spectres issus de la réglementation

Confrontation avec les spectres d'autres microzonages récents sur les Antilles

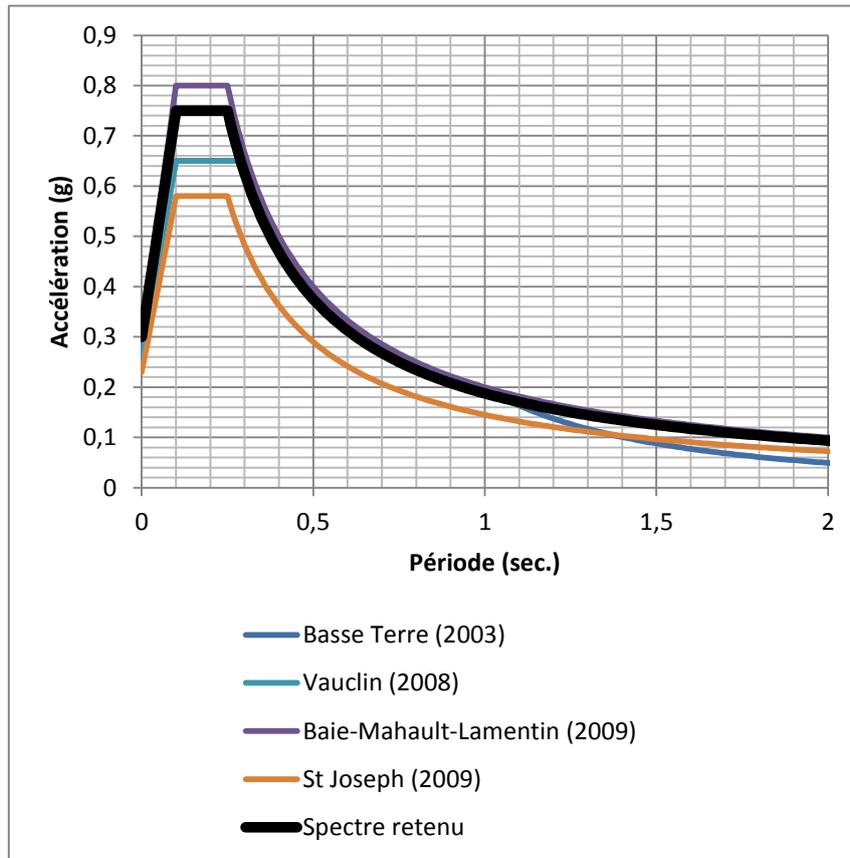


Figure 13 : Confrontation du spectre proposé avec les spectres issus des microzonages récents de Martinique et de Guadeloupe

Plusieurs spectres de référence au rocher sont proposés pour les microzonages sismiques récents de Guadeloupe (Basse-Terre, Mompelat et al., 2003 ; Baie-Mahault-Lamentin, Bertil et al., 2009) et de Martinique (Vauclin, Trinité, le Robert ; Bertil et al., 2008 ; Saint Joseph, Bertil & Auclair, 2009)

La Figure 13 compare le spectre retenu (en noir) avec ceux des microzonages cités ci-dessus. Le spectre retenu est proche de celui de Baie Mahault-Lamentin.

4.2.5. Choix des accélérogrammes

Nous avons recherché, dans les bases de données mondiales, deux accélérogrammes réels issus de séismes ayant des caractéristiques proches des principales sources sismogéniques contributives à l'aléa régional au niveau de l'île de Guadeloupe : une source lointaine associée à un séisme de subduction, et une source proche associée à un séisme crustal. Les caractéristiques des séismes réels ainsi retenus sont décrites dans le Tableau 8.

Remarque : la recherche de signaux réels consiste à sélectionner des signaux dans des bases de données de mouvements forts. Dans le cas présent, les sources les plus contributives à l'aléa sismique probabiliste sont d'une part un séisme de subduction de magnitude 8.0 situé à une distance focale de l'ordre de 50 à 80 km selon les communes, et d'autre part un séisme

crustal de magnitude 6.3 situé à une distance focale de l'ordre d'une dizaine de kilomètres. Les accélérogrammes sont par conséquent choisis selon les critères suivants ($M = M_w$; $d = d_{focale}$) :

- magnitude telle que $M_{séisme\ cible} - 0.5 < M < M_{séisme\ cible} + 0.5$;
- distance focale la plus proche possible de la distance focale du « séisme cible » ;
- PGA le plus proche possible du PGA du « séisme cible » ;
- spectre de réponse le plus proche possible du spectre du « séisme cible ».

Les critères retenus pour cette recherche sont reportés dans le Tableau 7.

Séisme de subduction ($M_w=8.0$, $d_{focale}=60$ km)	Séisme crustal ($M_w=6.3$, $d_{focale}=10$ km)
$7,5 < M_w < 8,5$	$5,8 < M_w < 6,8$
$50 \text{ km} < d_{focale} < 75 \text{ km}$	$5 \text{ km} < d_{focale} < 15 \text{ km}$
$PGA_{cible} = 0,30 \text{ g}$	$PGA_{cible} = 0,30 \text{ g}$

Tableau 7 : Critères retenus pour la sélection des accélérogrammes.

Les accélérogrammes naturels sont ainsi sélectionnés puis normalisés par rapport au PGA « cible » donné par le spectre de réponse uniforme au rocher (0,30 g). Ces accélérogrammes sont représentés sur la Figure 14.

En complément de ces accélérogrammes, deux accélérogrammes naturels ont été modifiés à l'aide du logiciel RspMatch 2005 (Hancock *et al.*, 2006) : l'un correspondant à un séisme de subduction, et l'autre à un séisme crustal.

Pour cela, nous avons tout d'abord réitéré la recherche précédente de manière à extraire deux nouveaux accélérogrammes naturels : les caractéristiques de ces séismes sont décrites dans le Tableau 8. Le logiciel RspMatch 2005 procède ensuite à leur modification pour que leurs spectres de réponse soient compatibles avec le spectre cible correspondant obtenu au rocher horizontal affleurant.

Cette méthode basée sur les travaux de Lilhanand et Tseng (1988) permet, dans la plupart des cas, de préserver le caractère non-stationnaire de l'accélérogramme de référence. Elle consiste à ajuster l'accélérogramme dans le domaine temporel en lui ajoutant des ondelettes de manière à ce que le spectre ainsi calculé respecte le spectre cible pour toute la gamme de fréquence considérée en maintenant des séries temporelles réalistes en vitesse et en déplacement.

Les accélérogrammes naturels modifiés déterminés grâce à RspMatch 2005 sont présentés sur la Figure 15.

		Date	Heure TU	Séisme	Mw	d_{focale} (km)	Station	PGA (g)
Subd.	N1	25/09/2003	19:50:06	Offshore Tokachi (Japon)	8.3	66	Meguro	0.21
Subd.	M1	03/03/1985	22:47:07	Valparaiso (Chili)	8	56	Quintay	0.25
Crust.	N2	17/06/2000	15:40:41	South Iceland (Iceland)	6.6	20	Minni-Nupur	0.16
Crust.	M2	26/09/1997	09:40:30	Umbria Marche (Italie)	6	13	Nocera Umbra	0.55

Tableau 8 : Caractéristiques des séismes correspondant aux accélérogrammes réels choisis pour le calcul des spectres tenant compte des effets de site

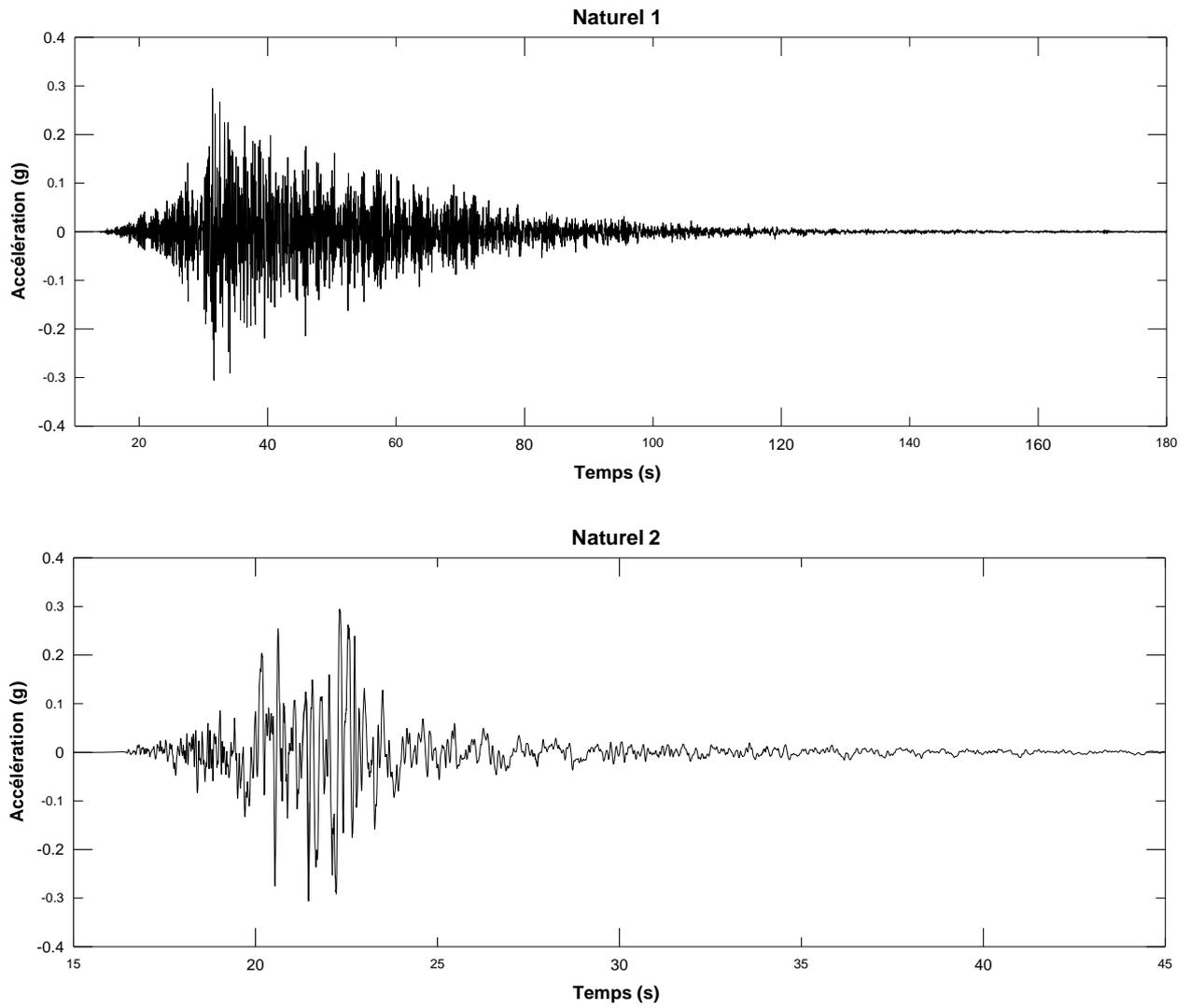


Figure 14 : Accélérogrammes naturels sélectionnés et normalisés par rapport au PGA « cible »

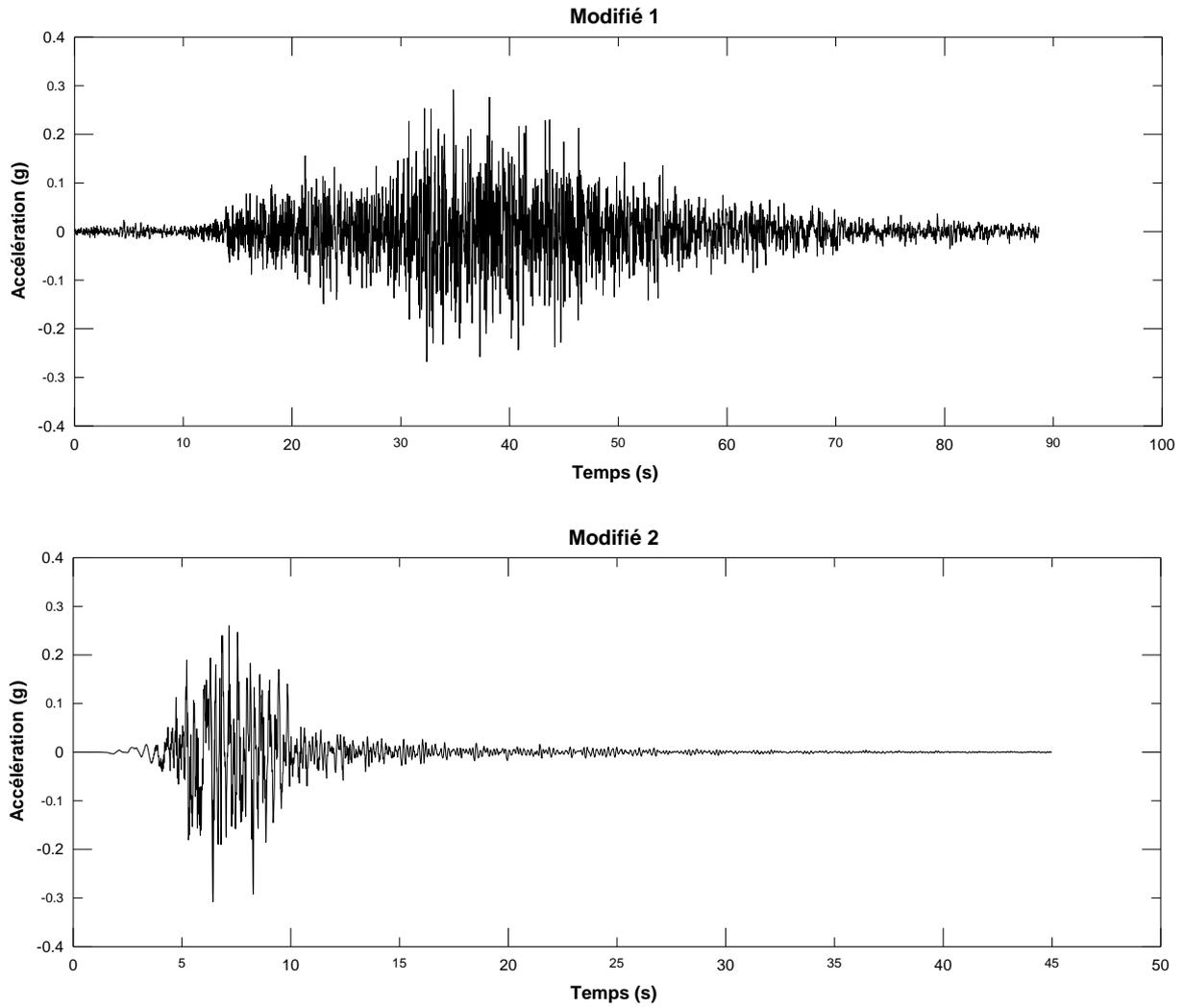


Figure 15 - Accélérogrammes naturels modifiés correspondant au spectre au rocher

Comparaison avec le spectre au rocher horizontal affleurant

Les spectres de réponse des deux accélérogrammes réels et des deux accélérogrammes réels modifiés, sont comparés avec le spectre de réponse « cible » (spectre de référence retenu au rocher horizontal affleurant) sur la Figure 16.

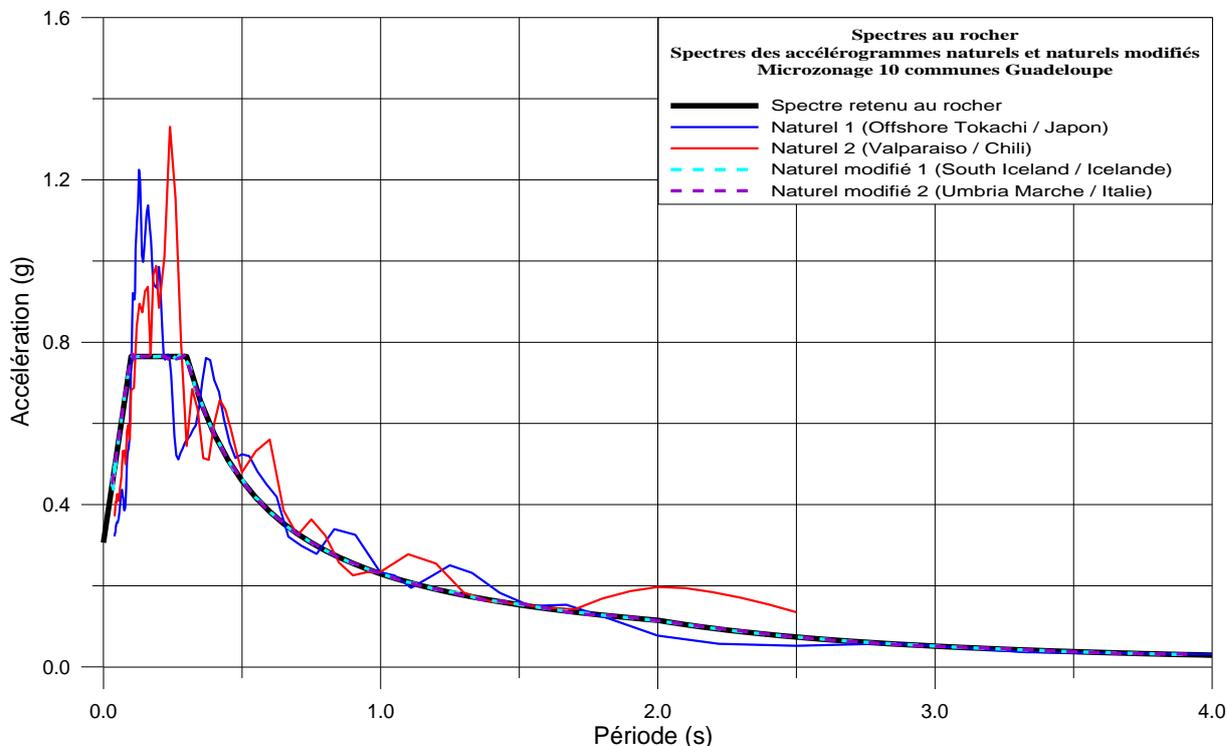


Figure 16 : Comparaison des spectres des accélérogrammes normalisés et naturels modifiés avec le spectre au rocher

5. Effet de site lithologique

L'aléa sismique local est défini comme une modification d'un mouvement sismique de référence défini au rocher par les caractéristiques géomécaniques des sites (effet de site lithologique) ou topographiques des sites (effet de site topographique).

5.1. METHODOLOGIE

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

Ce zonage se fait en plusieurs étapes :

- compilation et analyse des données géologiques, géophysiques et géotechniques existantes;
- prospections géophysique et géotechnique pour compléter les données existantes;
- 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 homogènes et les colonnes de sol représentatives associées à chaque zone. Le calcul des spectres de réponse spécifiques pour chaque zone et le regroupement éventuel de zones pour obtenir le zonage final sont décrits dans le chapitre suivant.

5.2. DONNEES DISPONIBLES

5.2.1. La Banque de données du Sous-Sol (BSS)

Le BRGM est chargé par ses ministères de tutelle, de gérer la Banque de données du Sous-Sol (BSS). Elle contient des informations brutes à caractères administratif et géologique : propriétaire, localisation, logs géologiques, documents scannés, équipement technique des forages. Le Code Minier rend obligatoire la déclaration des ouvrages d'une profondeur supérieure à 10 m. 382 sondages issus de cette banque de données ont ainsi été répertoriés dans la zone d'étude.

On constate une grande disparité dans la répartition spatiale des points BSS, la majorité localisée sur les communes des Aymes et du Gosier. Le reste des sondages se concentre dans une moindre mesure sur les territoires du Moule et de Morne à l'eau, puis sur les déviations routières des communes de l'Est de Basse-Terre.

5.2.2. Rapports d'études géotechniques

Une collecte préalable de l'ensemble des données existantes sur les différents secteurs étudiés a été nécessaire, qu'elles proviennent d'études ponctuelles ou étendues, réalisées par des organismes privés ou publics, y compris celles effectuées par le BRGM.

La majorité des rapports qui constituent cette synthèse documentaire ont été obtenus grâce aux maîtres d'ouvrages ou suite à leur autorisation pour la consultation auprès des bureaux d'études. Cette opération s'est avérée fastidieuse tant par la difficulté d'obtenir rapidement des réponses concrètes des divers intervenants que par la densité des données à mettre en forme.

Les bureaux d'études « GEOMAT », « IMSRN Guadeloupe » et « ANTEA Guadeloupe » ont fourni au total 170 rapports. Chaque sondage a été géoréférencé dans le système WGS84 UTM Nord 20 par calage des plans d'implantation ou à partir des cartes cadastrales. Au regard des données disponibles pour les zones étudiées, ce sont 585 sondages géotechniques (incluant ceux de la BSS) qui sont représentés sur la Figure 19 et la Figure 20. La Figure 17 et la Figure 18 présentent respectivement la proportion de sondages recensés par commune, et la répartition entre types de sondages géotechniques.

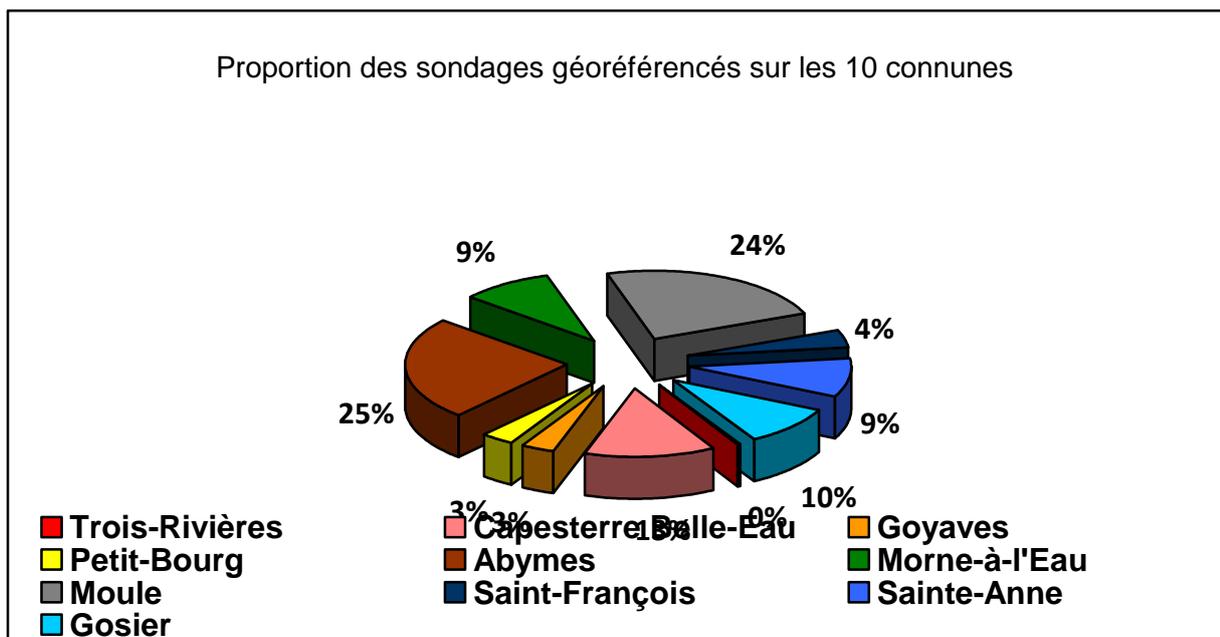


Figure 17 : Diagramme en camembert présentant la répartition des sondages géotechniques recensés sur les dix communes étudiées.

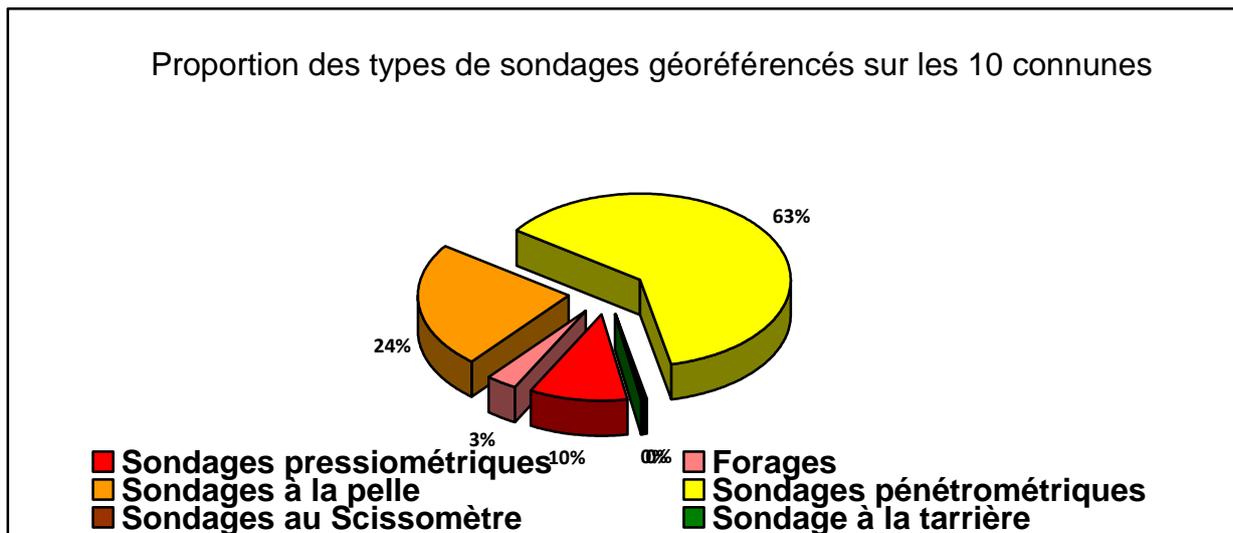


Figure 18 : Diagramme en camembert présentant la répartition des différents types de sondages géotechniques recueillis.

5.2.3. Mesures H/V existantes

Ces mesures permettent d'identifier les zones potentiellement à effet de site et d'en définir les fréquences de résonance (méthode décrite en annexe 1).

Plusieurs séries de mesures H/V, permettant de détecter les zones susceptibles de présenter des effets de site lithologiques, étaient disponibles sur au moins 8 communes étudiées. Ces données proviennent des expertises de vulnérabilité des écoles et lycées effectuées par GEOTER (Dunand et al., 2009) ainsi que par le bureau d'étude IMSRN. D'autres mesures sont disponibles au niveau des stations du réseau accélérométrique permanent (RAP) et d'anciennes études réalisées par le BRGM. Ces mesures sont symbolisées par des losanges rouges sur les figures Figure 19 et Figure 20.

5.2.4. Données complémentaires acquises lors de l'étude

En complément de l'analyse géologique et géotechnique réalisée à partir des données existantes (carte géologique, BSS, rapports géotechniques), il est apparu nécessaire d'effectuer des mesures géophysiques et géotechniques afin de définir en particulier l'épaisseur des formations rencontrées et la vitesse de propagation des ondes de cisaillement V_s au sein de celles-ci.

Concernant les mesures géophysiques, deux techniques ont été mises en œuvre : la méthode SASW (Spectral Analysis of Surface Waves, décrite en annexe 2) qui permet de définir ponctuellement un profil de vitesse V_s et la méthode H/V (décrite en annexe 1) qui permet de définir la fréquence de résonance d'un site. Ainsi, 321 points de mesures H/V et 93 profils SASW ont été réalisés sur les dix communes. Les résultats obtenus sont intégralement repris dans les 2 annexes techniques.

Une campagne de mesures géotechniques *in situ* et en laboratoire a également été réalisée afin de vérifier certains points de l'analyse géologique initiale, et d'étudier le phénomène de

liquéfaction. Ces sondages et essais sont décrits en détail dans le chapitre sur l'aléa liquéfaction.

L'ensemble des mesures géophysiques et géotechniques (existantes et acquises lors du microzonage) sont localisées sur les Figure 19 et Figure 20. Sur ces figures, sont représentées deux études de profils électriques, l'une pour le nord-est de Basse-Terre (Paulin, 1988), l'autre pour la Grande-Terre (Cottez, 1972). Ces mesures électriques sont des interprétations de plusieurs mesures ponctuelles permettant d'analyser à grande échelle les grandes structures géologiques. Les profils sismiques montrés (Trois-Rivières, ponctuellement à Capesterre Belle-Eau) se situent le long de la route nationale et ont permis la construction de celle-ci. Sur la Grande-Terre, ils sont à rattacher aux études de Cottez (1972) pour caractériser les grandes masses d'eau souterraine de la Grande-Terre. Ces différents profils (sismiques, électriques) ont été utilisés pour contraindre certaines épaisseurs de couches pour la synthèse géologique et pour l'identification de certaines failles (cf chapitre 7).

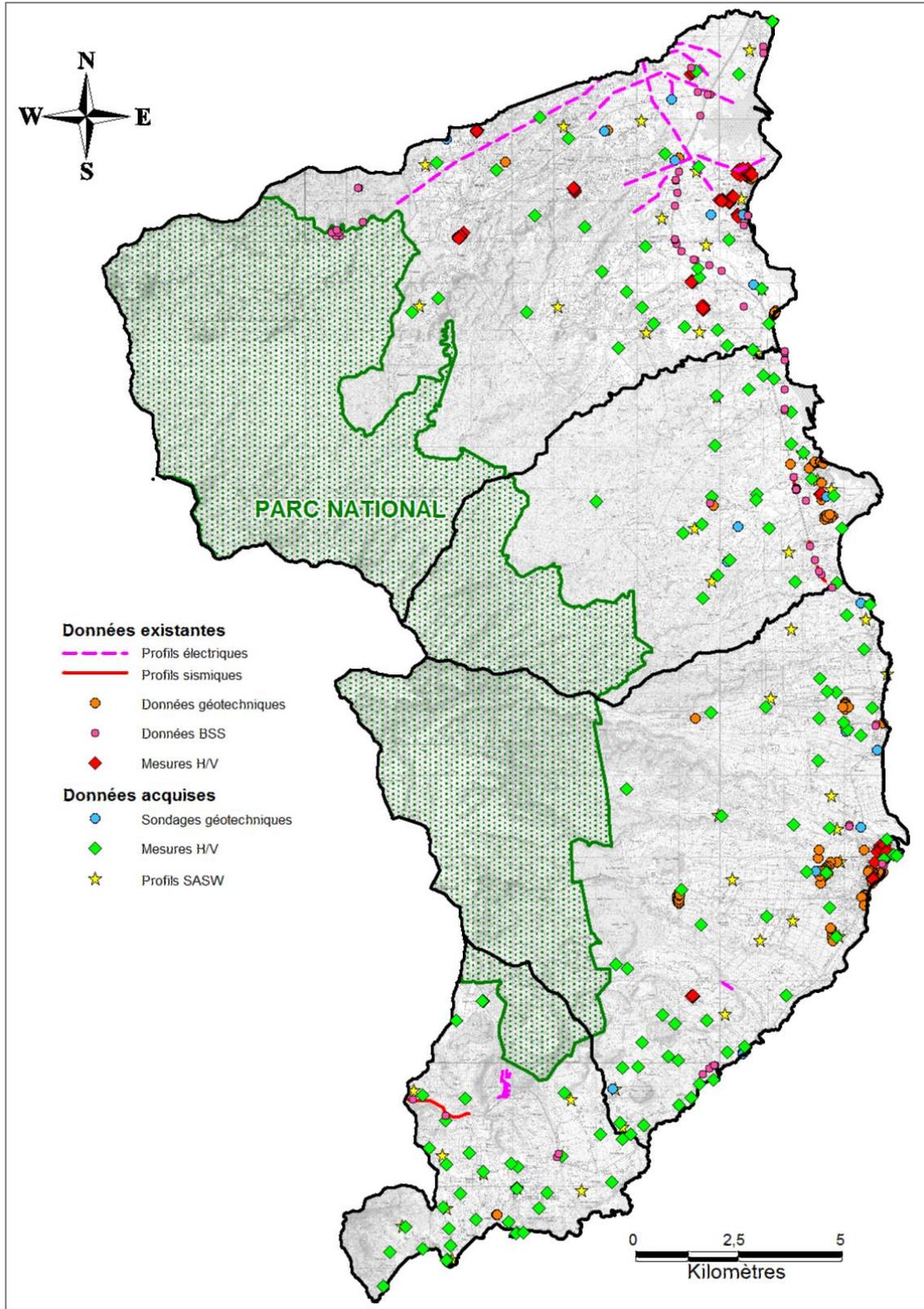


Figure 19 : Localisation de l'ensemble des données géologiques, géophysiques, géotechniques à disposition sur les 4 communes de Basse-Terre.

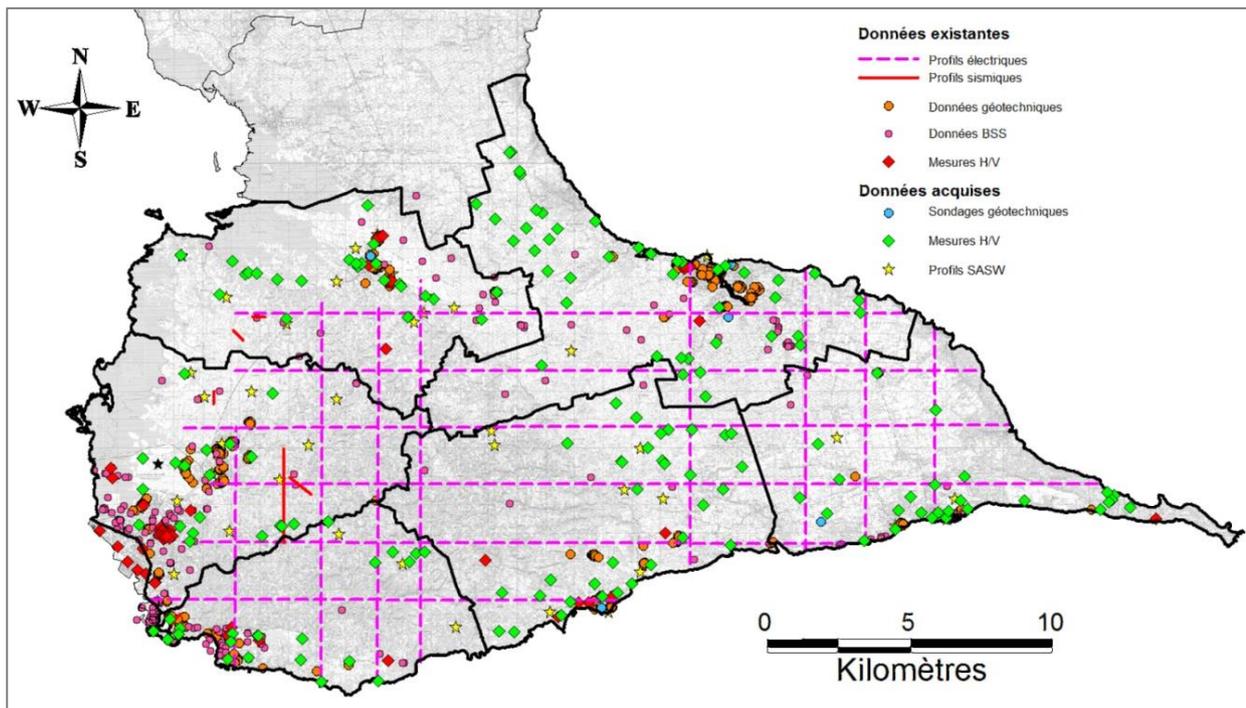


Figure 20 : Localisation de l'ensemble des données géologiques, géophysiques et géotechniques à disposition sur les 6 communes de Grande-Terre.

5.3. CARACTERISATION DES ZONES GEOLOGIQUES

A l'issue de la synthèse des données géologiques, géotechniques et géophysiques disponibles, pour chaque commune et des réalisations des campagnes géophysiques (H/V et SASW), une caractérisation a été établie pour chacune des unités géologiques présentes sur les communes étudiées. Certains sous-ensembles géologiques ont donc été fusionnés si elles présentent des caractéristiques semblables (fréquence de résonance, profil de vitesse dans les 30-40 premiers mètres de profondeur du sol).

L'analyse de l'ensemble de ces données amène à considérer 26 zones type pour les 4 communes étudiées de la Basse-Terre (Figure 21 et Figure 22) et 13 zones type pour les 6 communes étudiées de la Grande-Terre (Figure 23 et Figure 24).

Pour chaque zone type, une ou deux colonnes de sol caractéristiques ont été définies (elles sont détaillées dans le chapitre 5.4.2).

5.3.1. Caractérisation des zones géologiques en Basse-Terre

Zone « Rocher » (zone 0)

Cette zone correspond au rocher et éventuellement à des terrains présentant une faible couche (< 5 m) de formations superficielles. Les courbes H/V montrent en majorité une absence d'effet de site. 8 sous-ensembles géologiques répondent à ce critère :

- à Trois-Rivières : les hyaloclastites des Monts Caraïbes, les coulées de laves massives andésitiques et basaltiques des Monts Caraïbes, les cônes de scories du volcanisme de la Madeleine ;

- à Capesterre Belle-Eau : le dôme andésitique, les andésites massives du volcanisme de la Grande Découverte, le dôme andésitique et les coulées basaltiques de la chaîne de Bouillante ;
- à Goyave : les coulées labradoriques du volcanisme de la chaîne axiale ;
- à Petit-Bourg : les andésites massives altérées de la chaîne septentrionale.

Les brèches andésitiques situées sur Petit-Bourg et Goyave ont été identifiées comme une zone ne présentant pas d'effet de site lithologique et donc assimilés au rocher.

Zone « Sables argileux »

Située sur Capesterre Belle-Eau, cette zone correspond au quartier de Palétuvier. Il s'agit d'une zone marécageuse d'une dizaine de mètres d'épaisseur surmontant un substratum volcanique. Les mesures H/V montrent des fréquences de résonance entre 1 et 2,5 Hz. Les profils de V_S n'atteignent pas le substratum mais montrent une augmentation des propriétés mécaniques avec la profondeur, avec des vitesses V_S de 150 à 250 m/s en surface.

Zone « Andésite altérée »

Située au sud et au centre de Petit-Bourg (Montebello, Caféière et Berguette), cette zone correspond à des coulées de laves d'andésites massives très altérées. Les mesures H/V montrent des fréquences de résonance vers 3 Hz. Les profils de V_S atteignent le substratum vers 26 m de profondeur.

Zone « brèches pyroclastiques »

Située au nord de Petit-Bourg (Arnouville), cette zone correspond à une alternance de microconglomérats et de cendres très argilisées. Les mesures H/V montrent des fréquences de résonance vers 1 Hz. Aucun profil V_S n'a été réalisé sur la zone. Cette zone est à rapprocher de la zone 4 du microzonage des communes du Lamentin et de Baie-Mahault (Bertil et al., 2009).

Zone « Formation de remaniement »

Cette zone est issue du regroupement de trois sous-ensembles géologiques situés sur Petit-Bourg qui correspondent à des formations de remaniement (conglomérats) très altérés. Les mesures H/V indiquent des fréquences de résonance majoritairement comprises entre 1 et 3 Hz. Aucun des profils de V_S réalisés sur la zone n'atteint le substratum sain, ils montrent une augmentation des vitesses avec la profondeur (~200 m/s en surface à plus de 500 m/s vers 25m de profondeur). Cette zone a été assimilée à la zone 4 du microzonage du Lamentin et de Baie-Mahault (Bertil et al., 2009).

Zone « Lapillis et ponces dacitiques (chaîne axiale) »

Cette zone se retrouve au niveau du Parc National sur les communes de Petit-Bourg et Goyave, et au nord de Capesterre Belle-Eau (section Neuf Château). Cette zone correspond à des dépôts de projection volcanique, aucun indice d'altération n'a pu être trouvé. Les mesures H/V indiquent des fréquences de résonance entre 2,5 et 4 Hz. Le profil SASW n'atteint pas le substratum, il montre une couche d'en surface de 15 m d'épaisseur avec des vitesses variant de 100 à 350 m/s.

Zone « Tuf volcanique »

Cette zone se retrouve au nord de la commune de Capesterre Belle-Eau et sur la quasi-totalité de la commune de Goyave. Elle correspond à des dépôts de conglomérats très argilisés. Les mesures H/V montrent des fréquences de résonance entre 0,8 et 2,5 Hz semblant indiquer des variations d'épaisseur. Aucun profil de V_S n'atteint le substratum sain, une couche en surface plus ou moins épaisse avec une V_S de 250 m/s est mise en évidence, il s'agit d'une couche d'altérites.

Zone « Coulée massive andésitique »

Cette zone se retrouve dans le secteur de l'Îlet Pérou à Capesterre Belle-Eau. Il s'agit de laves massives de la Montagne de Capesterre (située dans le Parc National), couvertes de faibles épaisseurs de formations superficielles (< 3 m). Les mesures H/V montrent une fréquence de résonance autour de 3 Hz. Le substratum sain est atteint vers 27 m de profondeur.

Zone « Dépôts pyroclastiques Petites Mamelles »

Cette zone présente à Capesterre Belle-Eau (Routhiers, Fonds Cacao) correspond à des dépôts de nuées ardentes. Les mesures H/V montrent des fréquences de résonance entre 2 et 2,5 Hz. Le substratum sain est atteint à 20 m de profondeur.

Zone « Dépôts de lahars à Capesterre »

Cette zone recouvre une grande partie de la commune de Capesterre Belle-Eau et est issue de la remobilisation des terrains superficiels. Cette zone pose des problèmes particuliers du fait de l'incohérence apparente entre les mesures H/V qui présentent une absence de résonance (ce qui s'interprète généralement comme une absence d'effet de site) et les données sismiques et les sondages géotechniques qui montrent des sols de caractéristiques mécaniques moyennes (V_S 30 de l'ordre de 300 à 400 m/s par exemple d'après les mesures SASW, ce qui correspond à un sol de classe B à C selon les EC8 donc susceptible de présenter un effet de site). Il est à noter qu'aucune donnée n'est disponible pour des profondeurs supérieures à 15 m, ce qui ne nous permet pas de contraindre les paramètres mécaniques en profondeur.

Zone « Dépôts pyroclastiques Grand Carbet »

Cette zone se retrouve au niveau de la rivière du Grand Carbet sur la commune de Capesterre Belle-Eau. Il s'agit de coulées de ponces et de nuées ardentes, les profils d'altération s'épaississant vers le nord. Les mesures H/V montrent une fréquence de résonance de l'ordre de 2,5 Hz. Les profils de V_S n'atteignent pas le substratum sain.

Zone « Andésite basique phase Madeleine »

Cette zone affleure essentiellement sur la commune de Trois-Rivières, et une partie au niveau du secteur de l'Habituée sur la commune de Capesterre Belle-Eau. Il s'agit de coulées d'andésites massives très peu altérées (< 2 m). Les mesures H/V montrent une fréquence de résonance assez haute fréquence vers 7 Hz. Le substratum sain est atteint vers 10-12 m de profondeur.

Zone « Argiles de Saint-Sauveur »

Cette zone est essentiellement située à Saint-Sauveur à Capesterre Belle-Eau, une petite portion se retrouve à Bananier (Ravine Jean-Pierre). L'épaisseur des argiles ne dépasse 4

mètres. Les mesures H/V indiquent une fréquence de résonance vers 6 Hz. Les profils n'atteignent pas le substratum sismique.

Zone « Brèche andésitique complexe volcanique récent »

Cette zone assez étendue se retrouve sur la commune de Capesterre Belle-Eau (Cambrefort, La Digue, Changy, Grand Trou, Forêt de Colombier), il s'agit de brèches argilisées.

Pour cette zone, le problème est le même que pour la zone 17, avec une apparente incohérence entre l'absence de résonance observée sur les mesures H/V et les profils SASW donnant des V_s de l'ordre de 200 m/s en surface.

Zone « Lapillis et scories volcanisme Morne Liquin- Laffite »

Cette zone se retrouve essentiellement sur Capesterre Belle-Eau (Haute Plaine, Morne Salée, Trou au chat), débordant légèrement sur le secteur de la Plaine à Trois-Rivières. Il s'agit de dépôts de projection de laves issues de la formation des mornes Liquin et de Laffite. Les mesures H/V montrent des fréquences de résonance entre 1 et 4 Hz. Aucun profil SASW n'a été réalisé dans la zone.

Zone « Lahars de Saint-Sauveur »

Cette zone ne se retrouve que sur Saint-Sauveur à Capesterre Belle-Eau. Il s'agit de coulées boueuses à débris de roches volcaniques de toute taille. La zone « argiles de Saint-Sauveur » repose sur cette formation. Les mesures H/V montrent une fréquence de résonance de 2 Hz. Aucun profil de V_s n'a été réalisé sur cette zone.

Zone « Dépôts pyroclastiques à bloc d'andésite »

Cette zone se retrouve au nord de Trois-Rivières à la limite du Parc National (Moscou). Elle est issue du regroupement de trois sous-ensembles du zonage géologiques qui correspondent à des produits d'éruption volcanique (blocs d'andésites, cendres et scories). Les mesures H/V montrent des fréquences de résonance de l'ordre de 2,5 Hz. Cette zone est à rapprocher de la zone Z4 du microzonage de l'agglomération de Basse-Terre (Mompelat et al., 2003) même si ce n'est pas tout à fait cohérent en termes de fréquence de résonance.

Zone « Andésite basaltique phase Trois-Rivières »

Cette zone se retrouve sur la majeure partie du territoire de Trois-Rivières (Grand Fond, Hermitage, La Regrettée, etc ...). Il s'agit d'andésites massives altérées sur 2 à 3 m d'épaisseur. Cette zone présente une forte hétérogénéité en termes de réponse sismique puisque les mesures H/V indiquent soit de forts effets de site (à haute fréquence) soit une absence d'effet de site. Cela est dû probablement à la nature même de la zone, composée de laves de la même phase volcanique mais de morphologies différentes. Une explication possible à cette hétérogénéité observée sur les H/V pourrait venir du fait qu'on ait un empilement de coulées dans la partie haute de la zone alors que, dans la partie basse, la coulée reposerait directement sur le substratum sismique. Par ailleurs, des mesures électriques réalisées dans la zone (Paulin, 1988) ont montré la présence de paléovallées très altérées par endroit.

Zone « Coulée de ponces dacitiques »

Cette zone se retrouve sur Trois-Rivières (secteurs de Delgrès et chemin de Grande-Anse). Les mesures H/V montrent des fréquences de résonance majoritairement comprises entre 2,2 et 2,5 Hz. Le substratum sain est atteint vers 35 m de profondeur.

Zone « Alluvions Rivière Lézarde Petit-Bourg »

Cette zone se retrouve dans la plaine alluviale de la Lézarde à Petit-Bourg (secteur de Colin, Ravine Mahault). Elle est issue du regroupement de trois sous-ensembles du zonage géologiques qui correspondent à des dépôts de rivière (vases, sables, argiles et blocs).

Zone « Alluvions Petit-Bourg centre »

Cette zone correspond à la plaine alluviale de la ravine Onze Heure et une partie du bourg de Petit-Bourg. Il s'agit essentiellement d'argiles et de limons.

Zone « Vase de Petit-Bourg »

Située au niveau du littoral du centre de Petit-Bourg, cette zone est composée de vases et d'argiles sableuses.

Zone « Alluvions Rivière à Goyave » (Goyave)

Cette zone comprend les plaines alluviales des rivières Moustique, La Rose, Bonfils et Rivière à Goyave et est composée de sables, d'argiles et de blocs andésitiques.

Zone « Alluvions limite Goyave/Petit-Bourg »

Située à la limite des communes Goyave et Petit-Bourg (Viard Petit-Bourg, Coup de bâton Goyave), cette zone est composée d'argiles sableuses.

Zone « Alluvions Sainte-Marie » (Capesterre Belle-Eau)

Située exclusivement à Sainte-Marie Capesterre Belle-Eau, cette zone regroupe les dépôts marécageux (vases), les sables littoraux et les alluvions de la rivière Sainte-Marie.

Zone « Alluvions Grande Rivière à Goyave »

Située dans la plaine alluviale de la Grande Rivière à Goyave (Petit-Bourg), cette zone est constituée d'argiles et de galets d'andésites. Cette zone est à rapprocher de la zone 2a du microzonage des communes du Lamentin et de Baie-Mahault (Bertil et al., 2009).

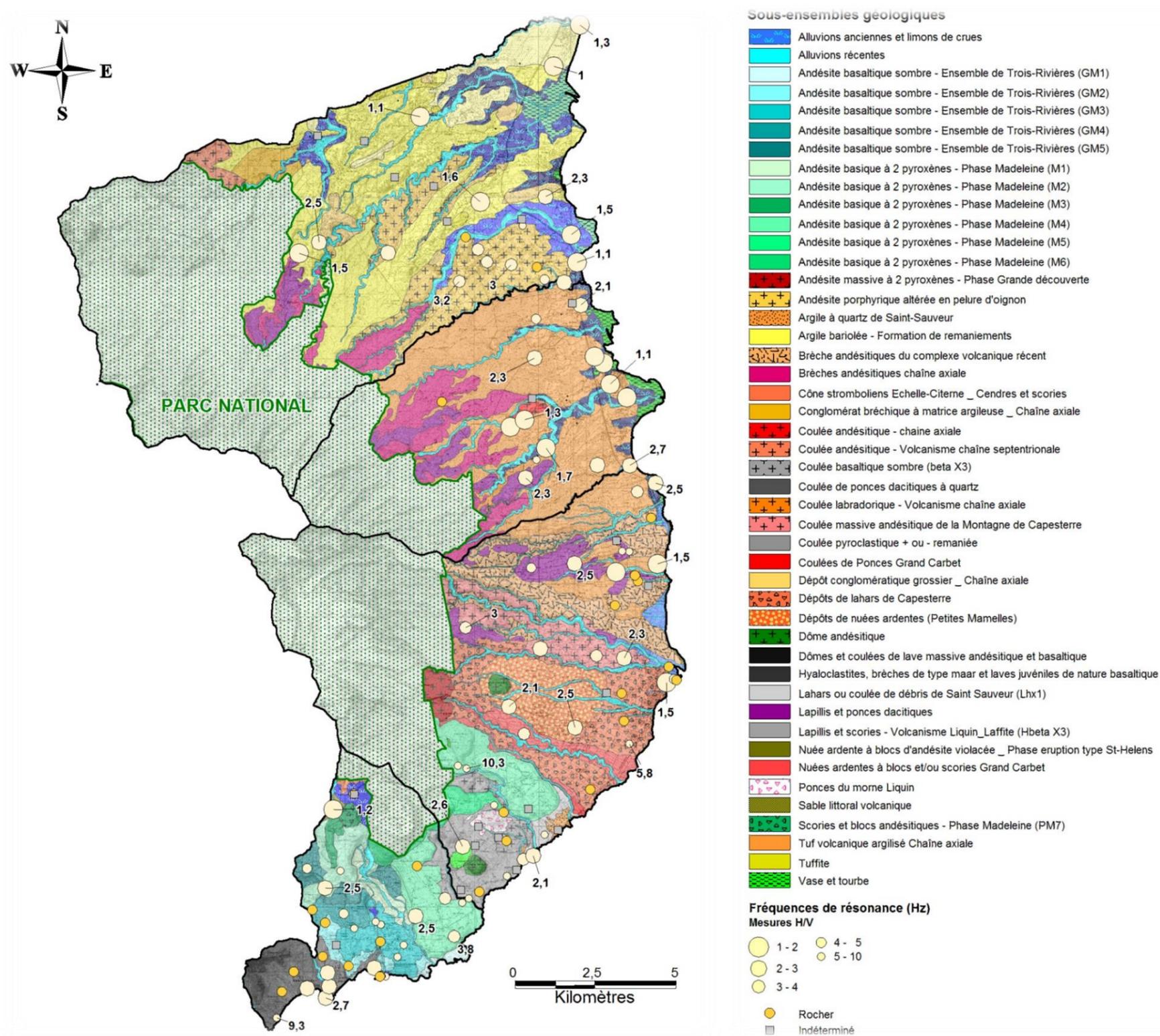


Figure 21 : Fréquences de résonance issues des données H/V sur les 4 communes de la Basse-Terre, superposées aux sous-ensembles géologiques (cf annexe 1).

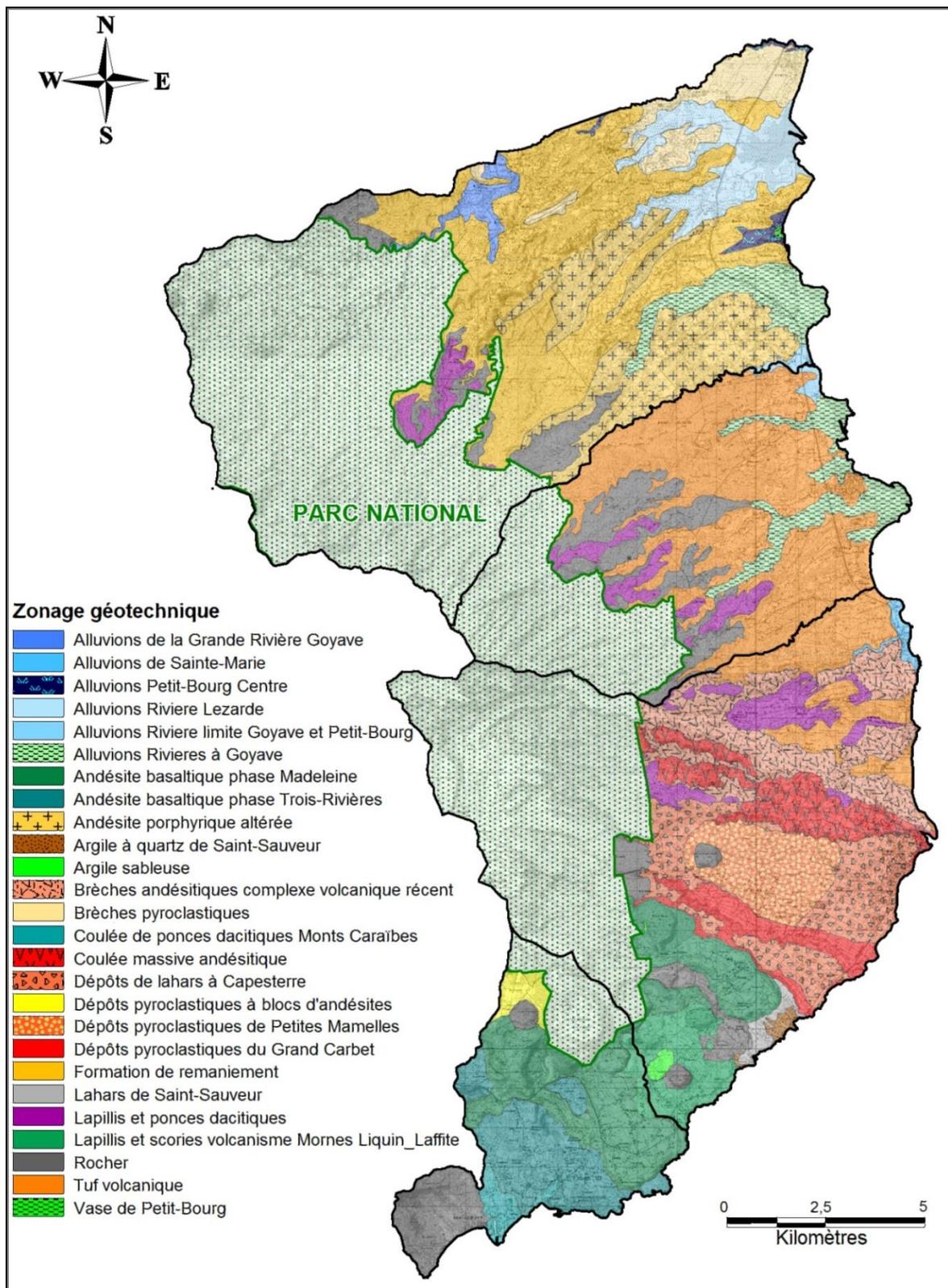


Figure 22 : Zonage géotechnique pour les 4 communes étudiées de la Basse-Terre.

5.3.2. Caractérisation des zones géologiques en Grande-Terre

La plupart des zones sont reprises du zonage géologique. Pour en avoir une description géologique plus détaillée, il est possible de se référer au rapport spécifique de la commune sur laquelle la zone se retrouve.

Il n'y a pas de zone « rocher » sur la Grande-Terre.

Zone « calcaires »

Cette zone occupe la majorité du territoire étudié sur la Grande-Terre, le secteur des Grands Fonds y entièrement englobé. Elle comprend l'ensemble des calcaires de Grande-Terre (calcaires polypiers, calcaires à nodules algaires). Les mesures H/V réalisées sur la zone montrent pour la plupart une absence d'effet de site ou un effet de site très haute fréquence (8-10 Hz). Toutefois, les profils SASW montrent un substratum sain vers 20-25 m de profondeur.

Nous avons choisi de regrouper l'ensemble des calcaires de Grande-Terre dans une même zone qui n'est pas assimilable à du rocher, les mesures géophysiques indiquant des réponses sismiques homogènes aussi bien en fréquence qu'en vitesses d'ondes S.

Cette zone ne peut pas être assimilée à du rocher, et par conséquent il n'y a pas de zone « rocher » stricto-sensu sur la Grande-Terre.

Zones « calcaires altérés »

Cette zone se retrouve sur le littoral du Moule (plage de l'Autre Bord, Morel) et sur le littoral de Saint-François (de l'aérodrome à la plage des Raisins Clairs, lieu-dit Delanoé). Il s'agit de formations d'altération argileuse surmontant les calcaires. Les mesures H/V indiquent essentiellement des fréquences de résonance vers 2-4 Hz. Les profils SASW indiquent une augmentation des propriétés mécaniques avec la profondeur (en cohérence avec les différents logs géologiques) avec des vitesses de l'ordre de 100-200 m/s en surface et ensuite de 400 m/s jusqu'à environ 20m de profondeur. Le profil B56 au Moule atteint le substratum sismique vers 22 mètres de profondeur.

Zone « remblais aéroport »

Située aux Abymes à l'est de l'aéroport et au niveau de la piste, cette zone correspond à des remblais d'origines variées principalement calcaires posés sur des formations argileuses. Cette zone surmonte la formation « argiles de dépression » des Abymes. L'épaisseur des remblais est estimée à 1 mètre. Aucune mesure H/V ou profil SASW n'a été réalisé sur cette zone, aucun sondage géotechnique n'a pu y être recueilli.

Zone « remblais sur tourbière des Abymes »

Située aux Abymes (ouest du Raizet, partie ouest de la piste de l'aéroport, décharge de la Gabarre), cette zone correspond à des remblais d'origines diverses principalement calcaires posés sur des formations tourbeuses.

Cette zone a déjà été traitée dans l'étude de microzonage sismique de Pointe à Pitre et la colonne de sol a été directement reprise de cette étude (Monge *et al.* 1998).

Zone « remblais marina du Gosier »

Cette zone se retrouve à l'est de la marina du Gosier, et elle est composée de remblais de moins d'un mètre d'épaisseur d'origine principalement calcaires qui reposent sur des argiles tourbeuses. Les mesures H/V indiquent une fréquence de résonance vers 2 Hz. Aucun profil SASW n'a été réalisé dans la zone. Le substratum sain est atteint vers 20 m de profondeur par les sondages géotechniques.

Zone « remblais de Saint-François »

Cette zone correspond à des remblais principalement d'origine calcaire sur des dépôts de lagunes reposant eux-mêmes sur un substratum calcaire, elle surmonte la formation « calcaires altérés ». Elle se retrouve au niveau de la marina de Saint-François. Les mesures H/V indiquent des fréquences de résonance à 2,5 Hz. Aucun sondage géotechnique n'est recensé dans la zone et les résultats du profil SASW (B47) ne sont pas exploitables.

Zone « remblais sur tourbière du Gosier »

Cette zone se retrouve au Gosier au niveau de Belle-Plaine et Poucet et est composée de remblais d'origine calcaires de 1 à 2 m d'épaisseur posés sur des formations vaseuses riches en tourbes de 1 à 5m posées elles-mêmes sur d'importantes séries argileuses. Les mesures H/V indiquent une fréquence de résonance de l'ordre de 1 Hz, le profil SASW (B10) réalisé dans la zone n'atteint pas le substratum.

Zone « argile tourbeuse du Gosier »

Cette zone se retrouve au Gosier entre Grande-Baie et Grande-Ravine et est composée de formations vaseuses riches en limons et en matière organique qui reposent sur un niveau argileux issu de l'altération des calcaires sous-jacents. Aucune mesure géophysique n'a été réalisée dans cette zone.

Zone « argile tourbeuse des Abymes »

Cette zone se retrouve sur la côte ouest des communes des Abymes et de Morne à l'eau. Elle est composée de formations vaseuses riches en limons et en matière organique qui reposent sur un niveau argileux issu de l'altération des calcaires sous-jacents. Aucune mesure H/V et aucun profil de Vs n'a été réalisé dans la zone.

Zone « dune du Gosier »

Cette zone se situe exclusivement à l'est du Fort Fleur d'épée et est principalement constituée de sables calcaires d'origine corallienne. Aucune mesure H/V et aucun profil n'a été réalisé dans la zone. Les logs géologiques montrent une couche de sable assez épaisse (> 10 m) posée sur une couche d'argiles en contact avec le substratum sain.

Zone « dune de Sainte-Anne »

Cette zone peu développée se retrouve au niveau du bourg de Sainte-Anne et est constituée de sables calcaires d'origine corallienne. Une mesure H/V indique une fréquence de résonance de 3 Hz. Le profil SASW (B51) et les logs géologiques sont cohérents et montrent un substratum sain peu profond sous une faible couche de sables puis d'argiles.

Zone « argiles de dépression »

Cette unité se retrouve sur 5 des 6 communes étudiées de la Grande-Terre. On la retrouve essentiellement dans les plaines de dépression, il s'agit d'argiles de remplissage surmontant les calcaires altérés.

Compte tenu des fréquences de résonance, on a choisi de distinguer la zone « argiles de dépression » située sur les communes du Gosier, Sainte-Anne et Saint-François de celle qui se retrouve sur les communes des Abymes, Morne à l'eau et Le Moule.

Les mesures H/V réalisées dans la zone « argiles de dépression Abymes-Morne à l'eau-Moule » montrent des fréquences de résonance entre 3,5 et 5 Hz (valeur médiane 4,5 Hz), les profils de V_s n'atteignent pas le substratum.

Les mesures H/V réalisées dans la zone « argiles de dépression Gosier –Sainte-Anne – Saint-François » montrent une fréquence de résonance médiane de 3 Hz et le substratum sain est atteint par les profils SASW vers 25 – 30 m de profondeur.

Zone « argile sableuse du Moule »

Cette unité se retrouve exclusivement à l'ouest du bourg du Moule, il s'agit de calcaires gréseux indurés reposant sur des calcaires massifs. Les mesures H/V indiquent des fréquences de résonance entre 2 et 3 Hz. Le substratum sain n'est atteint ni par les profils ni par les sondages géotechniques.

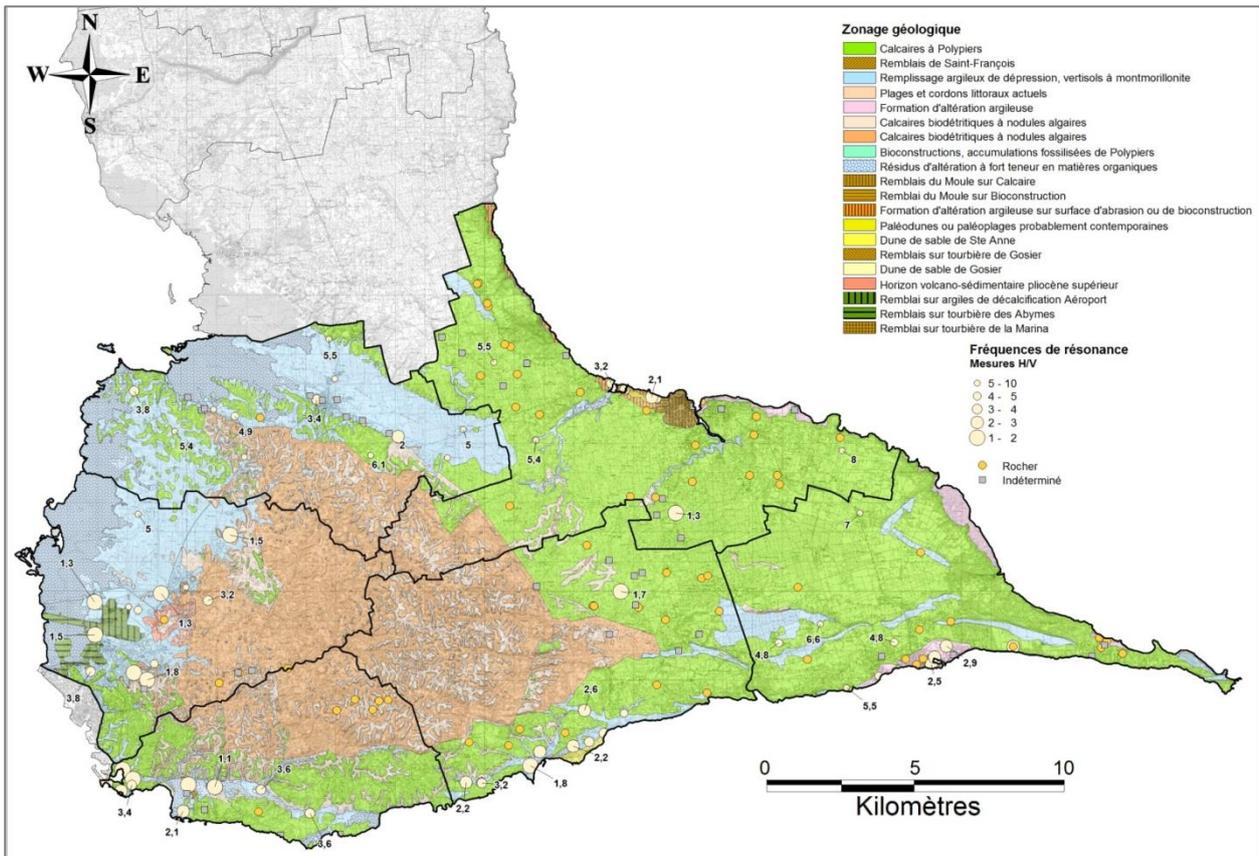


Figure 23 : Fréquences de résonance issues des données H/V sur les 6 communes de la Grande-Terre, superposées aux sous-ensembles géologiques (cf annexe 1).

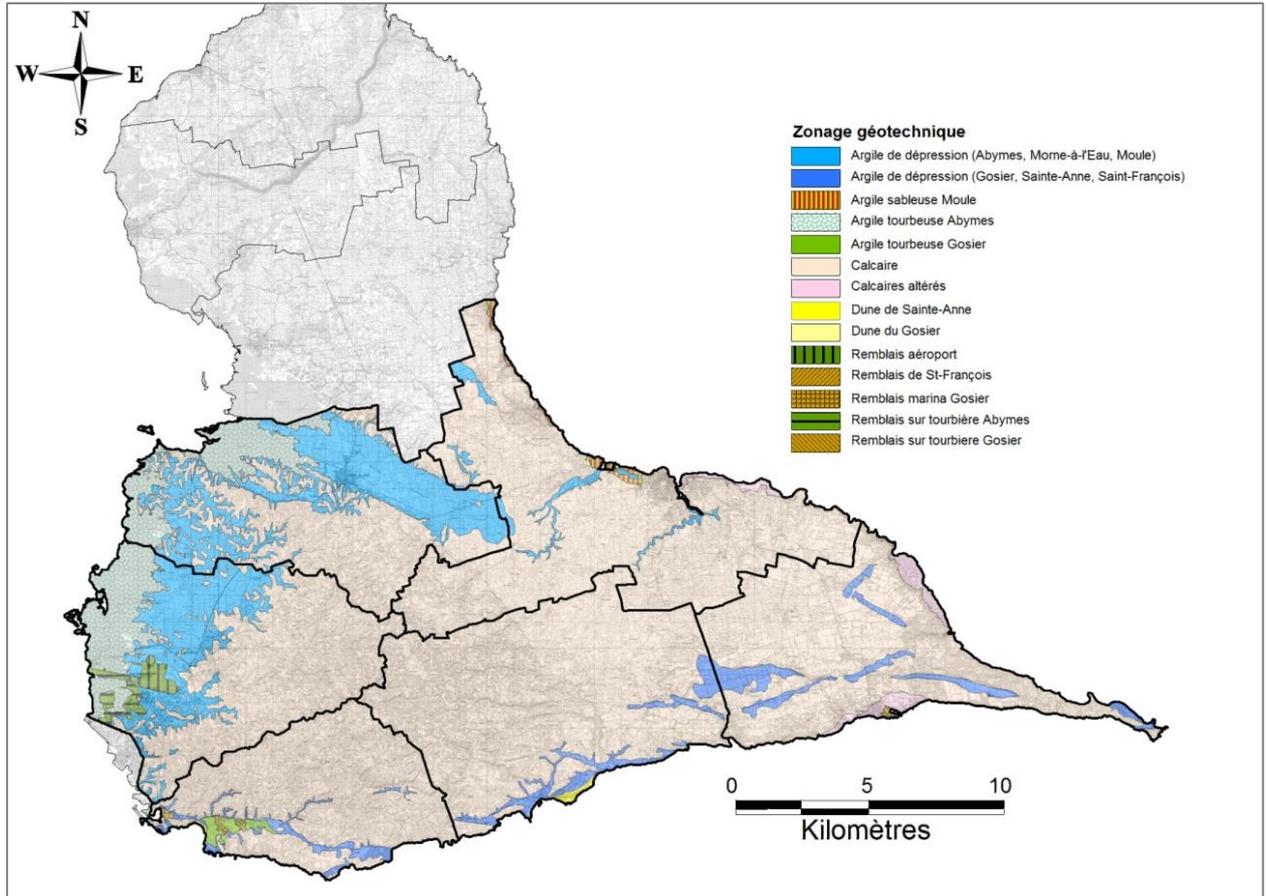


Figure 24 : Zonage géotechnique pour les 6 communes étudiées de la Grande-Terre.

5.4. DETERMINATION DES SPECTRES DE REPONSE

Ce chapitre décrit le travail réalisé pour définir une ou plusieurs colonnes de sol représentatives de chaque zone du zonage géotechnique préliminaire, puis pour calculer les réponses sismiques associées à l'aide de simulations numériques 1D.

5.4.1. Méthodologie

Lorsque les conditions de site sont différentes des conditions au rocher, il faut utiliser des méthodes permettant de les représenter de la manière la plus réaliste possible. Dans cette étude, nous avons utilisé un modèle de sol linéaire équivalent implanté dans le logiciel CyberQuake (Modaressi *et al.*, 1997).

Afin de calculer la réponse sismique des formations géologiques susceptibles d'amplifier les mouvements du sol, il convient de considérer la colonne de sol représentative des terrains en place. 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 (γ_h). La vitesse des ondes de volumes (V_p), 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 γ_c . Elles sont utilisées pour prendre en compte le comportement non-linéaire des matériaux rencontrés. Dans cette étude, les courbes $G(\gamma)/G_{max}$ & $D(\gamma)$ sont issues de la littérature :
 - Kokusho (1980) pour les sables et graves ;
 - Darendeli (2001) pour les argiles.

Les colonnes de sol ainsi décrites sont utilisées avec le logiciel CyberQuake (Modaressi *et al.*, 1997) pour calculer leur réponse à une sollicitation sismique au rocher. Comme mouvement au substratum, on applique 4 accélérogrammes ayant une réponse spectrale proche du spectre spécifique retenu dans le cadre de l'étude.

La méthode employée est la suivante :

- Utilisation de 4 accélérogrammes d'entrée (2 synthétiques et 2 réels) dont les caractéristiques en magnitude, distance et PGA sont similaires au séisme de référence. Le choix de ces 4 accélérogrammes est décrit dans le chapitre aléa régional (chapitre 4.2.5).
- Calcul de 4 accélérogrammes en sortie de la colonne de sol soumise à sa base à ces 4 accélérogrammes ;
- Calcul des spectres de réponse de chacun des accélérogrammes de sortie.

Comme défini au paragraphe 4.2.3, un spectre de réponse est totalement déterminé par l'accélération à période nulle (ou PGA pour « Peak Ground Acceleration ») définie par le paramètre R_A , les valeurs de période du début et fin du plateau en accélération (T_B et T_C) et la valeur au point d'inflexion du spectre T_D . La Figure 25 montre la forme du spectre de réponse élastique en accélération préconisées dans les EC8.

$$\text{Pour } 0 \leq T \leq T_B, \quad S_E(T) = R_A + (R_M - R_A) * T/T_B ;$$

$$\begin{aligned} \text{Pour } T_B \leq T \leq T_C, \quad S_E(T) &= R_M ; \\ \text{Pour } T_C \leq T \leq T_D, \quad S_E(T) &= R_M * T_C / T ; \\ \text{Pour } T_D \leq T \leq 4s, \quad S_E(T) &= R_M * T_C * T_D / T^2. \end{aligned}$$

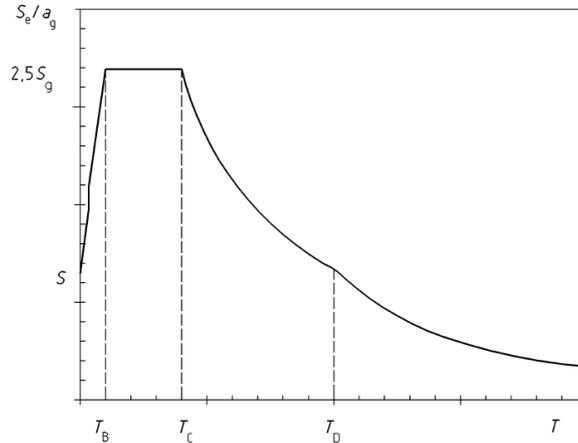


Figure 25 : forme du spectre de réponse élastique en accélération d'après la norme parasismique EC8 référencée NF EN 1998-1

5.4.2. Définition des colonnes de sol

Pour chacune des zones établies au cours du zonage géotechnique (paragraphe précédent), nous donnons ici la description des paramètres mécaniques des colonnes utilisées pour les simulations numériques. Chaque colonne est entrée de la façon suivante dans le logiciel Cyberquake:

- Epaisseur des couches ;
- Type de formation ;
- Vitesse des ondes S dans chaque couche ;
- Vitesse des ondes P dans chaque couche ;
- Poids volumique dans chaque couche;
- Courbes $G(\gamma)/G_{max}$ et $D(\gamma)$ utilisées pour la prise en compte du comportement non linéaire des matériaux rencontrés : le nom de la courbe indique le type de relation utilisée (par exemple : Darendeli, 2001), l'indice de plasticité retenu (IP) et la contrainte effective totale retenue (σ_v en KPa).

En plus de ces paramètres, nous donnons également pour chaque colonne, la fréquence de résonance modélisée et l'interface à laquelle correspond cette résonance. En effet, le travail de simulation consiste aussi à faire varier les paramètres des colonnes de sol afin d'obtenir une fréquence de résonance « synthétique » qui soit cohérente avec la fréquence de résonance « expérimentale » déduite des mesures H/V réalisées sur le terrain.

Il est à noter qu'au-delà de 30 à 40m de profondeur, les données géophysiques à notre disposition ne permettent pas de définir la vitesse des ondes S de manière fiable.

Dans les études précédentes de microzonages, des tests ont été effectués en prenant en considération, pour le substratum altéré, soit une augmentation de la vitesse avec la profondeur, soit une couche à vitesse constante. Les deux types de tests ont donné des

résultats similaires en termes de fréquences amplifiées mais les résultats obtenus avec les gradients de vitesse tendaient à être plus pénalisants que ceux obtenus avec la couche à vitesse constante et beaucoup plus difficiles à caler sur les données géologiques et géophysiques disponibles en termes de caractéristiques géologiques, de fréquence de résonance et d'amplification. En l'absence de données suffisantes pour caler correctement les vitesses en profondeur, nous avons donc délibérément choisi de conserver des couches à vitesse constante.

Communes de Basse-Terre

Zone Rocher

La zone 0 étant représentative de la zone rocheuse, sans effet de site lithologique avéré, elle ne fait pas l'objet de calculs particuliers. C'est le spectre au rocher qui est valide.

Zone Sable argileux

- Capesterre Belle-Eau

Fréquence de résonance retenue : $f_0 = 1-3$ Hz (interface lapillis / rocher)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Vases	3	130	240	1200	Darendeli - Ip50 ; $\sigma_v=25$ kPa
Sables argileux	8	230	430	1600	Kokusho ; $\sigma_v=100$ kPa
Lapillis et scories	20	350	655	1700	Darendeli-Ip15 ; $\sigma_v=400$ kPa
Rocher altéré	-	550	1100	2000	-

Zone Andésite altérée

- Petit-Bourg

Fréquence de résonance retenue : $f_0 = 3$ Hz (andésite / rocher sain)

$f_1 = 8$ Hz (interface argiles / andésite)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Argiles altération	10	250	470	1900	Darendeli-Ip30 ; $\sigma_v = 100$ kPa
Andésite argilisée	15	350	655	1900	Darendeli-Ip15 ; $\sigma_v = 400$ kPa
Andésite	10	500	935	1900	Darendeli-Ip0 ; $\sigma_v = 400$ kPa
Rocher sain	-	1100	2058	2000	-

Zone Brèches pyroclastiques

- Petit-Bourg
- Colonnes 4a et 4b reprises du microzonage sismique de Lamentin et Baie-Mahault (Bertil et al., 2009)

Colonnes 4a

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
couverture résiduelle	10	250	470	1700	Darendeli-lp30 ; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
argiles d'altération	20	300	560	1900	Darendeli-lp15 ; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
substratum altéré	70	500	935	1900	Darendeli-lp15 ; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
substratum	-	1200	2250	2000	-

Colonne 4b

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
couverture résiduelle	10	250	468	1700	Darendeli- lp30 ; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
argiles d'altération	20	300	561	1900	Darendeli- lp15 ; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
substratum altéré	70	500	935	1900	Darendeli-lp15 ; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
substratum altéré	60	500	935	1900	Darendeli-lp15 ; $\sigma_v = 1600\text{kPa}$
substratum	-	1200	2250	2000	-

Zone Formation de remaniement

- Petit-Bourg
- Colonne 4c reprise du microzonage sismique de Lamentin et Baie-Mahault

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
couverture résiduelle	10	250	470	1700	Darendeli- lp30 ; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
argiles d'altération	20	300	560	1900	Darendeli- lp15 ; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
substratum altéré	70	500	935	1900	Darendeli - lp15 ; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
substratum	-	1200	2250	2000	-

Zone Lapillis et ponces dacitiques

- Capesterre Belle-Eau, Petit-Bourg, Goyave

Fréquence de résonance retenue : $f_0 = 4$ Hz (interface lapillis / rocher)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Lapillis	5	150	280	1700	Darendeli-lp30 ; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
Lapillis	10	200	370	1700	Darendeli-lp30 ; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Lapillis	10	300	560	1700	Darendeli-lp30 ; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
Rocher altéré	-	600	1100	2000	-

Zone Tuf volcanique

- Capesterre Belle-Eau, Goyave

Fréquence de résonance retenue : $f_0 = 1.5$ Hz (interface blocs/rocher sain)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Argiles altération	30	250	470	1600	Darendeli-Ip15 ; $\sigma_v = 400$ kPa
Argiles raides	30	400	750	1800	Darendeli-Ip15 ; $\sigma_v = 400$ kPa
Blocs	30	550	1030	1900	Darendeli-Ip0 ; $\sigma_v = 1600$ kPa
Rocher	-	800	1500	2000	-

Zone Coulée massive andésitique

- Capesterre Belle-Eau
- 2 colonnes types retenues

Fréquence de résonance retenue : $f_0 = 2$ Hz (interface rocher altéré /rocher sain)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Argiles altération	10	250	470	1900	Darendeli-Ip15 ; $\sigma_v = 100$ kPa
Rocher altéré	35	480	900	1900	Darendeli-Ip15 ; $\sigma_v = 400$ kPa
Rocher	-	800	1500	2000	-

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Argiles	10	180	340	1400	Darendeli-Ip50 ; $\sigma_v = 100$ kPa
Argiles altération	15	230	430	1900	Darendeli-Ip15 ; $\sigma_v = 400$ kPa
Rocher altéré	35	480	900	1900	Darendeli-Ip15 ; $\sigma_v = 400$ kPa
Rocher	-	800	1500	2000	-

Zone Dépôts pyroclastiques Petites Mamelles

- Capesterre Belle-Eau

Fréquence de résonance retenue : $f_0 = 2,2- 2,5$ Hz (rocher altéré / rocher sain)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Argiles	3	200	370	1600	Darendeli-Ip30 ; $\sigma_v = 25$ kPa
Nuées ardentes	25	450	840	1700	Darendeli-Ip30 ; $\sigma_v = 100$ kPa
Rocher altéré	25	650	1220	1900	Darendeli-Ip15 ; $\sigma_v = 400$ kPa
Rocher	-	800	1500	2000	-

Zone Dépôt de lahars à Capesterre

- Capesterre Belle-Eau

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Sables	7	230	430	1600	Kokusho ; $\sigma_v = -100\text{kPa}$
Argiles limoneuses	8	370	700	1700	Darendeli-lp50; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Rocher altéré	-	600	1100	2000	-

Comme détaillé en 5.3.1, un certain nombre d'incohérences sont apparues suite aux interprétations des mesures recueillies et effectuées sur ces terrains remobilisés. Les simulations numériques réalisées dans ce microzonage ainsi qu'une étude succincte des données accélérométriques de la station CBEA ne nous a pas permis de comprendre les phénomènes en jeu, liés probablement à une structure complexe, non 1D et/ou fortement hétérogène. La colonne définie ici est donc sujette à caution et donne un résultat extrêmement pénalisant sur la zone.

Zone Dépôts pyroclastiques (Grand Carbet)

- Capesterre Belle-Eau
- 2 colonnes type retenues

Fréquence de résonance retenue : $f_0 = 2.5$ Hz (interface brèches/rocher)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Argiles altération	7	300	560	1900	Darendeli-lp15; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Brèches volcaniques	35	500	935	1900	Darendeli-lp0; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
Rocher altéré	-	600	1100	2000	-

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Nuées ardentes	5	250	470	1700	Darendeli-lp30; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
Ponces remaniées	10	400	750	1800	Darendeli-lp30; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Ponces non remaniées	9	600	1100	1900	Darendeli-lp30; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
Sable grossier	4	400	7500	1800	Darendeli-lp30; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Ponces remaniées	4	600	1100	1900	Darendeli-lp30; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
brèches	17	600	1100	2000	Darendeli-lp30; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
Rocher	-	800	1122	2000	-

Zone Andésite basique (volcanisme de la phase de la Madeleine)

- Trois-Rivières, Capesterre Belle-Eau

Fréquence de résonance retenue : haute-fréquence (> 7 Hz)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Rocher altéré	15	500	935	1900	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Rocher sain	-	1100	2000	2000	-

Zone Argiles de Saint-Sauveur

- Capesterre Belle-Eau

Fréquence de résonance retenue : $f_0 = 3$ Hz (interface lahars / rocher sain) et $f_1 = 8$ Hz (interface argiles / lahars)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Argiles sableuses	4	280	500	1600	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
Argiles raides	8	450	850	1900	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Lahars	45	600	1100	1900	Darendeli-Ip0; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
Rocher	-	800	1500	2000	-

Zone brèche andésitique (Complexe volcanique récent)

- Capesterre Belle-Eau
- 2 colonnes type retenues à partir des mesures SASW.

Pour cette zone, le problème est le même que pour la zone 17, avec une apparente incohérence entre l'absence de résonance observée sur les mesures H/V et les profils SASW donnant des Vs de l'ordre de 200 m/s en surface et des valeurs de V_{s30} de l'ordre de 330 à 400 m/s indiquant un sol de type B à C selon les EC8. Là encore, les colonnes retenues sont sujettes à caution et pénalisantes.

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Argiles sableuses	5	200	375	1600	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
Brèches volcaniques	14	400	750	1900	Darendeli-Ip0; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Rocher altéré	-	600	1122	2000	-

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Argiles sableuses	7	300	560	1600	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Brèches volcaniques	14	600	1100	1900	Darendeli-Ip0; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Rocher sain	-	1100	2058	2000	-

Zone Lapillis et scories (volcanisme Morne Liquin_Laffite)

- Trois-Rivières, Capesterre Belle-Eau

- 2 colonnes type retenues

Fréquence de résonance retenue : $f_0 = 3$ Hz (interface lapillis / substratum)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Argiles	8	230	430	1600	Darendeli-lp30; $\sigma_v = 100$ kPa
Lapillis et scories	20	350	650	1700	Darendeli-lp15; $\sigma_v = 400$ kPa
Rocher altéré	-	550	1100	2000	-

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Argiles	8	230	430	1600	Darendeli-lp30; $\sigma_v = 100$ kPa
Lapillis et scories	15	350	650	1700	Darendeli-lp15; $\sigma_v = 400$ kPa
Rocher altéré	20	500	935	2000	Darendeli-lp15; $\sigma_v = 400$ kPa
Rocher	-	800	1500	-	-

Zone Lahars de Saint-Sauveur

- Capesterre Belle-Eau

Fréquence de résonance retenue : $f_0 = 2$ Hz (interface lahars / substratum) et $f_1 = 6$ Hz (interface argiles / lahars)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Argiles raides	8	450	850	1900	Darendeli-lp15; $\sigma_v = 100$ kPa
Lahars	50	600	1100	1900	Darendeli-p0; $\sigma_v = 400$ kPa
Rocher	-	800	1500	-	-

Zone Dépôts pyroclastiques à blocs d'andésite

- Trois-Rivières
- Colonne reprise du microzonage de l'agglomération de Basse-Terre (Mompelat *et al.*, 2003)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Brèches fines peu consolidées	3	250	470	1800	Kokusho ; $\sigma_v = 20$ kPa
Dépôts éruptifs (blocs, cendres)	10	450	850	1900	Kokusho ; $\sigma_v = 100$ kPa
Rocher altéré	-	750	1400	2000	-

Zone Andésite basaltique (volcanisme de la phase Trois-Rivières)

- Trois-Rivières
- 2 colonnes types retenues

Fréquence de résonance retenue : $f_0 = 4 - 5$ Hz (interface andésite altérée/saine)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Argiles	7	200	370	1600	Darendeli-lp30; $\sigma_v = 100$ kPa
Andésite altérée	17	400	750	1900	Darendeli-lp15; $\sigma_v = 400$ kPa
Andésite saine	-	800	1500		-

Fréquence de résonance retenue : f_0 entre 7 et 9 Hz (interface andésite altérée/saine)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Argiles	5	200	370	1600	Darendeli-lp30; $\sigma_v = 25$ kPa
Andésite altérée	8	500	935	1900	Darendeli-lp15; $\sigma_v = 100$ kPa
Andésite saine	-	800	1500		-

Comme détaillé en 5.3.1, ces laves andésitiques altérées sont probablement de morphologies et d'épaisseurs significativement différentes entre les parties haute et basse de la zone. Les colonnes retenues reflètent bien les effets de site haute fréquence observés sur certains points mais sont pénalisantes dans la mesure où elles couvrent également des zones sans effet de site notoire.

Zone Coulées de ponces dacitiques (volcanisme des Monts Caraïbes)

- Trois-Rivières
- 2 colonnes types retenues

Fréquence de résonance retenue : $f_0 = 2,2 - 2,5$ Hz (interface hyaloclastites altérées/ rocher).

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Ponces	10	300	560	1600	Darendeli-lp30; $\sigma_v = 100$ kPa
Argiles altération	15	400	750	1900	Darendeli-lp15; $\sigma_v = 400$ kPa
Hyaloclastites altérées	30	550	1030	2000	Darendeli-lp15; $\sigma_v = 400$ kPa
Rocher	-	800	1500		-

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Ponces	10	300	560	1600	Darendeli-lp30; $\sigma_v = 100$ kPa
Argiles altération	30	400	750	1900	Darendeli-lp15; $\sigma_v = 400$ kPa
Rocher altéré	-	550	1029	2000	-

Zone Alluvions Rivière Lézarde Petit-Bourg

- Petit-Bourg

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/m ³)	Courbe G-D/ γ
Argile sableuse	10	130	240	1600	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
argiles d'altération	20	300	560	1900	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
substratum altéré	70	500	935	1900	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
substratum	-	1200	2250	2000	-

Zone Vase de Petit-Bourg

- Petit-Bourg

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Argile vasarde	6	120	225	1500	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
Alluvions	11	200	370	1700	Darendeli-Ip60; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
argiles d'altération	20	300	560	1900	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
substratum altéré	70	500	935	1900	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
substratum	-	1200	2250	2000	-

Zone Alluvions Petit-Bourg centre

- Petit-Bourg

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Alluvions	17	200	370	1700	Darendeli-Ip30; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
argiles d'altération	20	300	560	1900	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
substratum altéré	70	500	935	1900	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
substratum	-	1200	2250	2000	-

Zone Alluvions Rivière à Goyave

- Petit-Bourg, Goyave

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Argiles vasardes	6	120	225	1500	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
Argiles altération	30	250	470	1600	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
Argiles raides ? Ou blocs ?	30	400	750	1800	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 400\text{kPa}$

Blocs	30	550	1030	1900	Darendeli-Ip0; $\sigma_v = 1600\text{kPa}$
Rocher	-	800	1500		-

Zone Alluvions limite Goyave-Petit-Bourg

- Petit-Bourg, Goyave

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Alluvions sableuses	5	150	280	1500	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
Argiles altération	10	250	470	1600	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
Andésite argilisée	15	350	650	1800	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
Andésite altérée	10	500	935	1900	Darendeli-Ip0; $\sigma_v = 1600\text{kPa}$
Rocher sain	-	1100	2000		-

Zone Alluvions Sainte-Marie

- Capesterre Belle-Eau

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Sables	4	150	280	1600	Kokusho; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
Argiles altération	30	250	470	1600	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
Argiles raides	30	400	750	1800	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
Blocs	30	550	1030	1900	Darendeli-Ip0; $\sigma_v = 1600\text{kPa}$
Rocher	-	800	1500	2000	-

Zone alluvions Grande Rivière Goyave

- Petit-Bourg
- Colonne 2a du microzonage de Lamentin été Baie-Mahault (Bertil et al., 2009)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Alluvions	20	275	515	1700	Darendeli-Ip30; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
argiles	20	300	560	1900	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
argiles	30	500	935	1900	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
substratum	-	1200	2250	2000	-

- **Communes de Grande-Terre**

Zone Calcaires

Pour cette zone, située dans les Grands Fonds, la majorité des mesures H/V présentent un rapport H/V plat (absence d'effet de site). Néanmoins, les mesures SASW indiquant une faible couche d'argile en surface surmontant des terrains raides (mais non rocheux), nous avons gardé la solution la plus pénalisante pour l'ensemble de la zone, à savoir une colonne de sol donnant un effet de site modéré (plutôt que de classer toute la zone en rocher).

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
argiles	5	300	560	1700	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
rocher altéré	20	600	1130	2000	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
marno-calcaire		1100	1900	2000	

Zones Calcaires altérés (Saint-François, Moule)

Fréquence de résonance retenue : $f_0 = 3$ Hz (interface rocher altéré/ marno-calcaires)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Argiles vasardes	5	200	375	1700	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
rocher altéré	30	400	750	1700	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
marno-calcaire	-	1100	1900	2000	-

Zone Remblais aéroport (Abyes)

Fréquence de résonance retenue : $f_0 = 4$ Hz (interface argiles/ marno-calcaires)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
remblais	1	400	750	1900	Darendeli-Ip0; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
argiles	4	250	470	1700	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
argiles compactes à blocs	16	350	655	1700	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
marno-calcaires	-	1100	1900	2000	-

Zone Remblais sur tourbière des Abyes

Pour cette zone, 2 colonnes du microzonage de Pointe-à-Pitre (Monge *et al.*, 1998) ont été retenues.

Colonne 3 (R39123 p31)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
remblais	2	200	375	1600	Darendeli-Ip0; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
Formation compressible 1	2	150	280	1400	Darendeli-Ip0; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
Formation compressible 2	3	180	340	1500	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Argiles	5	350	655	1700	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Tuf	5	600	1130	1800	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Substratum altéré	20	800	1500	1800	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
rocher rigide	-	1200	2250	2200	-

Colonne 4 (R39123 p.31)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
remblais	3	200	375	1600	Darendeli-Ip0; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
Formation compressible 1	4	150	280	1400	Darendeli-Ip30; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Formation compressible 2	5	180	340	1500	Darendeli-Ip30; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Argiles	5	350	655	1700	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Tuf	5	600	1130	1800	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
Substratum altéré	20	800	1500	1800	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
rocher rigide	-	1200	2250	2200	-

Zone Remblais marina du Gosier

Fréquence de résonance retenue : $f_0 = 2$ Hz (interface rocher altéré/ rocher sain)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
remblai	0,7	400	750	1600	Darendeli-Ip0; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
Argiles tourbeuses	5	150	280	1700	Darendeli-Ip30; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
argiles	15	250	470	1900	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
	-	1100	1900	-	-

Zone Remblais de Saint-François

Fréquence de résonance retenue : $f_0 = 2.5$ Hz

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
remblais	1	200	375	1600	Darendeli-Ip0; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
tourbes	2	150	280	1700	Darendeli-Ip30; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
argiles plastiques/ vasardes molles ou	5	200	375	1700	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 100\text{kPa}$

argiles sableuses ou sables					
rognons calcaires dans matrice argileuse	30	400	750	1700	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
marno-calcaire	-	1100	1900	2000	-

Zone Remblais sur tourbière du Gosier

La colonne utilisée est issue de l'étude de Belle-Plaine (Projet ANR Belle-Plaine).

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
remblai	2	400	750	2000	Darendeli-Ip0; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
tourbes	2	150	280	1700	Darendeli-Ip30; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
sables	4	350	655	1900	Kokusho; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
argiles	17	200	375	1500	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
marno-calcaire altéré	10	600	1130	2000	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
marno-calcaire	-	1500	2806	2000	-

Zone Argile tourbeuse du Gosier

La colonne utilisée est issue du microzonage sismique de Pointe à Pitre (Monge *et al.*, 1998).

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Formation compressible 1	3	150	280	1400	Darendeli-Ip0; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
Lentilles sableuses mangrove	5	180	340	1600	Kokusho; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Formation compressible 2	5	180	340	1500	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Argiles	3	350	655	1700	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Tuf	10	600	1130	1800	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
Substratum altéré	20	800	1500	1800	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
rocher rigide	-	1200	2250	2200	-

Zone argile tourbeuse des Abymes (Abymes, Morne à l'eau)

Pour cette zone, 2 colonnes ont été retenues, également retenues de l'étude de Monge *et al.* (1998).

Colonne 6 du microzonage de Pointe à Pitre (R39213)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Formation	4	150	280	1400	Darendeli-Ip0; $\sigma_v = 25\text{kPa}$

compressible 1					
Formation compressible 2	3	180	340	1500	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Argiles	8	350	655	1700	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Tuf	5	600	1130	1800	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
Substratum altéré	20	800	1500	1800	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
rocher rigide	-	1200	2250	2200	-

Colonne 7 du microzonage de Pointe à Pitre (R39213)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Formation compressible 1	7	150	280	1400	Darendeli-Ip0; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
Formation compressible 2	5	180	340	1500	Darendeli-Ip15; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Argiles	8	350	655	1700	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Tuf	5	600	1130	1800	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
Substratum altéré	20	800	1500	1800	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
rocher rigide	-	1200	2250	2200	-

Zone dune du Gosier

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
Sables fins argileux	10	120	225	1800	Kokusho; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
Argiles	17	200	375	1700	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
Marno-calcaire	10	500	950	1800	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
Rocher	-	1100	2060	2200	-

Zone dune de Sainte-Anne

Fréquence de résonance retenue : f_0 entre 4-5 Hz (interface argiles / marno-calcaires)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
sable	10	200	375	1800	Kokusho; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
argiles	4	350	655	1900	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
marno-calcaire	-	1100	1900	2000	-

Zone Argiles de dépression (Gosier, Sainte-Anne, Saint-François)Fréquence de résonance retenue : f_0 entre 3 et 4 Hz (interface rocher altéré/ rocher sain)

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
argiles	10	200	374	1700	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
rocher altéré	25	500	935	2000	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
rocher sain	-	1100	1900	2200	-

Zone Argiles de dépression (Abymes, Morne à l'eau)Fréquence de résonance retenue : f_0 entre 4 et 5 Hz

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
argiles	4	250	470	1700	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
argiles compactes à blocs	16	350	655	1700	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
marno-calcaire	-	1100	1900	2000	-

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
argiles	5	150	280	1700	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
tuf argilisé	15	400	750	1800	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
rocher altéré	-	600	1122	1800	-

Zone Argile sableuse du MouleFréquence de résonance retenue : f_0 entre 3 et 4 Hz

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
argiles sableuses	5	300	560	1700	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
rocher altéré	35	500	935	2000	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
marno-calcaire	-	1100	1900	2000	-

Formation	Epaisseur (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/ m ³)	Courbe G-D/ γ
remblais	2	450	850	1900	Darendeli-Ip0; $\sigma_v = 25\text{kPa}$
argiles sableuses	10	300	560	1700	Darendeli-Ip50; $\sigma_v = 100\text{kPa}$
rocher altéré	30	500	935	2000	Darendeli-Ip100; $\sigma_v = 400\text{kPa}$
marno-calcaire	-	1100	1900	2000	-

5.5. CARTOGRAPHIE FINALE DES EFFETS DE SITE LITHOLOGIQUES ET SPECTRES SPECIFIQUES ASSOCIES

Pour chacune des zones géotechniques et dont les colonnes de sol ont été définies, un spectre de réponse à 5% d'amortissement (valeur préconisée pour le bâti courant dans les règles parasismiques françaises et européennes EC8) a été calculé pour les 4 accélérogrammes définis dans le paragraphe 4.2.5.

Les spectres de réponse spécifiques à chaque zone sont ensuite reportés sur un seul graphe de façon à évaluer leur ressemblance et effectuer des regroupements de zones en cas de réponses sismiques équivalentes. Cette étape permet de définir un nombre limité de classes de sol ayant une réponse sismique homogène pour aboutir au zonage sismique final. Pour chaque zone sismique (ou classe de sol), on définit alors un spectre de réponse spécifique unique tenant compte des effets de site lithologiques et qui pourra être utilisé par la suite lors de la rédaction du PPR sismique.

Toutefois, il faut garder à l'esprit que la similarité en termes de spectre de réponse cache parfois de grandes disparités en termes de fonction de site (rapport des spectres de réponse en accélération entre le sol considéré et le rocher de référence). Cela est dû aux variations naturelles des terrains et aux lacunes de connaissance que l'on a pour certaines formations.

Comme détaillé ci-dessous, 7 classes d'effets de site lithologiques ont été définies pour l'ensemble des 4 communes de Basse-Terre (rocher inclus), ainsi que 4 classes pour l'ensemble des 6 communes de Grande-Terre.

Les Tableau 9 et Tableau 12 donnent respectivement pour la Basse-Terre et la Grande-Terre, la correspondance entre les zones géotechniques et les classes d'effets de site.

Les Figure 27 et Figure 28 donnent respectivement pour la Basse-Terre et la Grande-Terre, les spectres de réponse à 5% d'amortissement calculés pour chaque classe de sol ainsi que le spectre spécifique correspondant proposé. Les sigles M1, M2, N1 et N2 représentent respectivement la réponse calculée pour la zone à l'accélérogramme Modifié 1, l'accélérogramme Modifié 2, l'accélérogramme Naturel 1 et l'accélérogramme Naturel 2. Ces spectres de réponse élastiques sont donnés en accélération en fonction de la période par souci d'homogénéité avec la représentation des spectres forfaitaires nationaux.

Les Tableau 10 et Tableau 13 donnent pour les bâtiments neufs de classe d'importance II (EC8), les valeurs numériques des paramètres permettant de reconstruire les spectres de réponse en accélération et de trouver analytiquement la valeur de l'accélération spectrale pour toute valeur de la période. Pour cela, les formes de spectres du type de celles préconisées dans les EC8 (AFNOR, 2005) ont été utilisées (Figure 10).

Enfin, la cartographie finale des effets de site lithologiques et les spectres spécifiques sont représentés sur la Figure 27 (Basse-Terre) et la Figure 29 (Grande-Terre).

Communes de Basse-Terre

Pour les 4 communes étudiées de la Basse-Terre, le zonage géotechnique a permis de distinguer 27 zones (y compris le rocher) caractérisées par 1 ou 2 colonnes type ; 32 colonnes ont donc été définies pour permettre le calcul numérique de la réponse des sols en 1D. Suite à

un certain nombre de regroupements de spectres, 6 classes d'effets de site lithologiques ont été retenues:

- Classe BT0 : rocher (zone 0) ;
- Classe BT1 : anciennes laves altérées ;
- Classe BT2 : zones alluvionnaires de Petit-Bourg et Goyave ;
- Classe BT3 : zones d'altérites (argiles d'altération) ;
- Classe BT4 : zones alluvionnaires autres ;
- Classe BT5 : complexe volcanique altéré de la Soufrière ;
- Classe BT6 : zones à effet de site à haute fréquence.

La classe BT1 est à rapprocher de la classe 3 du microzonage Baie-Mahault/Lamentin (Bertil *et al.*, 2009).

La classe BT6 regroupe trois zones (17, 24 et 32) pour lesquelles les colonnes de sol sont mal contraintes (voir les commentaires associés aux colonnes de sol du paragraphe 5.4.2). Elle est donc sujette à caution et son spectre de réponse, très pénalisant et peu réaliste en termes d'amplification, est donné à titre indicatif. Pour cette classe particulière, il est recommandé de ne pas utiliser ce spectre et de réaliser une étude de sol au droit du site à construire.

Il est à noter que nous avons volontairement conservé les alluvions dans des classes distinctes des autres types de formations afin de tenir compte de leur comportement potentiel en termes de liquéfaction.

Sols	Classe BT-1	Classe BT-2	Classe BT-3	Classe BT-4	Classe BT-5	Classe BT-6
Andésite altérée			X			
Brèches pyroclastiques	X					
Formation de remaniement	X					
Alluvions Petit-Bourg centre		X				
Vase de Petit-Bourg				X		
Alluvions Rivière Lézarde		X				
Alluvions Grande Rivière à Goyaves (PB)				X		
Lapillis et ponces dacitiques			X			
Tuf volcanique	X					
Alluvions limite Petit-Bourg/Goyave		X				
Alluvions Rivière à Goyave (GOY)		X				
Alluvions Ste Marie (CBE)				X		
Coulée massive andésitique			X			

Dépôt de lahars (CBE)						X
Brèche andésitique (complexe volcanique récent)						X
Dépôts pyroclastiques Petites Mamelles			X			
Dépôts pyroclastiques Grand Carbet					X	
Lapillis et scories (volcanisme Mornes Liquin_Laffite)			X			
Andésite basique (Phase Madeleine)					X	
Argiles de Saint-Sauveur					X	
Lahars de Saint-Sauveur					X	
Sable argileux			X			
Dépôts pyroclastiques à blocs d'andésite					X	
Andésite basaltique (Phase Trois-Rivières)						X
Coulée de ponces dacitiques (Monts Caraïbes)					X	

Tableau 9 : Correpondance pour les communes de Basse-Terre entre les zones géotechniques et les classes d'effets de site lithologiques.

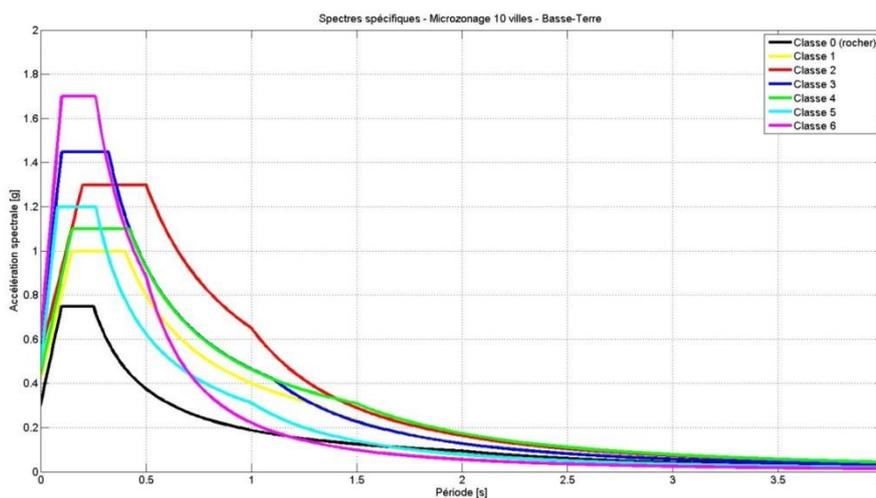


Figure 26 : Spectres de réponse spécifiques proposés pour les différentes classes d'effets de site lithologiques sur les communes de Basse-Terre.

Classes d'effets de site lithologique	R_A	R_M	T_B	T_C	T_D
BT-0 (rocher)	0.3	0.75	0.1	0.25	2
BT-1	0.42	1.0	0.15	0.4	1.3
BT-2	0.53	1.3	0.2	0.5	1
BT-3	0.58	1.45	0.1	0.32	1.1
BT-4	0.44	1.1	0.15	0.42	1.5
BT-5	0.47	1.2	0.08	0.26	1
BT-6	0.6	1.7	0.1	0.26	0.5

Tableau 10 : Paramètres des spectres de réponse élastiques par classe d'effets de site lithologiques pour les communes étudiées de Basse-Terre.

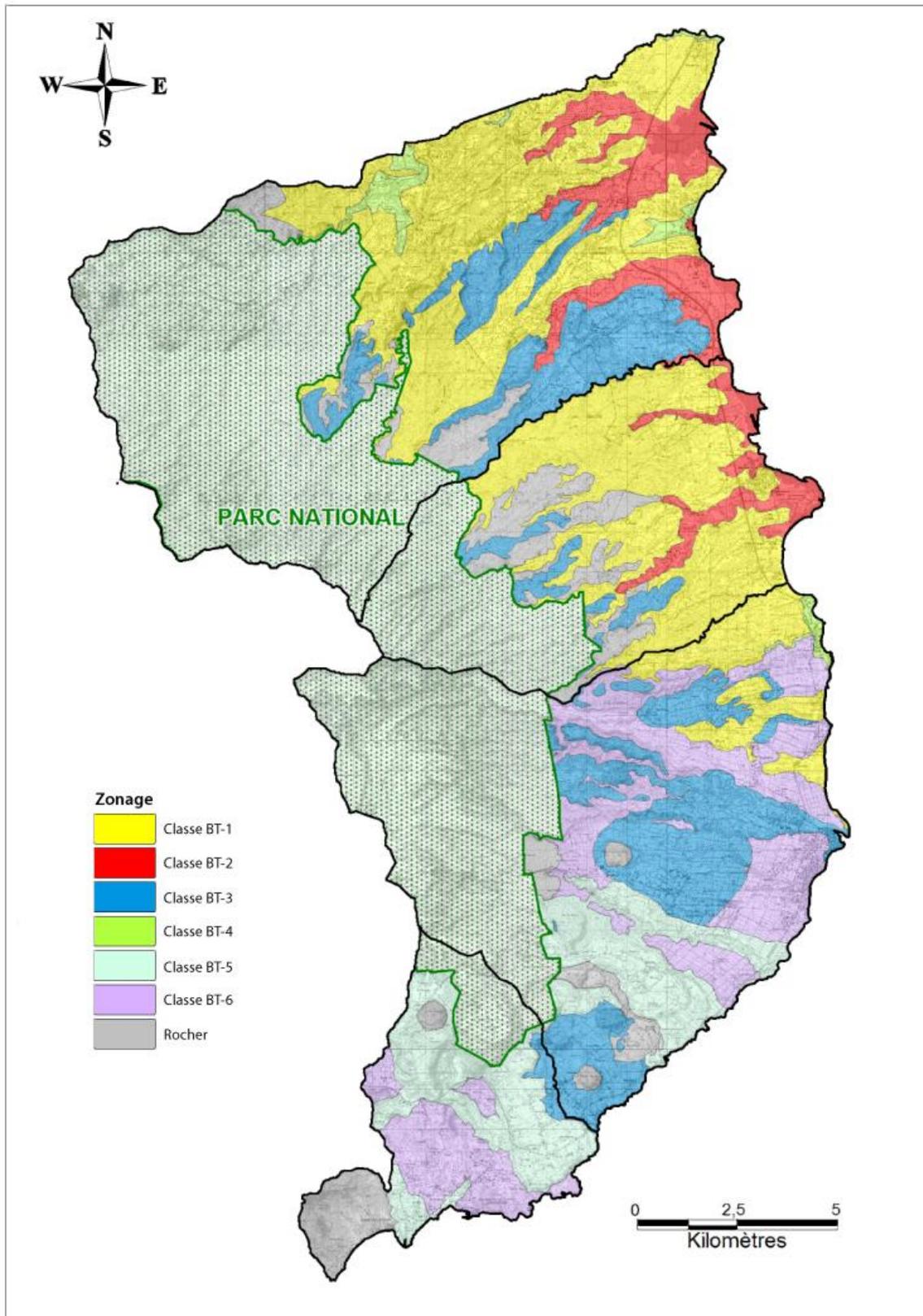


Figure 27 : Zonage spécifique des zones à effets de site lithologiques pour les communes de Basse-Terre.

Pour faciliter l'application des résultats obtenus en termes d'effets de site lithologiques pour la construction des maisons individuelles, nous donnons, à titre indicatif, la correspondance entre les classes d'effets de site lithologiques et les types de sols du guide de construction parasismique CP-MI Antilles (AFPS, 2004) dans le Tableau 11.

Classes d'effets de site lithologiques	Type de sols (selon les CP-MI Antilles)
BT-0 (rocher)	F8
BT-1	F5 à F6
BT-2	F1 à F3
BT-3	F5 et F1 à F3 pour sol 1c
BT-4	F1 et F3
BT-5	F5 et F7
BT-6	F5 et F7

Tableau 11 : Correspondance entre classes d'effets de site lithologiques et types de sol selon les CP-MI Antilles(2004).

Communes de Grande-Terre

Pour les 6 communes de la Grande-Terre étudiées, le zonage géotechnique a permis de distinguer 13 zones caractérisées par 1 à 2 colonnes types. En tout, 18 colonnes ont donc été définies pour permettre de calculer numériquement la réponse des sols 1D.

Ceci a permis de définir 4 classes d'effets de site lithologiques pour les communes de Grande-terre :

- Classe GT1 : formations argileuses de dépression et dunaires ;
- Classe GT2 : remblais marina du Gosier et calcaires altérés ;
- Classe GT3 : Remblais sur tourbière Gosier et Abymes ;
- Classe GT4 : terrains raides à rocheux.

Sols	Classe GT1	Classe GT2	Classe GT3	Classe GT4
Dune Sainte Anne	X			
Dune Gosier	X			
Remblais aéroport	X			
Remblais Marina Gosier		X		
Argile tourbeuse Gosier			X	
Remblais sur tourbière Gosier			X	
Remblais Saint-François	X			
Argile tourbeuse Abymes	X			
Argile sableuse (Moule)				X
Calcaires altérés		X		
Calcaires				X
Remblais sur tourbière Abymes			X	
Argiles de dépression	X			

Tableau 12 :Correspondance pour les communes de Grande-Terre entre les zones géotechniques et les classes d'effets de site lithologiques.

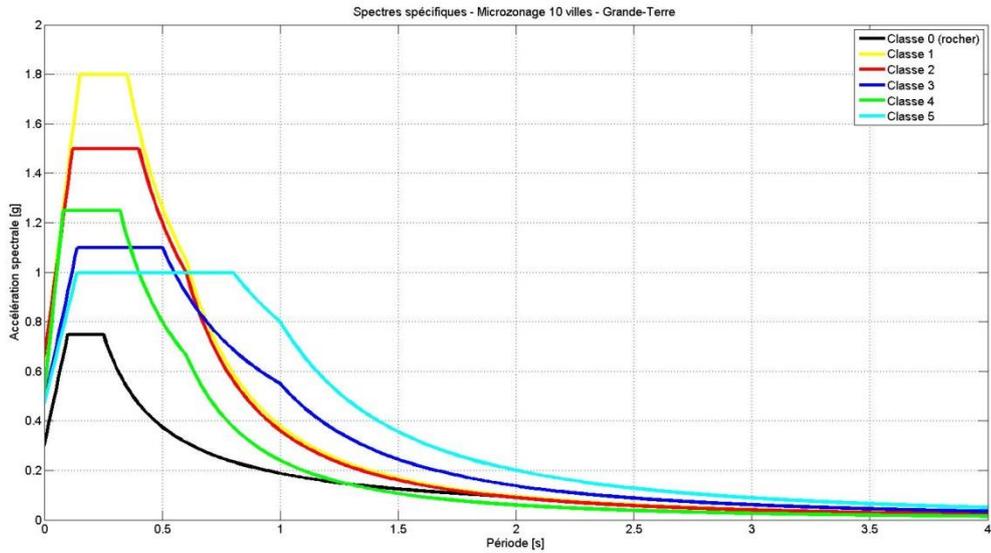


Figure 28 : Spectres de réponse spécifiques proposés pour les différentes classes d'effets de site lithologiques sur les communes de Grande-Terre.

Classes d'effets de site lithologiques	R_A	R_M	T_B	T_C	T_D
GT-1	0.64	1.8	0.15	0.35	0.6
GT-2	0.66	1.5	0.12	0.4	0.6
GT-3	0.47	1.1	0.14	0.5	1.0
GT-4	0.51	1.25	0.08	0.32	0.6

Tableau 13 : paramètres des spectres de réponse élastiques par classes d'effets de site lithologiques pour les communes étudiées de Grande-Terre.

Comme pour Basse-Terre, pour faciliter l'application des résultats obtenus en termes d'effets de site lithologiques pour la construction des maisons individuelles, nous donnons, à titre indicatif, la correspondance entre les classes d'effets de site lithologiques et les types de sols du guide de construction parasismique CP-MI Antilles (AFPS, 2004) dans le Tableau 14.

Classes d'effets de site lithologiques	Type de sols (selon les CP-MI Antilles)
GT-1	F1 à F3
GT-2	F1 et F2
GT-3	F1 à F3
GT-4	Calcaires : F6 et F8 Argile sableuse du Moule : F6

Tableau 14 : Correspondance entre classes d'effets de site lithologiques et types de sol selon les CP-MI Antilles (2004).

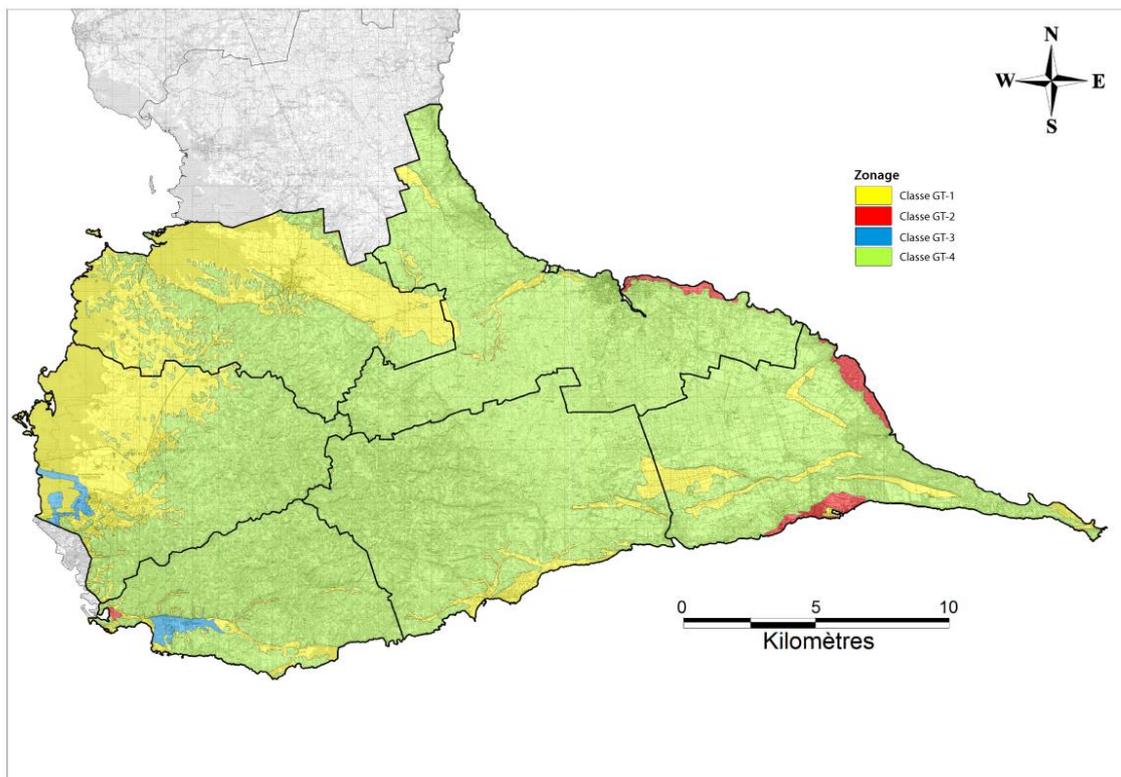


Figure 29 : Zonage spécifique des zones à effets de site lithologiques pour les communes de Grande-Terre.

5.6. COHERENCE AVEC LES MICROZONAGES EXISTANTS

En Guadeloupe, plusieurs communes ont fait l'objet de microzonages sismiques (Figure 30). Pour cette étude portant sur 10 nouvelles communes, nous nous sommes donc appliqués à conserver une cohérence géographique aux limites des zones d'étude ayant fait l'objet de microzonages.

Dans l'étape de structuration du zonage géotechnique (chapitre 5.3), nous avons tenu compte des unités géotechniques existantes et définies lors des microzonages les plus récents (Baie-Mahault/Lamentin, 2009 ; Agglomération de Basse-Terre, 2003) pour lesquelles la définition des unités reposait aussi sur les connaissances géophysiques et géotechniques. Dans la mesure où les données géologiques, géotechniques et géophysiques étaient cohérentes de part et d'autre de la limite communale, nous avons repris intégralement les définitions des colonnes de sol des microzonages antérieurs.

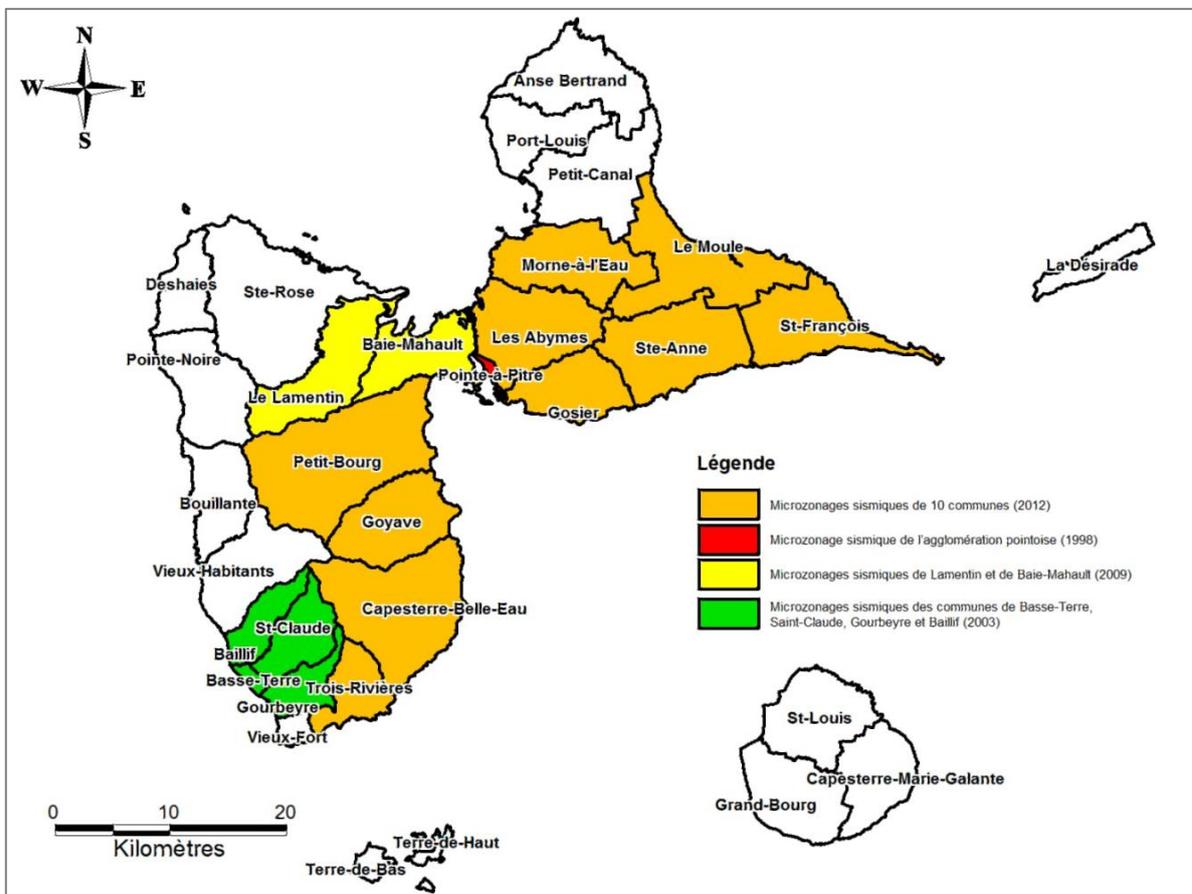


Figure 30 : Cartes des communes de Guadeloupe ayant fait l'objet d'un microzonage sismique.

Sur la Basse-Terre, la démarche retenue a été la suivante:

- Pour la limite Nord de la commune de Petit-Bourg : les colonnes de sol ont été reprises dans leur intégralité du microzonage de Lamentin / Baie-Mahault puisque la géologie, les profils sismiques et les fréquences de résonance obtenues étaient similaires (brèches pyroclastiques, formations de remaniement et alluvions de la Grande Rivière à Goyaves).

- Pour la limite ouest de Trois-Rivières : la colonne Y5 du microzonage de l'agglomération de Basse-Terre a été reprise sans aucune modification pour modéliser les dépôts pyroclastiques. Bien que cette colonne ne permette pas de retrouver de façon précise les fréquences de résonance issues des mesures de terrain, aucune donnée supplémentaire ne permet d'améliorer le calage. La zone impactée étant réduite et non urbanisée, il a donc été décidé de conserver cette colonne de sol.

Sur Grande-Terre, la démarche retenue a été la suivante:

- Pour les zones « remblais sur tourbière des Abymes », « argile tourbeuse Abymes » et « argile tourbeuse Gosier » : les colonnes type retenues sont reprises de l'étude de 1998 (même géologie, fréquences de résonance cohérentes).
- pour la zone « remblais sur tourbière du Gosier », la colonne type retenue est reprise de l'étude de Belle-Plaine.

Pour certaines zones en revanche, l'analyse des données acquises lors de ce microzonage a mis en évidence des réponses sismiques distinctes de celles proposées dans les microzonages antérieurs. C'est le cas notamment au Sud de la Basse-Terre, où les laves considérées comme ayant un comportement rocheux dans le microzonage de Basse-Terre de 2004 (i.e. sans amplification du sol) sont finalement apparues comme fortement altérées en surface et donc susceptibles de présenter des amplifications sous séisme. Il s'agit en particulier des andésites et des ponces situés sur la commune de Trois-Rivières (zones « Andésite basaltique » et « coulées de ponces dacitiques »).

Nous considérons que l'amélioration de la connaissance des formations volcaniques antillaises d'une part et une meilleure couverture géographique des mesures *in situ* d'autre part, permet de proposer, avec cette étude, un zonage mieux adapté en termes de réponse sismique.

5.7. SYNTHÈSE DE LA RÉFLEXION MÈNEE SUR LE DECOUPLAGE ENTRE « ALEA LOCAL » ET « ALEA REGIONAL »

La restitution sous forme de « fonctions de site » proposée dans le programme technique de cette étude n'a pas été retenue. L'objectif initial était de réfléchir à une solution pour rendre le résultat de « l'aléa local » indépendant de « l'aléa régional » préconisé. L'idée était de pouvoir recalculer facilement les spectres de réponse tenant compte des effets de site lithologiques en cas de modification du niveau d'agression régionale (par exemple en cas de changement de la réglementation nationale ou si la puissance publique décide de changer le niveau d'agression sismique régionale à prescrire dans un PPR).

Pour résoudre la question posée, deux modes de représentation de l'aléa sismique local ont été testés :

- effets de site définis sous forme d'une fonction de transfert $H(f)$. Il est alors possible de calculer un spectre spécifique de chaque zone de réponse homogène à partir d'un spectre de référence représentatif de l'aléa sismique régional de son choix et de la fonction de transfert $H(f)$. On l'appellera « **fonction de site** » dans le présent document.
- effets de site définis sous forme d'un spectre normalisé tel que paramétré dans l'EC8 partie 1 avec les coefficients TB, TC, TD, a_g et S. Le spectre spécifique de la zone peut être reconstitué à partir du niveau d'agression régional, d'un coefficient d'amplification et d'un décalage des périodes spectrales associées au palier.

Les tests effectués dans le cadre de cette étude ont été réalisés sur les données disponibles dans le cadre d'un microzonage existant, celui de Trinité en Martinique (Roullé *et al.*, 2010). Ces tests sont donc partiels et ne peuvent être extrapolés sans une étude approfondie. Les résultats obtenus (voir les détails en annexe 4) montrent que :

- Le calcul d'une fonction de site, sous forme de rapports de spectres de réponse, s'avère réalisable et permet de reproduire de façon cohérente les réponses de sols à partir des colonnes définies pour le zonage géotechnique. Néanmoins, l'utilisation de ces fonctions de site s'avère délicate pour la phase de regroupements des zones géotechniques et l'obtention du zonage sismique du fait d'une plus grande sensibilité à la variabilité des réponses de sol à basse fréquence. Une étude complémentaire est nécessaire pour mettre en évidence les paramètres clefs de la réponse du sol à considérer pour faciliter les regroupements (comme les paramètres F_a et F_v du code américain IBC par exemple) ;
- L'utilisation de spectres normalisés avec une formalisation du type EC8 (paramètres a_g , S , T_B , T_C et T_D) ou IBC (Accélérations à 0,2 et 1s de période, amplifications F_a , F_v et paramétrisation des périodes associées au plateau) est, elle aussi, envisageable moyennant des adaptations liées au contexte local (pour les EC8 par exemple, les calculs réalisés sur la commune de Trinité montrent que l'hypothèse selon laquelle $R_A/R_M=2.5$ n'est pas valable) ;

D'une manière générale, la prise en compte de modifications **modérées** de niveaux d'agression sismique au niveau de l'aléa régional (c'est-à-dire la modification du p_{ga} ou de la valeur du plateau en accélération sans modification des périodes définissant le plateau et la décroissance du spectre au rocher) semble tout à fait envisageable que ce soit à travers l'utilisation de fonctions de site ou de spectres normalisés.

Néanmoins, dans le contexte d'aléa fort des Antilles, les problèmes de non-linéarité sont présents et peuvent modifier considérablement la réponse d'un sol sous sollicitation sismique selon le niveau d'agression considéré. Ils devront être considérés de façon plus poussée dans une étude postérieure afin de définir clairement les limites de validité des solutions proposées.

Enfin, si le spectre définissant l'aléa régional subit une modification importante du fait d'une amélioration substantielle de la connaissance (notamment une modification de la forme du spectre via ses paramètres T_B , T_C par exemple), la réponse sismique des sols est elle aussi modifiée avec un contenu fréquentiel de l'excitation sismique différent. Il n'a pas été possible de quantifier les modifications liées à ce cas de figure dans le cadre de ce microzonage, ni de définir le seuil en-dessous duquel ce type d'effet est négligeable.

Le découplage entre aléa régional et aléa local est complexe dans ce contexte de forte sismicité et nécessite des investigations plus approfondies.

6. Effet de site topographique

6.1. 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.

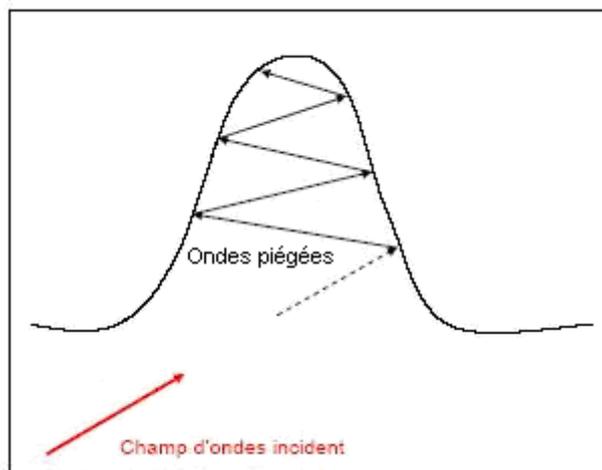


Figure 31 : principe des effets topographiques

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 τ (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. Bien que la prise en compte des effets topographiques soit similaire dans les règles parasismiques PS-92 et EC8, le calcul du coefficient τ est décrit de façon plus explicite dans les règles PS-92. Nous nous sommes donc appuyés, dans ce chapitre, sur les règles PS-92 (AFNOR, 1995).

6.2. PRINCIPE DE LA REGLEMENTATION

Le principe du calcul du coefficient τ est le suivant (d'après les règles PS92).

Si l'on considère une arête B délimitant un versant aval de pente I (tangente de l'angle de pente) et un versant amont de pente i (Figure 32), et si :

- $H \geq 10$ m (H étant la hauteur de l'arête au-dessus de la base du relief) ;
- $i \leq 1/3$;

alors le coefficient τ 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) :

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

La valeur de τ 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, τ prend la valeur 1 à l'aval du point A et à l'amont du point D.

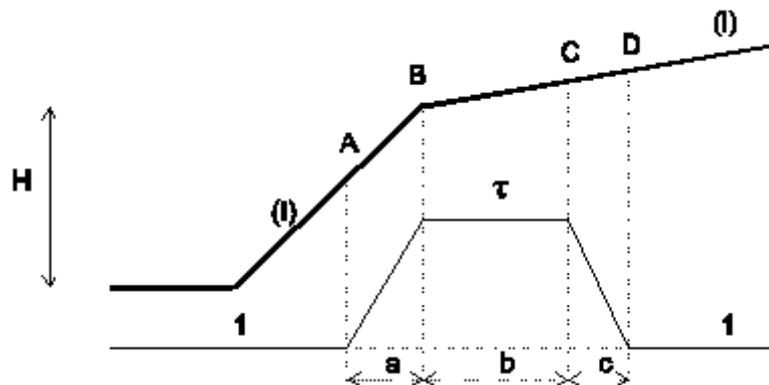
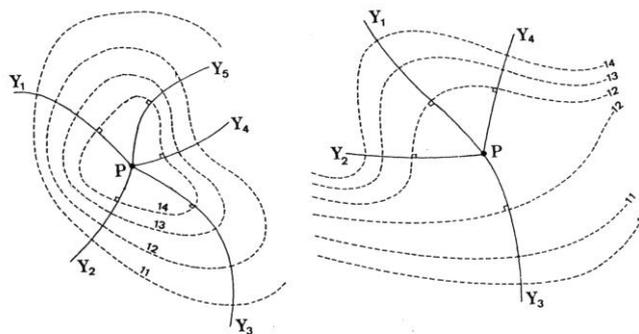


Figure 32 : Principe de calcul du coefficient τ pour l'évaluation des effets de site topographiques.

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 33 montre, pour un point de calcul, les différents profils sur lesquels il est possible de calculer le coefficient τ . On voit que selon le profil pris en compte, la valeur de τ 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 33 : Choix des profils pour le calcul du coefficient τ .

6.3. EVOLUTION DE LA CONNAISSANCE ET DE LA REGLEMENTATION

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

Lors du 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 avéré 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 PS92 et EC8 impose l'emploi du coefficient τ pour la construction d'ouvrages.

6.4. CARTOGRAPHIE

Dans le cadre d'une cartographie à l'échelle communale ou supérieure, les profils ne peuvent être multipliés indéfiniment. Il est donc nécessaire d'adapter ces règles. Par conséquent, sur le territoire des dix communes étudiées, 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 d'étude par le programme *SUPER*TAU du BRGM, qui reprend le principe de calcul des règles PS92 françaises, et calcule la valeur de τ en chaque maille du modèle numérique de terrain (MNT). Pour ce faire, nous avons dans un premier temps considéré un MNT au pas de 20 mètres sur l'ensemble de la zone d'étude. Compte-tenu de la grande complexité de la topographie de la zone des Grands-Fonds dont ne peut tenir compte un MNT au pas de 20 m, nous avons dans un second temps procédé pour cette zone à un calcul utilisant un MNT plus précis au pas de 10 m.

Le temps de calcul augmentant de manière significative avec le nombre de cellules, et le logiciel *SUPER* ne pouvant gérer des calculs très fins sur des surfaces importantes, il n'a pas été jugé opportun d'étendre l'analyse sur le MNT de 10 m au restant de la zone d'étude, dont la topographie est jugée correctement prise en compte par le MNT au pas de 20 m.

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) partie Risques Sismiques (Fabriol et Garry, 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. La cartographie des zones susceptibles de présenter un effet de site topographique se faisant de façon qualitative (nous ne distinguons pas les différentes valeurs du coefficient τ puisque celui-ci ne correspond pas à une estimation physique du phénomène), nous préconisons volontairement le facteur multiplicatif le plus pénalisant pour tenir compte de l'effet topographique.

Les différentes zones susceptibles de présenter un effet de site topographique sont présentées sur les Figure 34 et Figure 35. Pour la Basse-Terre, elle concerne essentiellement la zone du Parc National. Pour la Grande-Terre, elle ne concerne presque exclusivement que la zone des Grands-Fonds.

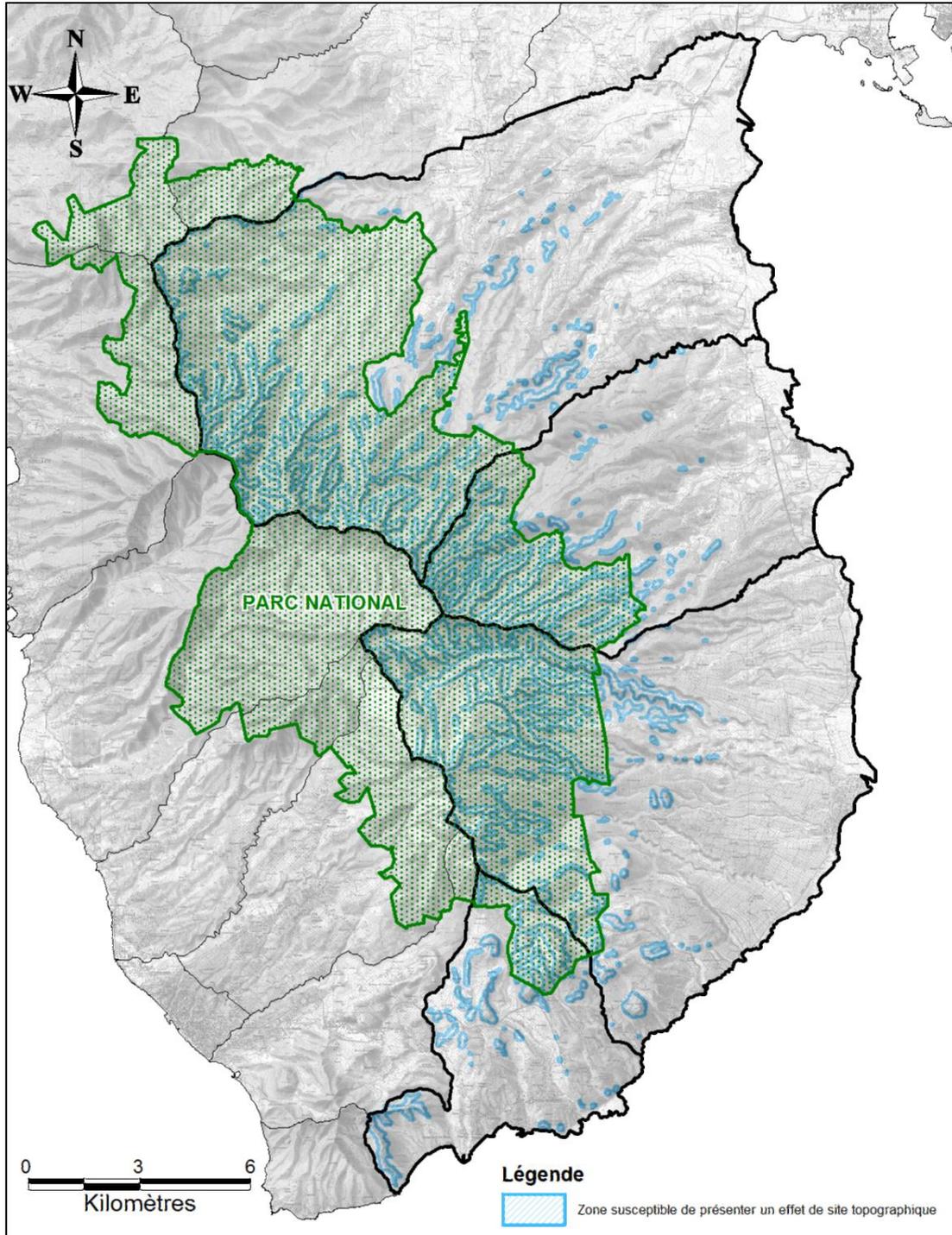


Figure 34 : Zones susceptibles de connaître un effet de site topographique sur les communes étudiées de Basse-Terre. La cartographie de l'effet de site topographique dans la zone d'emprise du Parc National n'est montré qu'à titre indicatif sur cette figure.

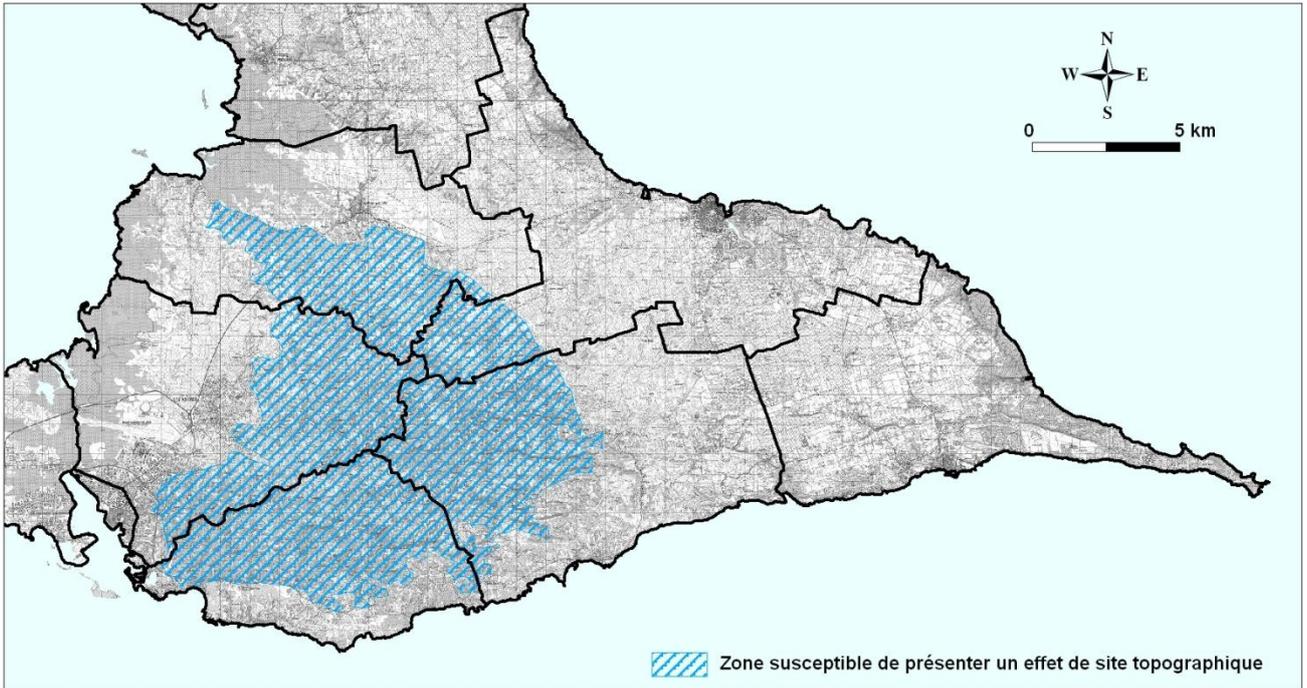


Figure 35 : Zones susceptibles de connaître un effet de site topographique sur les communes étudiées de Grande-Terre.

7. Failles actives

7.1. PREAMBULE – RAPPEL DES OBJECTIFS

L'objectif de cette partie de l'étude est d'inventorier sur la base des connaissances actuelles, les principales failles actives présentes sur le territoire de la commune des 10 communes étudiées et dans la mesure du possible de reporter leur tracé, avec leurs incertitudes associées, sur un fond IGN à l'échelle 1/25000^{ème}.

Cette étude a ponctuellement donné lieu à des visites sur le terrain, néanmoins aucune investigation de type tranchée paléosismique, forage, profil géophysique n'a été conduite. Ces dernières peuvent apporter des informations précises sur le tracé des accidents et/ou leur potentiel sismogénique (taux d'activité, période de retour des forts séismes capables de produire des ruptures en surface). Elles sont généralement conduites dans le cadre de travaux de recherche conséquents, ou bien dans le cadre d'études de site où l'implantation de bâtiment stratégique ou à risque est projeté.

Concernant les chapitres suivants, les indications sont extraites de Terrier et al. (2011). Il est possible de s'y référer pour disposer d'informations complémentaires.

7.2. LA PROBLEMATIQUE DE LA CARTOGRAPHIE DES FAILLES ACTIVES

Dans le cadre des Plans de Prévention du Risque Sismique, l'évaluation de l'aléa local doit considérer aussi les modifications de l'aléa liées directement à la présence de faille active sur le site. Il s'agit du domaine dit en champ proche, c'est-à-dire près du plan de rupture de faille. Dans ce cas, près de la surface du sol, les mouvements forts, caractérisés par une modification significative de la valeur d'accélération maximale du sol, peuvent être dominés par des déplacements permanents du sol ou ruptures en surface.

Concernant les déformations co-sismiques du sol, celles-ci sont susceptibles d'apparaître uniquement dans le cas des forts séismes. Le plan de faille rompu lors de l'évènement sismique peut alors s'étendre jusqu'à la surface du sol. Dans ce cas, les dommages générés viendront s'ajouter à ceux déjà causés par la violente vibration sismique.

Généralement, une faille est considérée active si elle a joué dans les temps historiques ou géologiques récents depuis l'établissement du régime tectonique actuel (état de contrainte, cinématique et taux de déplacement) et si elle est susceptible d'être réactivée par un séisme dans le futur. Concrètement, on considère souvent que les failles actives sont celles qui ont joué dans les derniers 35 000 ans ou qui ont joué plusieurs fois dans les 500 000 dernières années (Slemmons, 1977; Keller and Pinter, 1996).

Les différents paramètres qui permettent de caractériser une faille active concernent :

- sa géométrie : direction, pendage, extension en profondeur, longueur, segmentation ;
- sa cartographie : tracé connu ou supposé en surface, régulier, discontinu, segmentation ;

- sa cinématique : nature du mouvement, vitesse de mouvement, activité sismique ou creep (glissement lent).

Parmi les failles actives, on distingue :

- les failles actives asismiques : Le mouvement sur la faille se fait alors très lentement (vitesse annuelle d'ordre millimétrique à infra millimétrique) et de façon continue sans générer de sismicité (ou bien diffuse et de très faible magnitude) ;
- les failles actives sismogènes, on considère que le prochain glissement du plan de faille peut donner lieu à une rupture brutale, c'est-à-dire à un séisme.

Parmi les failles actives sismogènes, on considère aussi les failles capables, c'est-à-dire les failles capables de générer une rupture du plan jusqu'en surface du sol, et de fait donner lieu à un séisme de très forte magnitude. On considère qu'une faille est capable si elle a le potentiel pour générer des séismes de magnitude au moins égale à 5,5.

La Figure 36 résume schématiquement les critères géologiques, géomorphologiques et géophysiques qui, à partir d'une évaluation sommaire de l'activité et du potentiel sismogénique d'une faille, permettent d'établir un diagnostic sur l'activité de la faille (Valensise et Pantosti, 2001).

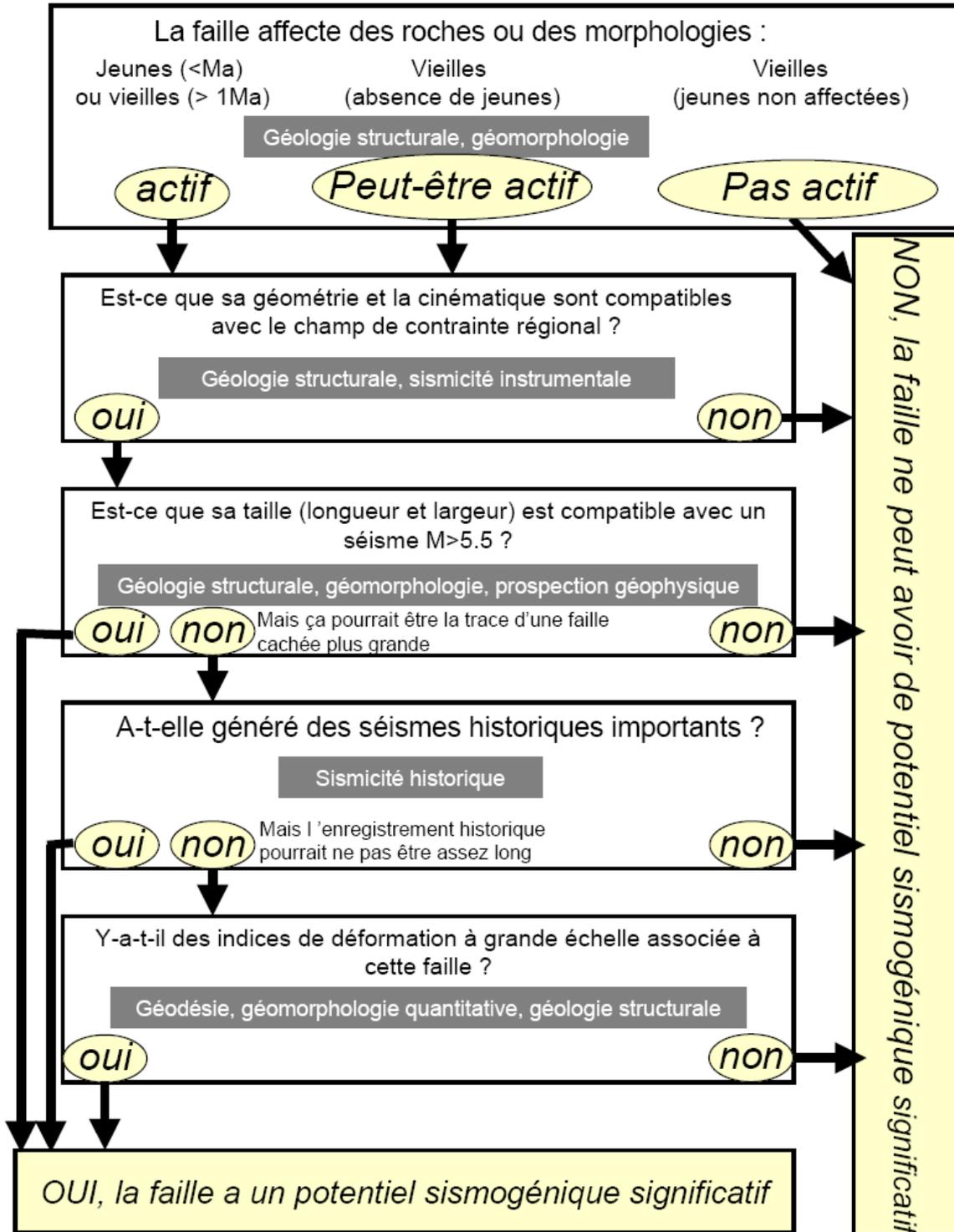


Figure 36 : Critères géologiques pour l'évaluation de l'activité et du potentiel sismogénique d'une faille (d'après Valensi et Pantosti, 2001).

7.2.1. Notions théoriques de failles actives

En théorie, les failles sont des déformations mécaniques cassantes dans les milieux fragiles de la croûte. Une faille est un plan de discontinuité se traduisant par un déplacement relatif entre deux compartiments rocheux. Le plan de faille est un plan de cisaillement ressemblant à une surface irrégulière parfois ondulée. La trace de la faille est l'intersection du plan de faille avec la surface terrestre. Avec l'érosion, l'escarpement de faille créé par le décalage de la surface terrestre se caractérise par une forte sinuosité.

En fonction du mouvement d'un bloc par rapport à un autre le long de la faille, on distingue trois types de failles :

- Les failles normales, ce sont des failles soustractives dont le toit est abaissé par rapport au mur et la composante horizontale exprime l'écartement de la croûte (régime en distension).
- Les failles inverses, il s'agit d'accidents additifs amenant des terrains anciens sur des terrains plus récents. Elles expriment un régime compressif. Les failles inverses sont des chevauchements quand les rejets sont d'ordre kilométrique ou des nappes de charriages si l'amplitude du chevauchement atteint plusieurs dizaines de kilomètres.
- Les décrochements, ils concernent les failles généralement verticales qui font coulisser un compartiment par rapport à un autre de façon horizontale. La composante verticale du déplacement est dans ce cas faible à nulle.

La cartographie des failles actives doit donc tenir compte d'une part des connaissances géométriques du système de failles principales et d'autre part, de ses relations avec les failles secondaires.

Dans la pratique, on définit une zone d'incertitude autour du tracé principal le plus probable de la faille active. Cette zone intègre aussi bien les incertitudes sur le tracé en surface de la faille principale que celles relatives aux déformations secondaires. Il n'y a par ailleurs aucune distinction de fait sur la capabilité des segments de la faille principale ou des failles secondaires.

7.2.2. Réglementation en cours

Les règles parasismiques françaises, PS 92, indiquent :

4.1.1. Voisinage des failles

Sauf nécessité absolue, aucun ouvrage ne doit être édifié au voisinage immédiat d'une zone faillée reconnue active, éventuellement repérée par les Plans d'Exposition aux Risques, dits PER ; ces plans peuvent fixer la largeur des bandes à neutraliser de part et d'autre de l'accident et, le cas échéant, des bandes dans lesquelles il convient de prendre en compte un mouvement de calcul plus sévère.

Le guide pour la réalisation des PPR sismiques, publié en 2002 par la DDPDR/SDRM précise :

(Pages 26-28)

Effets liés aux failles actives – Principales techniques de prévention

« La faille active est la zone sur laquelle se génère la rupture qui donne naissance à un séisme. Elle est considérée comme un aléa à partir du moment où la dislocation des terrains atteint la surface. (...). Le PPR offre la possibilité de maîtriser l'urbanisme dans les zones de failles avérées actives, en définissant de part et d'autre de son tracé, une bande qui peut donner lieu à des prescriptions particulières de construction en fonction du type de bâtiment(). Tout le problème réside dans la définition précise du tracé de la faille, de la probabilité d'apparition d'une rupture en surface et de la largeur de la zone de réglementation qu'elle implique.*

(). Il est possible de mettre en œuvre des dispositions constructives pour donner aux bâtiments une meilleure rigidité, donc une meilleure résistance aux déplacements différentiels.*

En Europe, l'EC8 (NF EN 1998-5, septembre 2005) stipule :

4.1.2 Proximité de failles sismiques actives

(1) Les bâtiments de catégories d'importance II, III, IV définies dans l'EN 1998-1:2004, 4.2.5, ne doivent pas être construits à proximité immédiate de failles tectoniques reconnues comme étant sismiquement actives dans les documents officiels publiés par les autorités nationales.

(2) Pour la plupart des structures ne présentant pas de danger pour la sécurité publique, une absence de mouvement pendant le Quaternaire récent peut être utilisée pour identifier les failles non actives.

(3) Des reconnaissances géologiques particulières doivent être réalisées pour l'établissement des plans d'occupation des sols et pour des structures importantes qui doivent être construites à proximité des failles potentiellement actives, dans des zones de forte sismicité, afin de déterminer le danger résultant en termes de ruptures de terrain et de sévérité des secousses.

Aujourd'hui, ni les réglementations / recommandations françaises, ni celles européennes ne précisent ce qui est entendu par faille active ou par zone de neutralisation.

7.3. LA DEMARCHE CARTOGRAPHIQUE

7.3.1. Principe

Dans cette étude, différentes étapes ont été mises en œuvre pour cartographier les failles capables de produire des ruptures en surface. Pour l'ensemble des accidents recensés, l'approche développée est la suivante :

1/ Synthèse

La première étape consiste à réaliser une synthèse documentaire. Elle vise à recueillir l'ensemble des études réalisées sur les failles ou dans leur environnement proche. Les données retenues sont issues de rapports d'expertise, de thèses, des PPR multi-aléas et de données de type sondages géotechniques, profils sismiques, mesures géochimiques. Ces documents peuvent concerner des informations factuelles très localisées ou au contraire des interprétations synthétiques régionales.

2/ Analyse géomatique

Dans un second temps, les données géologiques, géophysiques et microtectoniques sont agencées sous la forme d'un Système d'Information Géographique (S.I.G.), référencées dans le système UTM WGS84 Nord 20. L'examen du modèle numérique de terrain et la réalisation de profils topographiques peuvent indiquer des structures géomorphologiques qui pourraient être associées à l'activité d'une faille.

3/ Contrôle

La troisième étape consiste à contrôler, sur des sites accessibles, les objets structuraux et microstructuraux issus de la synthèse documentaire et des linéaments identifiés par analyse géomatique.

7.3.2. Identification des failles actives

Deux cas de figures sont à considérer en Guadeloupe :

- l'île calcaire de la Grande-Terre : la plateforme calcaire constitue un excellent marqueur morphostructural, en outre, il existe plusieurs études sur les failles actives ;
- l'île volcanique de la Basse-Terre : vu le contexte géologique, les failles s'expriment mal à travers la morphologie, en outre les ruptures en surface peuvent rapidement disparaître sous l'effet de l'érosion ou d'un nouveau dépôt volcanique ou volcano-sédimentaire. D'autre part, la Basse-Terre a peu fait l'objet d'études de site sur les failles.

La recherche bibliographique a permis de s'appuyer principalement sur les rapports PPR multi-aléas, l'étude BRGM de Godefroy et al. (1990), la thèse de N. Feuillet (2000) et l'étude des failles actives aux Antilles de Terrier et al. (2002). Le mécanisme de ces failles est normal. Les travaux de Feuillet (2000) sur la tectonique des Petites Antilles ont mis en évidence ces systèmes de failles normales jalonnant l'arc externe des Petites Antilles, permettant d'accommoder la composante extensive du système.

Les failles actives reconnues sur les dix communes sont au nombre de 10 en Basse-Terre (Tableau 15 et Figure 37) et de 16 en Grande-Terre (Tableau 16 et Figure 38).

Nom de la faille	Orientation	Commune
Vernou	N 60 ° E	Petit-Bourg
Goyave	E-W	Goyave
Sans-Toucher_Sainte-Marie	N 60 ° E	Capesterre Belle-Eau
Cambrefort	N 50 ° E	Capesterre Belle-Eau
Matélieane_Rivière de Capesterre	N 125 ° E	Capesterre Belle-Eau
Capesterre	N 100 ° E	Capesterre Belle-Eau
Soufrière Est	N 135 ° E	Capesterre Belle-Eau
Morne Liquin	E-W	Capesterre Belle-Eau/ Trois-Rivières
Monts-Caraïbes_Madeleine	N 60 ° E	Trois-Rivières
E-W Monts-Caraïbes	N 100 ° E	Trois-Rivières

Tableau 15 : Failles actives identifiées sur les communes de Basse-Terre étudiées.

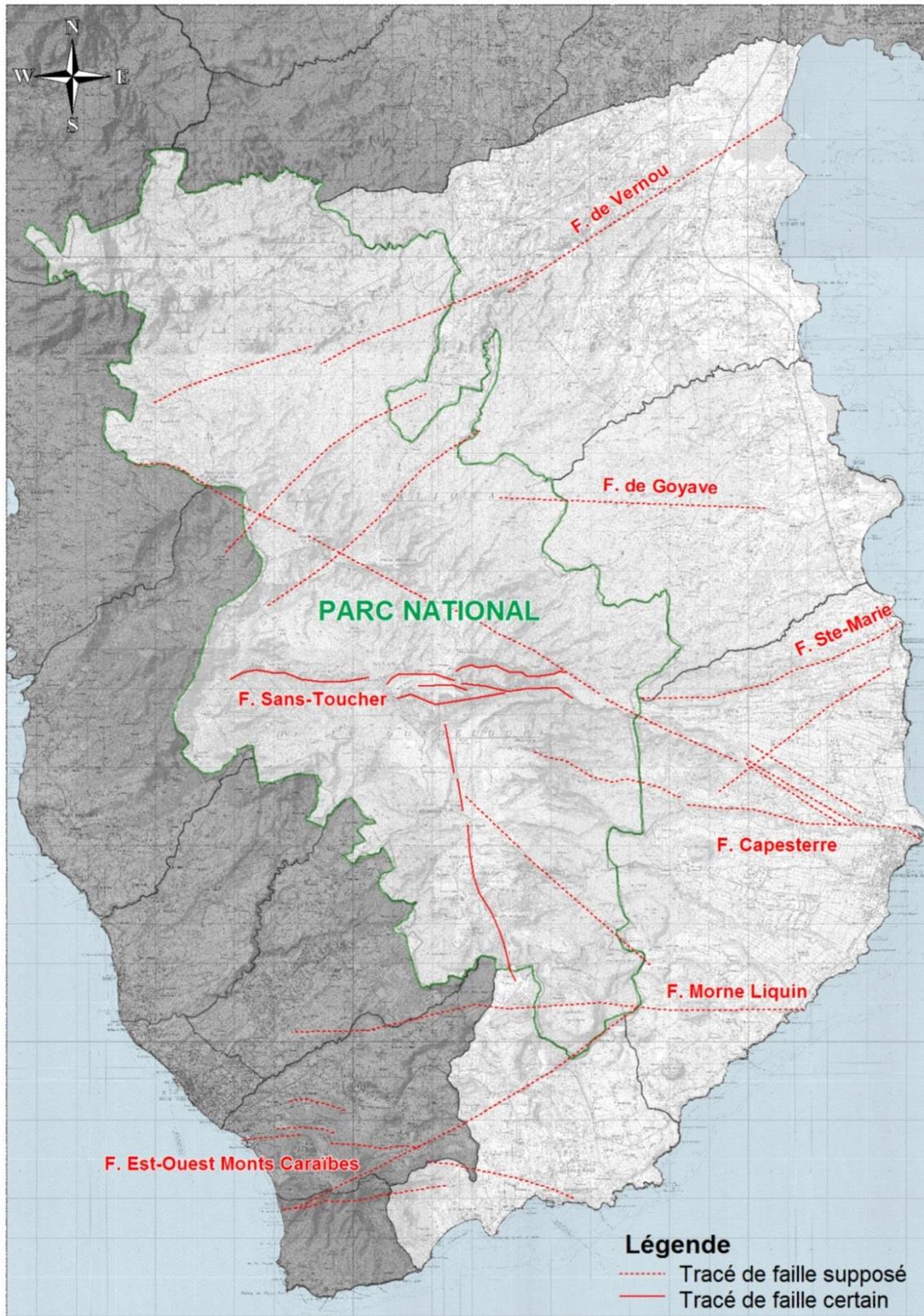


Figure 37 : Carte du tracé des failles actives identifiées sur les 4 communes de Basse-Terre. La différence entre tracé supposé et tracé confirmé est donné au paragraphe 7.3.3. La cartographie à l'intérieur du Parc National n'est montré qu'à titre indicatif sur cette figure

Nom de la faille	Orientation	Jeu
Fond Saint-Bernard	N 110 ° E	Saint-François
Belle Allée	N 120 ° E	Saint-François
Alleaume	N	Saint-François/Moule
Anse à l'Eau	E-W à l'ouest, N 40 ° E à l'est	Saint-François
Bragelogne	E-W	Saint-François/Sainte-Anne
May	N 70 ° E	Saint-François/Sainte-Anne
Douville	E-W	Sainte-Anne
Louisianne-Poirier	E-W	Sainte-Anne
Valet	E-W	Sainte-Anne
Système côtier	N 70 ° E	Saint-François/Sainte-Anne
Kancel-Guillon	E-W	Gosier/Sainte-Anne
Gosier	E-W	Abymes / Gosier
Rivière Salée	N 170 ° E	Abymes
Grippon	N 110 à 140° E	Morne à l'Eau / Moule/ Sainte-Anne
Moule	N 50° E	Moule
Sainte-Marguerite	N 130° E	Moule

Tableau 16 : Failles actives identifiées sur les communes de Grande-Terre étudiées.

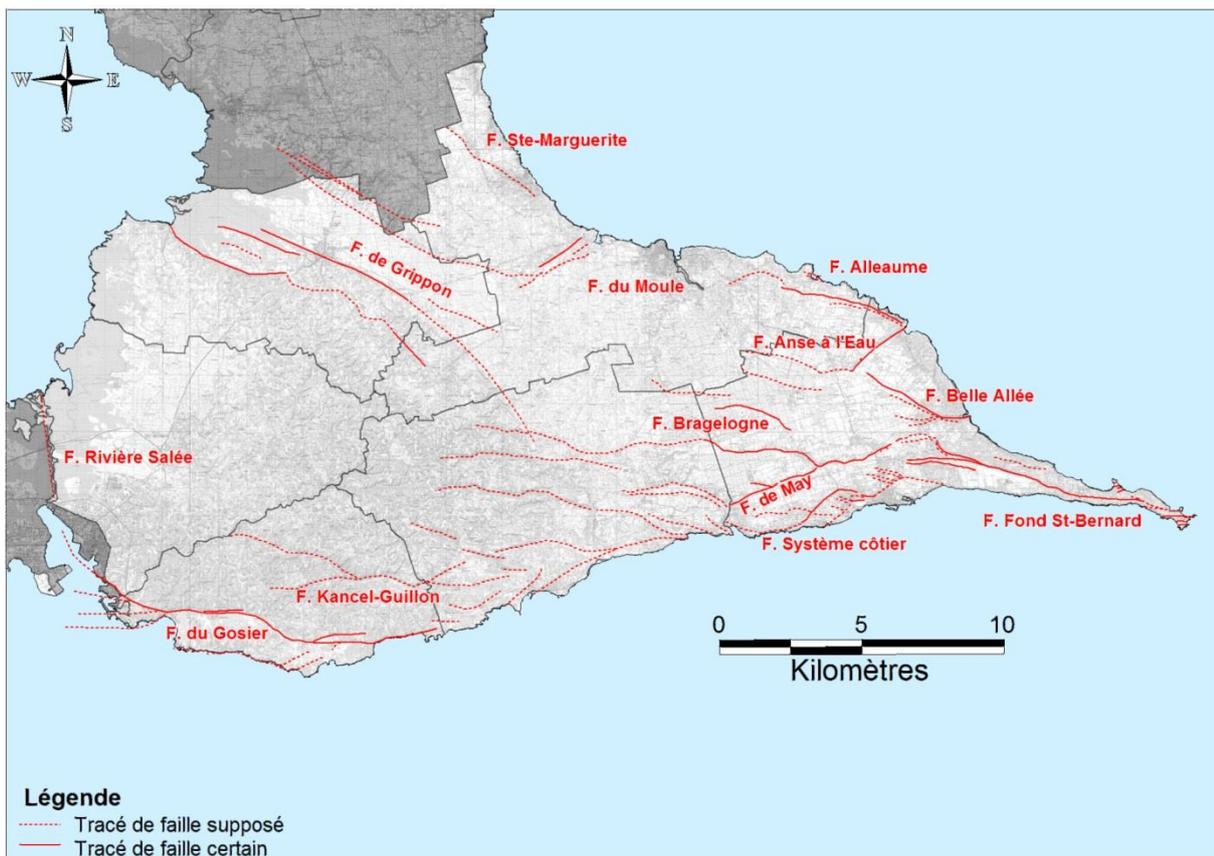


Figure 38 : Carte du tracé des failles actives identifiées sur les 6 communes de Grande-Terre. La différence entre tracé supposé et confirmé est donné au paragraphe 7.3.3.

7.3.3. Largeur des bandes d'incertitude

Les largeurs des bandes d'incertitude des failles sont définies en fonction des indications sur :

- la géomorphologie (pentes, contraste altimétrique, changements brutaux du réseau hydrographique, recul de l'escarpement) ;
- la connaissance de la faille ou du système de failles (observations de terrains, fiabilité et précision des informations). Quand les conditions de terrain le permettent, il est possible d'apprécier la largeur de la zone d'incertitude, donné par l'extension de la zone déformée.

Ces limites de bandes prennent en considération l'imprécision sur la localisation des failles et la possible existence de branches actives.

Pour pallier aux incertitudes sur la géométrie et le tracé du système de failles principales et secondaires, la méthode suivie consiste à positionner une zone tampon de part et d'autres des tracés de la faille. Plusieurs niveaux d'incertitude sont retenus, dont :

25 mètres :

- rupture nette mettant en contact deux unités de lithologie ou d'âge différent ;
- observation d'une zone broyée constituant le plan de faille ;
- les informations sont fiables et précises.

50 mètres :

- observation de fissures parallèles à l'escarpement de faille ;
- observation de zones broyées constituant plusieurs plans synchrones ;
- expression morphotectonique forte ;
- indices géophysiques à l'échelle locale ;
- les informations sont fiables et précises.

100 mètres :

- observation de fissures parallèles à l'escarpement de faille ;
- observation de petites failles en amont de l'escarpement ;
- recul probable de l'escarpement ;
- expression morphotectonique moyenne ;
- indices géophysiques à l'échelle régionale ;
- les informations sont fiables.

250 mètres :

- recul probable de l'escarpement ;
- expression morphotectonique faible ;
- indices géophysiques à l'échelle régionale ;
- les informations sont discutables.

500 mètres :

- faille pressentie sur la base de l'interprétation géologique régionale ;
- pas d'observations directes ou indirectes.

7.4. RECOMMANDATIONS

Dans les rapports spécifiques aux communes, chaque faille fait l'objet d'une fiche présentant un descriptif détaillé (localisation, longueur, incertitude). La classification des failles réalisée par Terrier et al. (2002) ainsi que les indications sur la longueur des failles peuvent constituer des éléments d'aide à la décision sur la prise en compte des failles au niveau des documents d'urbanisme.

En effet, on peut considérer que les failles de longueur inférieure à 5 km ne sont pas capables de produire des séismes de magnitude au moins égale à 5,5 ou de produire de ruptures en surface du sol.

Par ailleurs selon la recommandation réglementaire actuelle, les failles qui sont reconnues actives sont celles où des déformations tectoniques plio-quadernaires ont pu être observées ou bien qui sont clairement associées à des épacentres de séismes. Ainsi, outre les informations apportées sur les longueurs de failles, sur la base de la classification des failles actives de Guadeloupe (Terrier et al., 2002), les préconisations suivantes peuvent être formulées :

- Catégorie 3 : failles classées parmi les plus actives régionalement ; *il est proposé d'en tenir compte dans le cadre de PPR* ou d'autres documents d'urbanisme, et cela quel que soit le niveau de connaissances associées.
- Catégorie 2 : failles à *discuter au cas par cas* entre l'Etat et les communes.

Ainsi, il peut être proposé, entre autre :

- de ne les retenir que dans le cas de projet de bâtiment d'importance IV ;
- de ne retenir que celles qui régionalement paraissent les mieux connues.

- Catégorie 1 : failles régionales *a priori* parmi les moins actives, *elles peuvent ne pas être prises en considération* dans le cadre de projet de PPR ;

La carte des failles actives et des zones d'incertitude distinguent ainsi 3 catégories de failles :

- Les failles sismogènes, actives (catégorie 3), de longueur supérieure à 5km ;
- Les failles sismogènes moyennement actives (catégorie 2), de longueur supérieure à 5km, ou faille secondaire d'une faille principale sismogènes active (le jeu de la faille principale pouvant entraîner le mouvement sur la faille secondaire) ;
- Les failles peu actives (catégorie 1) ou de longueur inférieure à 5 km.

Le tableau de l'annexe 3 synthétise les informations sur les principaux segments de failles cartographiés.

8. Aléa mouvements de terrain

8.1. CADRE GENERAL ET OBJECTIF DE L'ETUDE

Les séismes peuvent être à l'origine des phénomènes de mouvement de terrain, on parle alors d'effets dit « induits ». Ces mouvements de terrain engendrent, dans certains cas, des dégâts plus importants que ceux provoqués par les vibrations du sol. Ce fut le cas lors du séisme du 12 janvier 2010 en Haïti, ou lors du séisme des Saintes en 2004 (désordres causés par des mouvements de terrain aux Saintes et au sud de la Basse-Terre). Les mouvements de terrain ne sont cependant pas exclusivement provoqués par les séismes. Ils peuvent également être engendrés par de fortes pluies et/ou par l'action de l'homme.

Une étude de microzonage sismique comporte donc nécessairement un volet consacré à "l'aléa mouvements de terrain", étant précisé que dans la définition de l'aléa, interviennent conjointement les sollicitations sismiques et hydro-pluviométriques.

Sur les 10 communes concernées par l'étude, les 4 communes localisées en Basse-Terre (Petit-Bourg, Goyave, Capesterre Belle-Eau, Trois-Rivières) sont les plus exposées à cet aléa. En effet, la Basse-Terre cumule un certain nombre de facteurs propices aux mouvements de terrain : forts reliefs, précipitations abondantes, roches volcaniques altérées. La présence du volcan actif de la Soufrière dans la partie méridionale de l'île fait peser un risque encore plus important. En Grande-Terre, île constituée de plateaux calcaires plio-pléistocènes aux reliefs émoussés reposant sur un substratum volcanique, le risque est existant mais moins élevé.

Une étude de cartographie de l'aléa mouvement de terrain a déjà été réalisée dans toutes les communes de Guadeloupe. La pertinence de réutiliser en totalité ou en partie ces différentes études est variable selon l'objectif de l'étude antérieure concernée (Atlas des risques, PPR, travaux de recherche) et selon les techniques mises en œuvre pour la réaliser.

Concernant les 10 communes étudiées, seule la cartographie de la commune de Petit-Bourg peut être considérée comme non pertinente par rapport aux objectifs visés et mérite d'être réévaluée. Les résultats de cette étude sont présentés dans le rapport spécifique pour Petit-Bourg. Les autres communes bénéficient d'une évaluation récente de l'aléa mouvement de terrain dans le cadre des PPR. En l'absence d'évolution méthodologique et de données nouvelles significatives, une réévaluation de l'aléa n'a pas été nécessaire.

8.2. GENERALITES

Avant d'exposer la démarche suivie et les résultats obtenus, il convient de rappeler les objectifs initiaux et de décrire les phénomènes étudiés ainsi que la notion "d'aléa mouvements de terrain".

8.2.1. Typologie des mouvements de terrain

Définition et typologie en général

Les mouvements de terrain sont les manifestations du déplacement gravitaire plus ou moins rapide, de masses de terrain. Sous l'expression générique « mouvements de terrain » sont regroupés plusieurs types de phénomènes d'instabilité, variables en fonction du mécanisme mis en jeu (lié à la nature de la surface de rupture, à la désorganisation des terrains, etc.) et des

vitesse de déplacement. Cette variabilité traduit la complexité des comportements géotechniques des matériaux sollicités et des conditions de gisement (structure géologique, géométrie des réseaux de fractures, caractéristiques des nappes aquifères, etc.).

Les mouvements de terrain résultent d'un ou plusieurs facteurs déclenchant, tels que :

- Le « vieillissement » naturel des terrains (érosion, altération...);
- L'action de l'eau (modification des caractéristiques mécaniques des terrains après saturation en eau lors de fortes pluies, érosion liée aux écoulements, dissolution,...);
- L'action anthropique (terrassement ou déboisement entraînant des modifications des caractéristiques géométriques des terrains, exploitation de matériaux, rejets d'eau non contrôlés, ...),
- Les sollicitations sismiques.

Selon la vitesse de déplacement, deux ensembles peuvent être distingués :

- les **mouvements lents**, pour lesquels la déformation est progressive et peut être accompagnée de rupture mais en principe d'aucune accélération brutale :
 - ◆ les **affaissements** consécutifs à l'évolution de cavités souterraines naturelles ou artificielles (carrières ou mines), évolution amortie par le comportement souple des terrains de couverture ;
 - ◆ les **tassements** par retrait de sols argileux et par consolidation de certains terrains compressibles (vases, tourbes) ;
 - ◆ le **fluage** de matériaux plastiques sur faible pente ;
 - ◆ Certains **glissements**, qui correspondent au déplacement en masse, le long d'une surface de rupture plane, courbe ou complexe, de sols cohérents (marnes et argiles) ;
 - ◆ le **retrait** ou le **gonflement** de certains matériaux argileux en fonction de leur teneur en eau.
- les **mouvements rapides** qui peuvent être scindés en deux groupes, selon le mode de propagation des matériaux, **en masse**, ou à **l'état remanié**.
 - Le premier groupe comprend :
 - ◆ les **effondrements**, qui résultent de la rupture brutale de voûtes de cavités souterraines naturelles ou artificielles, sans atténuation par les terrains de surface ;
 - ◆ les **chutes de pierres** ou de blocs provenant de l'évolution mécanique de falaises ou d'escarpements rocheux très fracturés ;
 - ◆ les **éboulements** ou écroulements de pans de falaises ou d'escarpements rocheux selon les plans de discontinuité préexistants ;
 - ◆ certains **glissements**, notamment rocheux.
 - Le second groupe comprend :
 - ◆ Les **laves torrentielles**, qui résultent du transport de matériaux en coulées visqueuses ou fluides dans le lit de torrents de montagne ;
 - ◆ les **coulées boueuses**, qui proviennent généralement de l'évolution du front des glissements. Leur mode de propagation est intermédiaire entre le déplacement en masse et le transport fluide ou visqueux.

Description des phénomènes fréquents en Guadeloupe

Concernant la Guadeloupe, les principaux types de phénomènes observés et dont l'apparition peut entraîner des effets dommageables graves, sont :

- les chutes de pierre, chute de blocs, éboulement en masse ou en grande masse ;

- les glissements, glissements-coulées, coulées de boue associées, fluage ;
- les laves torrentielles.

Chutes de pierres, chutes de blocs, éboulements en masse ou en grande masse (Figure 39)

Il s'agit de phénomènes soudains, rapides et discontinus, mobilisant des blocs et/ou masses rocheuses plus ou moins homogènes depuis un sommet, une falaise ou une pente, jusqu'à une aire de réception en pied de pente (ou zone d'épandage). Il peut s'agir aussi d'une remobilisation de blocs isolés, provisoirement immobilisés sur une pente.

Du point de vue mécanique, ces phénomènes consistent en la chute libre ou au roulement au départ, après rupture, de blocs formés par fragmentation, le mouvement pouvant ensuite se poursuivre par une série de rebonds de hauteur décroissante (cas d'une pente irrégulière). Les blocs peuvent rouler et rebondir suivant une trajectoire plus ou moins autonome, le long de la ligne de plus grande pente le plus souvent. Les distances parcourues sont fonction de la taille, de la forme et du volume des blocs éboulés, de la pente du versant, de la nature du sol, de la densité et de la nature de la végétation.

En ce qui concerne les éléments éboulés, on distingue :

- les **pierres**, d'un volume inférieur à 1 dm^3 ;
- les **blocs**, d'un volume compris entre 1 dm^3 et 1 m^3 ;
- les **gros blocs**, d'un volume supérieur à 1 m^3 ;

Suivant le volume total éboulé, on distingue :

- les **chutes de pierres ou de blocs**, d'un volume total inférieur à la centaine de m^3 ;
- les **éboulements en masse**, d'un volume allant de quelques centaines de m^3 à quelques centaines de milliers de m^3 ;

On parle d'**éboulements** (ou écroulements) **en grande masse**, pour les volumes supérieurs au million de m^3 . Mais ce cas de figure ne concerne a priori pas les 10 communes étudiées. Les éboulements qui peuvent survenir sont d'ampleur modérée.

Ces phénomènes constituent des dangers importants et peuvent causer des dommages non négligeables aux structures, pouvant aller jusqu'à leur ruine complète.

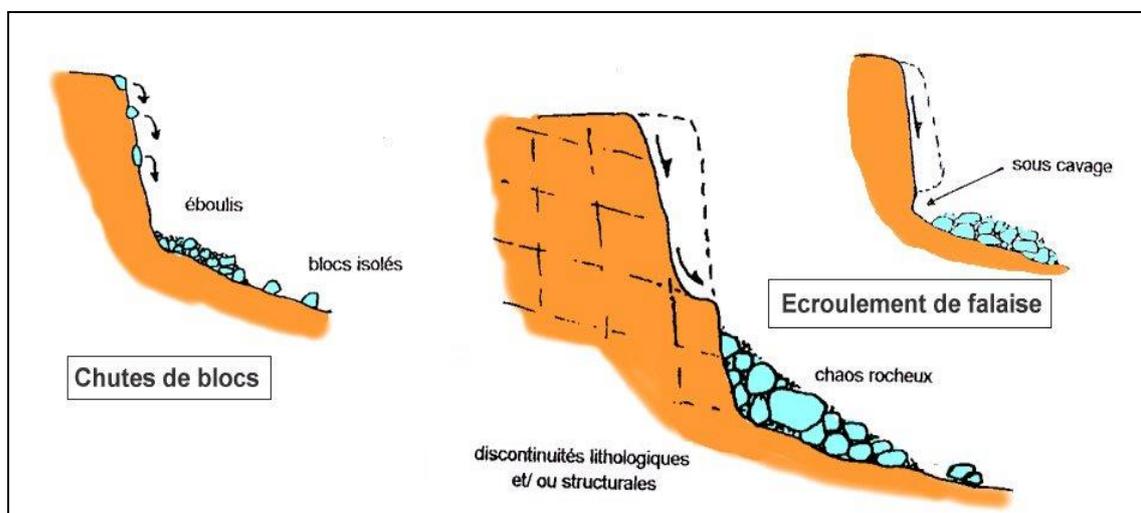


Figure 39 : Représentation schématique des chutes de blocs et écoulement de falaises.

Glissements, glissements-coulées, coulées de boue associées, fluages (Figure 40)

Le **glissement** est un déplacement généralement lent (quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) sur une pente dans tous types de matériaux, le long d'une surface de rupture (surface de cisaillement) identifiable, d'une masse de terrain cohérente (meuble ou rocheux), de volume et d'épaisseur variables. Cette surface est généralement courbe (glissement circulaire ou rotationnels), mais elle peut aussi se développer à la faveur d'une discontinuité préexistante telle qu'un joint de stratification (glissement plan : fréquent en milieu rocheux). Les profondeurs des surfaces de glissement sont très variables : de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres, voire la centaine de mètres pour certains glissements de versant.

Lors d'un phénomène de glissement de terrain, les volumes de matériaux mis en jeu sont extrêmement variables et peuvent parfois être considérables (cas des glissements de versant). La vitesse de déplacement est généralement lente (quelques centimètres à quelques décimètres par an), mais des accélérations (de quelques dizaines à quelques centaines de mètres par jour) peuvent se produire localement sous l'action de conditions météorologiques défavorables. Des indices caractéristiques peuvent être relevés dans les glissements de terrains dit « actifs » : niche d'arrachement, fissure, bourrelet, arbres penchés, zone de rétention d'eau.

La **coulée de boue** est un mouvement rapide d'une masse de matériaux remaniés, à forte teneur en eau et de consistance plus ou moins visqueuse. Les coulées de boue apparaissent dans des matériaux meubles lorsque leur teneur en eau augmente sensiblement. La mise en mouvement de ces matériaux a pour origine une perte de cohésion brutale dans le milieu. Ces coulées peuvent se produire suite à un glissement de terrain, elles prennent fréquemment naissance dans la partie aval d'un glissement de terrain. Elles consistent en la propagation de matériaux sans cohésion ou ayant perdu leur cohésion dès la mise en mouvement, matériaux intimement mélangés à une quantité d'eau telle que la masse en mouvement a franchi sa limite de liquidité. Les matériaux susceptibles de perdre ainsi leur cohésion sont des argiles, des limons, des sols, des roches décomposées ou éboulis fins. L'eau peut pénétrer au sein des matériaux par infiltration avant le déclenchement de la coulée ou au moment de la rupture par concentration des eaux de ruissellement. Lors de ce type de phénomène, le degré de remaniement de la masse en mouvement est total. La vitesse et la distance parcourue par une coulée boueuse sont très variables et dépendantes de nombreux facteurs tels que la nature des matériaux, la quantité d'eau, la viscosité du mélange eau/matériel, la topographie, la saturation en eau des sols sur lesquels se déplace la coulée. Du point de vue morphologique, une coulée boueuse montre presque toujours :

- une zone supérieure élargie (rassemblement de matériaux situé par exemple au pied d'un glissement, zone de départ de la coulée) ;
- un chenal d'écoulement beaucoup plus étroit et de longueur extrêmement variable (zone de transfert) ;
- un lobe terminal (zone d'accumulation) élargi en une sorte de cône de déjection mais de profil convexe.

Le **fluage** est un cas particulier impliquant un mouvement lent de matériaux plastiques sur des versants à faible pente et résultant d'une déformation gravitaire continue d'une masse de terrain non limitée par une surface de rupture clairement identifiée.

Les glissements de terrain peuvent avoir des effets plus ou moins destructeurs sur les constructions. Ils peuvent provoquer des désordres partiels (murs cassés, poteaux cassés, etc.), voire la ruine totale du bâti (maison ensevelie ou emportée). Les conséquences

engendrées par ce type de phénomène différent selon que le glissement se situe au droit ou en amont des constructions. Dans le premier cas, ce sont directement les terrains d'assise, qui sont affectés. Dans le cas du glissement situé en amont, la masse glissée éventuellement mobilisée sous forme de coulée, en fonction de son volume et de l'importance des éléments rocheux transportés, provoque des dégâts significatifs aux maisons situées sur sa trajectoire.

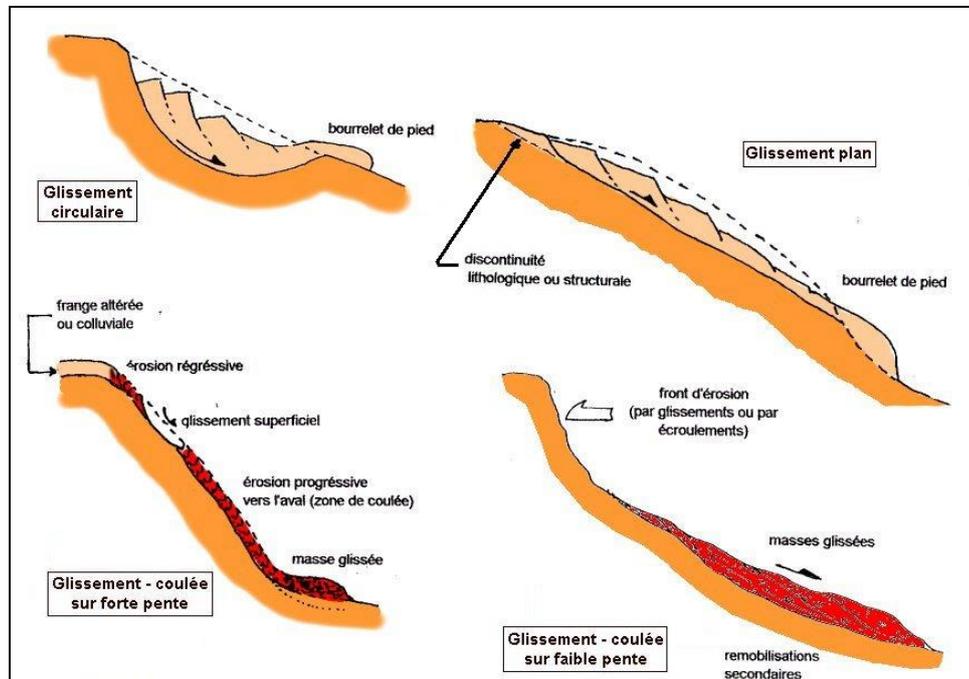


Figure 40 : Représentation schématique des principaux types de glissements de terrain (BRGM).

Laves torrentielles

Les laves torrentielles (ou lahars quand elles sont d'origine volcaniques) correspondent à la propagation rapide d'un matériau, de comportement fluide ou visqueux, le long d'un axe d'écoulement. La distance de propagation est supérieure à celle d'une coulée et peut être kilométrique. Contrairement à une coulée, il ne s'agit pas forcément de la désorganisation d'un matériau initialement cohérent, ce peut être aussi un transport solide tel une onde de crue se chargeant de matière solide au fur et à mesure de sa propagation et de l'accroissement de sa capacité érosive.

Autres phénomènes rares mais potentiels en Guadeloupe

Avec une occurrence moins importante que les mouvements de terrain relatés ci-dessus, il existe d'autres types d'événements pouvant concerner le département de la Guadeloupe.

Il convient de citer d'abord les effondrements de cavités souterraines ; d'origines naturelles ou anthropiques, ces cavités connaissent une évolution au cours du temps qui peut conduire à un effondrement et à la formation d'une dépression circulaire en surface. En Grande-Terre et à Marie Galante, ce phénomène est particulièrement représenté dans les calcaires datant du

quaternaires comme en attestent le grand nombre de dolines. Ces dernières sont, à l'heure actuelle, relativement stables étant donné le degré de karstification poussé des terrains.

Ensuite, le **retrait-gonflement des argiles**, qui résulte d'une variation de la teneur en eau dans les formations de nature argileuse, est un phénomène relaté dans le département, notamment du fait de l'existence de deux saisons distinctes. Durant la période humide (ou hivernage), les terrains ont plutôt une tendance au gonflement alors qu'en période sèche (carême) la tendance est au tassement. La lenteur et la faible amplitude des déformations n'entraînent pas de conséquences dangereuses pour l'homme mais peuvent engendrer des dégâts aux constructions fondées superficiellement.

Les **tassements et affaissement de sols** compressibles peuvent aussi se produire localement sous l'effet de surcharge (constructions, remblais) ou en cas d'assèchement (drainage, pompage), mais restent peu représentés.

Enfin, les **embâcles et crues torrentielles**, qui se produisent dans les cours d'eau pérennes ou non, ne sont pas des mouvements de terrains à proprement parler mais en découlent directement. Il s'agit, dans le cas des embâcles, de la formation d'un barrage dans un cours d'eau suite à un glissement de terrain majeur ou par blocage par des débris végétaux et/ou de blocs au niveau d'une gorge étroite. L'accumulation d'eau et la rupture du barrage provoque une onde de crue extrêmement dévastatrice (Costa et Schuster, 1988). Les crues torrentielles ont lieu quand les cours d'eau déjà encombrés sont alimentés par de nombreux glissements. Il en résulte un écoulement boueux, chargé de blocs et de troncs, dont le pouvoir érosif est très important (Mompelat, 1994).

8.3. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA MOUVEMENT DE TERRAIN

8.3.1. Aléa, zonage et niveau d'aléa - définitions

L'**aléa** mouvements de terrain peut être défini comme la probabilité d'occurrence d'une instabilité pour une durée donnée et dans un lieu donné. La composante temporelle étant difficilement accessible, l'aléa est souvent restreint à sa composante spatiale. En pratique, l'aléa est exprimé pour une période de retour fictive, non quantifiée, mais supposée couvrir "en moyenne", la durée de vie des biens et des infrastructures liés à l'activité humaine.

Dans un lieu et pour une période de retour donné, l'**intensité de l'aléa** traduit l'importance des désordres potentiels. **La nature de l'aléa** est relative au type de mouvement de terrain concerné.

Les termes "**cartographie**", "**zonage**" ou "**microzonage**" d'un aléa désignent la partition d'un territoire étudié en surfaces élémentaires, lesquelles sont classées en **degrés ou niveaux d'aléa**. Ceux-ci peuvent être traduits sous forme quantitative ou qualitative (faible, fort, moyen...) et expriment l'intensité de l'aléa. La détermination de l'aléa et sa cartographie passent idéalement par une bonne connaissance préalable des phénomènes qui se sont déjà produits et qui peuvent survenir. Il convient ensuite d'apprécier sur le territoire étudié un certain nombre de facteurs tels que la nature, l'épaisseur, l'altération des terrains en place, les pentes, les facteurs anthropiques, la pluviosité etc.... La définition même des zones et des niveaux d'aléa peut résulter d'une **approche naturaliste** ou qualitative dans le cadre d'une **démarche dite "d'expert"**. Elle peut au contraire résulter d'une modélisation rendant compte de manière plus ou moins réaliste des conditions réelles (**approche de type déterministe**).

Distinction entre déclencheurs pour la définition de l'aléa

Comme indiqué précédemment, les principaux déclencheurs naturels des mouvements de terrain sont les précipitations (l'eau plus spécifiquement) et les vibrations sismiques. Faut-il en conséquence distinguer un "aléa mouvements de terrain / eau" d'un aléa "mouvements de terrain / séisme" et ne considérer que ce dernier lors qu'il s'agit d'une cartographie établie dans le cadre d'un microzonage sismique ? Il n'y a pas lieu en théorie de faire cette distinction. En effet, l'aléa correspond à la probabilité qu'il survienne un désordre pour une période de retour donnée et intègre donc à la fois dans sa définition la période de retour des déclencheurs «eau » et « séisme ».

En Guadeloupe, où la période de retour du "déclencheur sismique" est a priori élevée (en regard de celle généralement admise pour l'aménagement courant de l'ordre d'une centaine d'année), une carte d'aléa "mouvements de terrain sismiques" pour des phénomènes courants, devrait nécessairement exprimer un aléa globalement de faible intensité. Un tel document n'aurait pas de sens en termes de prise en compte dans l'aménagement du territoire.

8.3.2. Tendances de l'aléa mouvements de terrain pour le territoire étudié

L'ensemble des communes de Guadeloupe est concerné par cet aléa à des degrés divers :

- L'aléa « glissements de terrain » est essentiellement présent en Basse-Terre en raison des reliefs et des cumuls de pluie importants.
- Les aléas « écoulement / chutes de blocs » sont présents sur tout le territoire, même si l'intensité de l'aléa diffère selon les zones.

Les mouvements de terrain lents touchent principalement les biens alors que les mouvements rapides touchent majoritairement les personnes.

Les conséquences découlant d'un glissement de terrain et qui impliquent principalement les ouvrages anthropiques peuvent être plus ou moins destructrices en allant de la fissuration de la construction à des dommages irréversibles. C'est le cas lorsqu'une niche d'arrachement d'ampleur plurimétrique se forme ou lorsque la poussée des terrains est incompatible avec la résistance mécanique de la structure en place. L'expérience montre que les accidents de personnes dus aux glissements et coulées sont peu fréquents en pays développés mais possibles.

Etant donné la rapidité, la soudaineté et le caractère souvent imprévisible des chutes de blocs et éboulements, les instabilités rocheuses constituent un réel danger pour les vies humaines, même lorsque de faibles volumes sont mis en jeu. Elles peuvent aussi causer d'importants dommages aux infrastructures.

Sur tout le département guadeloupéen, c'est le territoire aménagé qui est exposé au risque « mouvement de terrain », plus particulièrement dans les zones escarpées. Les enjeux menacés sont de plusieurs natures : humains, économiques, environnementaux et patrimoniaux.

L'aléa mouvement de terrain est décrit et cartographié par commune dans les rapports spécifiques correspondant. Pour 9 communes sur dix, aucun élément nouveau ne permet de remettre en cause significativement les cartes d'aléa mouvement de terrain contenu dans les PPR. En conséquence, le zonage d'aléa mouvement de terrain des PPR de ces communes (Trois-Rivières, Capesterre Belle-Eau, Goyave, Abymes, Gosier, Sainte-Anne, Saint-François, Moule, Morne à l'eau) est repris en l'état dans le microzonage sismique. Seul l'aléa mouvement

de terrain de la commune de Petit-Bourg a été réévalué. La démarche suivie et les résultats obtenus sont détaillés dans le rapport spécifique de Petit-Bourg.

Au niveau de la Grande-Terre, on remarque que l'aléa Mouvement de terrain se concentre dans la zone des Grands-Fonds (Figure 42).

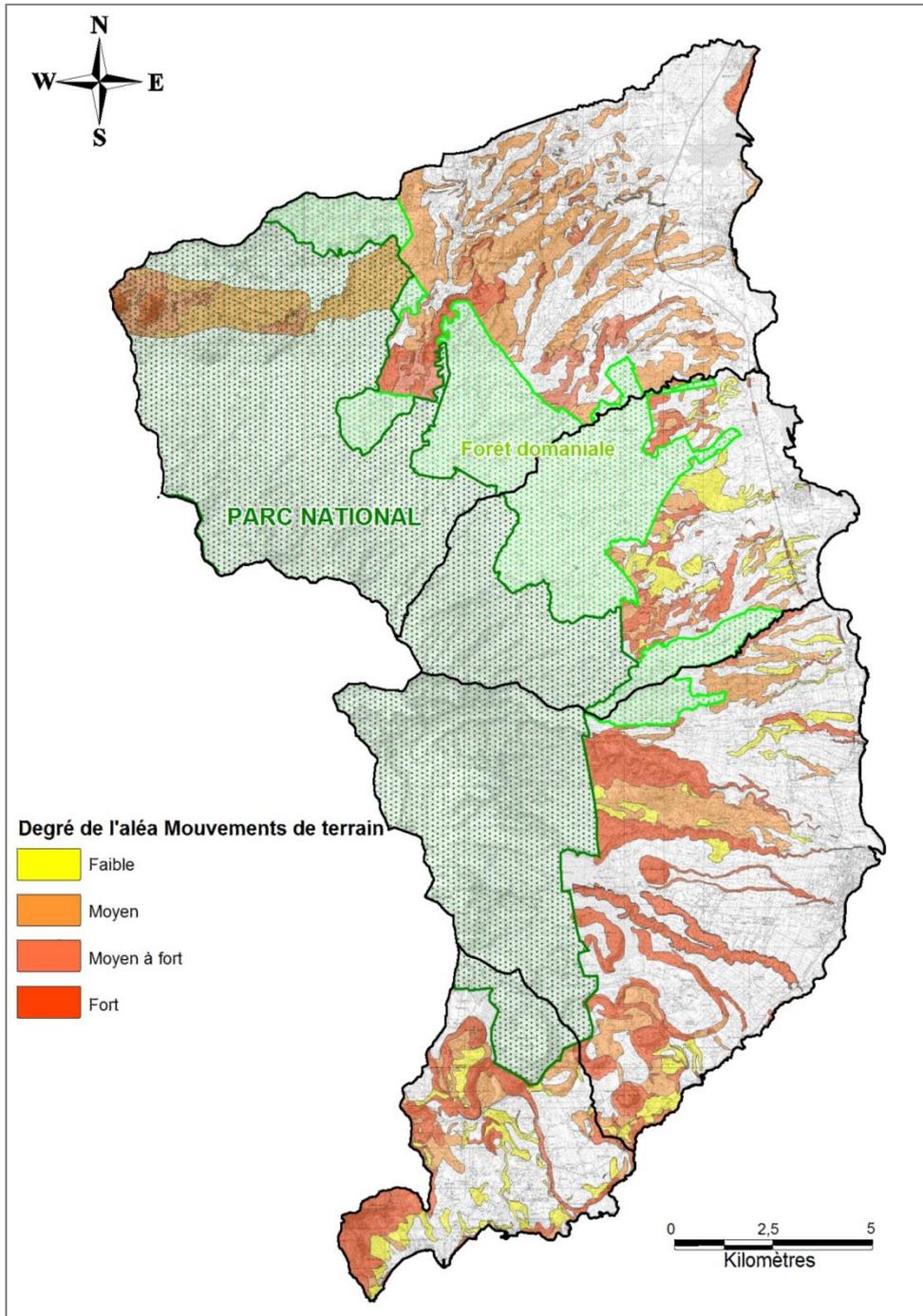


Figure 41 : Cartographie de l'aléa mouvement de terrain sur les 4 communes de la Basse-Terre (reprise intégrale des données PPR sauf sur Petit-Bourg).

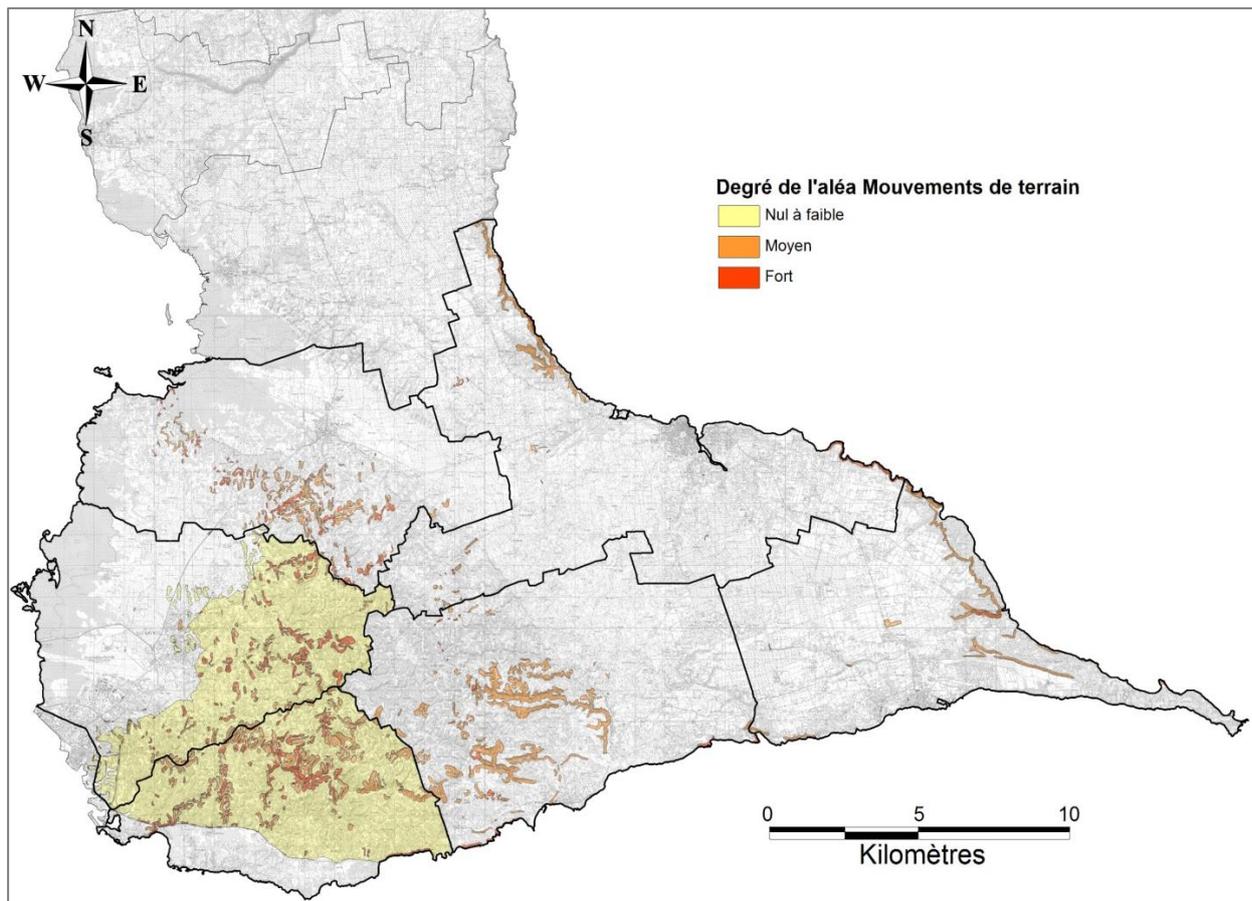


Figure 42 : Cartographie de l'aléa mouvement de terrain sur les 6 communes de la Grande-Terre.

9. Aléa liquéfaction

9.1. DEFINITIONS

9.1.1. Explication du phénomène

La liquéfaction est une perte de résistance au cisaillement du sol créée par une quasi annulation de la contrainte effective par augmentation de la pression interstitielle.

Celle-ci peut être causée par des sollicitations monotones (on parle de liquéfaction statique) ou lors d'un séisme par des sollicitations cycliques.

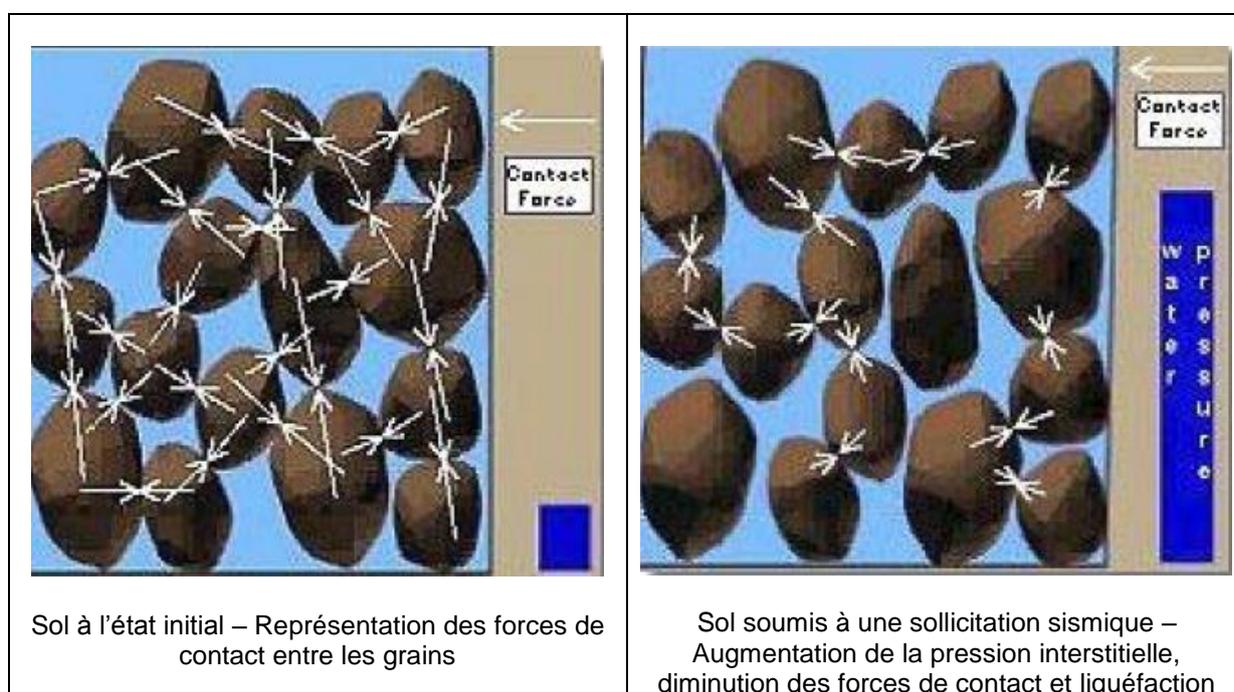


Figure 43 : Schéma d'explication du phénomène de liquéfaction

Les retours d'expériences montrent que la liquéfaction se produit le plus souvent sur des sols granulaires présentant une teneur en eau proche de la saturation et une résistance au cisaillement relativement faible.

Les alluvions récentes, sableuses à silteuses, voire graveleuses, lâches, ainsi que les remblais hydrauliques non compactés présentent typiquement ce comportement.

9.1.2. Effets induits par la liquéfaction

Un sol liquéfié se déforme et peut même rompre. D'après Youd (1992), ces modifications d'état se manifestent sous différentes formes :

Glissement de terrain : coulée et glissement latéral

La liquéfaction de sols perchés sur un terrain en pente (>3°) peut entraîner une coulée de boue. Les déplacements induits sont de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres, voire plus. Les conséquences pour les aménagements situés dans l'axe de la coulée sont catastrophiques.

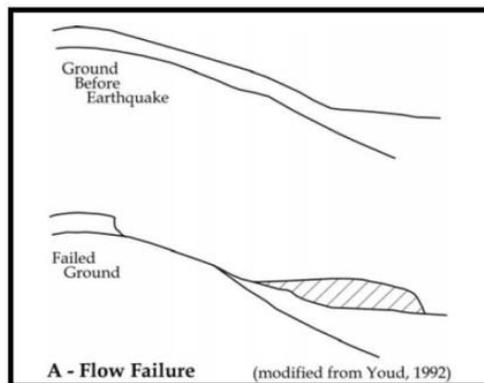


Figure 44 : Effet de la liquéfaction – Coulée de boue

Dans le cas de pente moins forte (< 3°), la liquéfaction d'une couche de sol située à faible profondeur peut entraîner le déplacement et la fissuration de la couche de sol la surplombant. Cette couche de sol se déplace alors naturellement vers le bas de la pente. Les déplacements induits sont de l'ordre de plusieurs mètres. Les conséquences pour les aménagements situés dans la zone déformée sont très importantes : rupture de fondations, déformation et rupture des canalisations enterrées, etc.

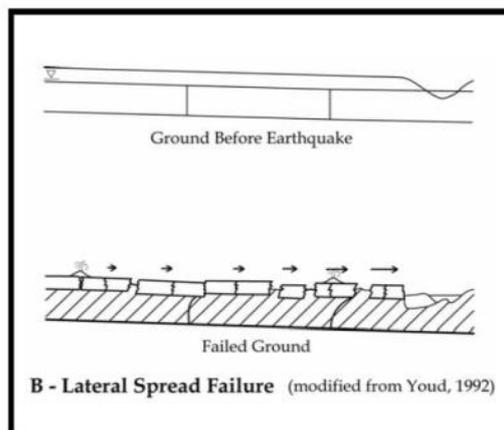


Figure 45 : Effet de la liquéfaction – Glissement latéral



Figure 46 : Effet de la liquéfaction – Glissement latéral : Port-au-Prince (Haïti), séisme du 12/01/2010 (Magnitude 7.0)

Oscillation du sol

Dans le cas d'une surface plate, la liquéfaction d'une couche de sol située en profondeur peut entraîner le déplacement et la fissuration de la couche de sol surplombant. Le déplacement est moins important que dans le cas d'un glissement latéral. Il se manifeste par une oscillation du sol. Les conséquences pour les aménagements situés dans la zone déformée sont importantes : déformation et rupture des revêtements, déformation des canalisations enterrées, etc.

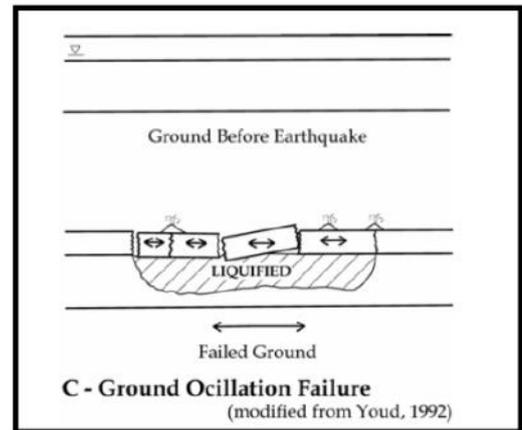


Figure 47 : Effet de la liquéfaction – Oscillation du sol

Perte de résistance au cisaillement

Lorsque le sol liquéfié se situe sous des fondations, la résistance au cisaillement résiduelle peut être plus faible que celle nécessaire à la bonne stabilité de ces aménagements. Le sol support de fondation va alors tasser, voire être poinçonné. Les fondations vont suivre ce mouvement. Les conséquences pour ces aménagements sont plus ou moins importantes : tassement différentiel, basculement, voire ruine à plus ou moins long terme.

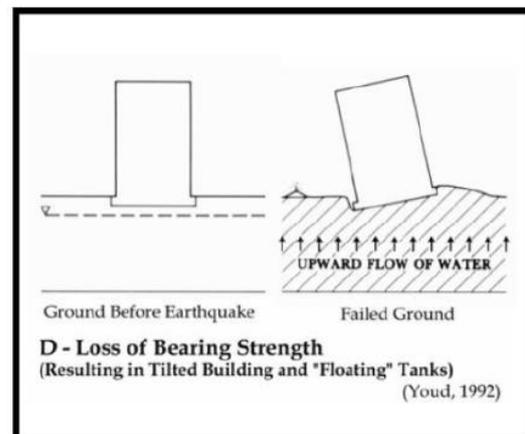


Figure 48 : Effet de la liquéfaction – Poinçonnement du sol de fondation

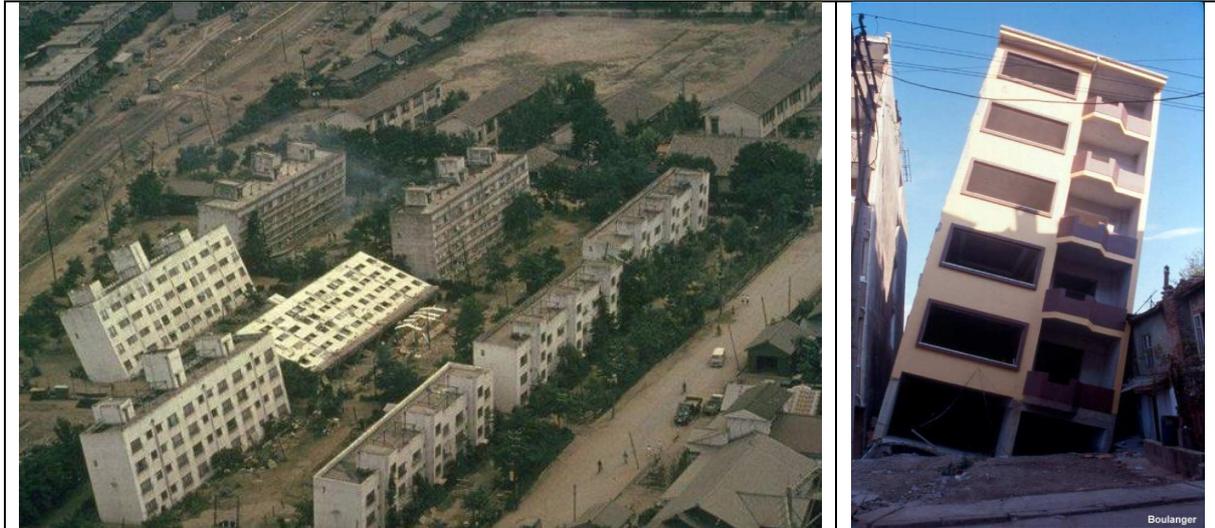


Figure 49 : Effet de la liquéfaction – Poinçonnement du sol de fondation : Niigata (Japon), séisme du 16/06/1964 (Magnitude 7.5) et Kocaeli (Turquie), séisme du 17/08/1999 (M. 7.4)

Tassements

La liquéfaction entraîne un réarrangement des grains du sol. Une fois la surpression interstitielle dissipée, ce réarrangement des grains entraîne un tassement du sol. Les conséquences pour les aménagements situés dans la zone de tassement peuvent être relativement importantes : tassements différentiels, etc.

L'apparition de « volcans de sable » est souvent lié à ce phénomène.

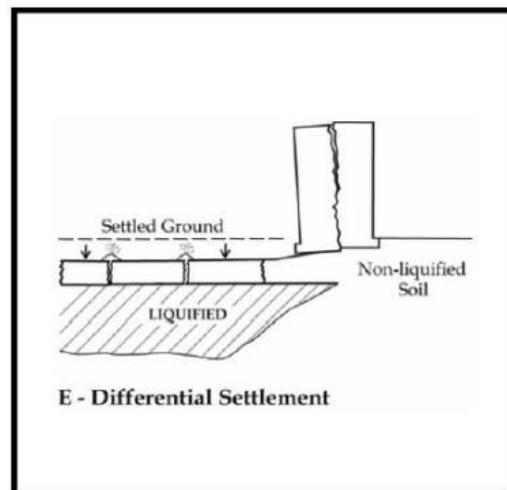


Figure 50 : Effet de la liquéfaction – Tassements



Figure 51 : Effet de la liquéfaction – Tassements : Kobe (Japon), séisme du 17/01/1995 (Magnitude 6.8)

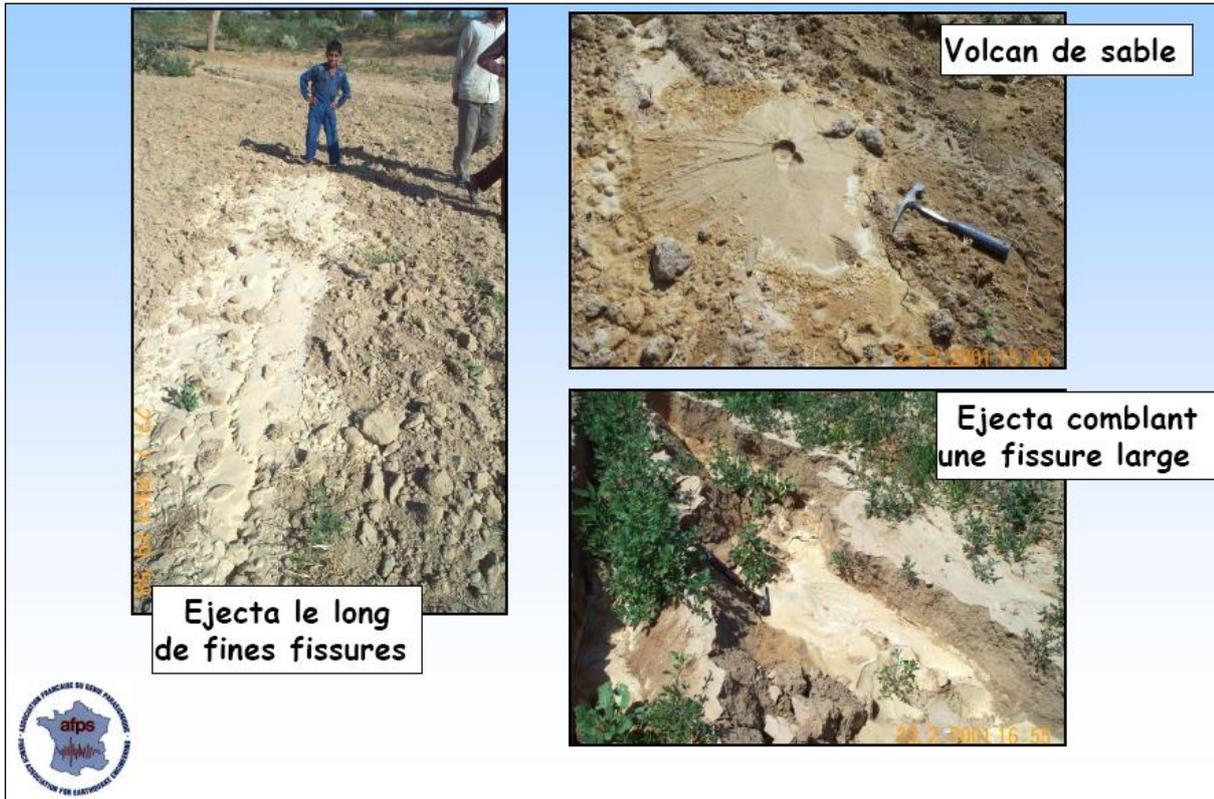


Figure 52 : Effet de la liquéfaction – Ejection de sables, séisme de Bhuj (Inde) du 26/01/2001 (Magnitude 7.7)

Augmentation de la pression interstitielle à l'arrière d'un ouvrage de soutènement

La liquéfaction d'un sol situé à l'arrière d'un ouvrage de soutènement peut entraîner une augmentation de la pression interstitielle à l'arrière de celui-ci. Une telle augmentation peut être dommageable pour l'ouvrage et éventuellement conduire à sa ruine.

9.2. REGLEMENTATION ET DOCUMENTS DE REFERENCE

9.2.1. Etat de l'art réglementaire

En France, le document de référence et les normes en vigueur pour l'évaluation du risque de liquéfaction, et plus particulièrement pour la réalisation de microzonages, sont les suivants :

- AFPS, 1993 – Guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique ;
- Norme NF EN 1998-5 : Eurocode 8, partie 5. Valable depuis mars 2010 ;
- Norme NF P06-013 (DTU) : règles PS 92. Attention : valable jusqu'au 31/10/2012 !

Par ailleurs, pour les Antilles, l'AFPS a édité un guide pour les maisons individuelles : « *Construction parasismique des maisons individuelles aux Antilles - Guide CPMI Antilles* » - Recommandations AFPS - tome IV – nouvelle édition 2004. Ce guide reprend en partie et simplifie les règles PS92 pour les projets de « petite » taille tels que les maisons individuelles.

L'ensemble du cadre réglementaire est résumé sur une plaquette éditée par le ministère : « *La nouvelle réglementation parasismique applicable aux bâtiments dont le permis de construire est déposé à partir du 1er mai 2011* », (MEDDTL – DGA, édition janvier 2011).

Notons également la parution prochaine du guide technique de l'AFPS présentant les « *procédés d'amélioration et de renforcement de sol sous actions sismiques* ». Ce guide complète et précise l'Eurocode 8, en particulier pour ce qui concerne l'évaluation de la liquéfaction. Sa parution serait prévue pour fin 2012.

Le document scientifique de référence pour l'évaluation chiffrée du risque de liquéfaction est le suivant : Youd *et al.*, 2001 – "*Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soil*".

Les détails des analyses et calculs à effectuer est présenter dans l'**Annexe technique** du présent rapport.

9.2.2. Principe de la réglementation

Pour les microzonages, le BRGM suit la démarche du guide méthodologique de l'AFPS tout en respectant les règles PS92 et l'Eurocode 8.

Voici, en résumé, les grandes lignes de ces 3 documents :

- **Guide microzonage de l'AFPS de 1993**

Le guide microzonage de l'AFPS de 1993 hiérarchise les études en 1 + 3 niveaux : études des paramètres d'identification des sols (essais en laboratoire) + études de niveaux A, B et C.

- L'étude des paramètres d'identification des sols (essais en laboratoire) donnent des critères précis déterminant les sols « a priori suspects de liquéfaction » et ceux « considérés comme exempts de risque » (il s'agit d'ailleurs des critères des PS 92). Ces termes correspondent bien à une susceptibilité.
- L'étude de niveau A est de type « qualitatif » et évalue la « sensibilité à la liquéfaction » en fonction des données géologiques. Elle se traduit par une « carte de susceptibilité à la liquéfaction ».
- L'étude de niveau B et celle de niveau C utilisent les « caractéristiques mécaniques ». Ce qui correspond à une approche « quantitative ». Elles se traduisent par une « cartographie de l'aléa liquéfaction » qui comportent 4 zones : « pas de liquéfaction », « liquéfaction peu probable », « liquéfaction probable », « liquéfaction quasi-certaine ».
- La différence entre l'étude de niveau B et celle de niveau C se fait entre autre sur le niveau de calcul. L'étude de niveau B calcule un « coefficient de sécurité » (FS) pour une profondeur donnée. L'étude de niveau C va plus loin : elle intègre le coefficient de sécurité FS sur toute la hauteur de la colonne de sol et aboutit à une valeur de « sévérité de liquéfaction » (IL). L'étude de niveau C demande également la réalisation de sondages complémentaires.

- **Règles PS92**

- Les règles PS92, comme précédemment évoquées, définissent tout d'abord des critères de susceptibilité à la liquéfaction.
- Dans le cas d'une « possibilité » de liquéfaction, des études complémentaires sont nécessaires. A la différence du guide microzonage de l'AFPS de 1993, ces études ne sont qualifiées par aucun terme particulier. Enfin, les études à réaliser se limitent à un calcul similaire à celui du coefficient de sécurité FS décrit par le guide de microzonage de l'AFPS de 1993.
- Enfin, le calcul d'une valeur intégrant l'ensemble de la colonne de sol n'est pas ici proposé.

- **Eurocode 8**

La terminologie employée par l'Eurocode 8 est selon nous plus générale que pour les documents précédents.

- Tout d'abord, l'« évaluation de la susceptibilité » se fait après une approche qualitative. Par ailleurs, cette évaluation implique quasi systématiquement la réalisation de sondages avec mesures des caractéristiques mécaniques des sols... ce qui correspond à une approche quantitative !
- De plus, et comme pour les règles PS92, les études à réaliser se limitent à un calcul similaire à celui du coefficient de sécurité FS décrit par le guide de microzonage de l'AFPS de 1993.
- Enfin, le calcul d'une valeur intégrant l'ensemble de la colonne de sol n'est pas ici proposé.

9.2.3. Evaluation complète du risque de liquéfaction

Les présents microzonages évaluent le risque de liquéfaction suivant les principes énoncés ci-dessus. L'évaluation est faite pas-à-pas :

- La susceptibilité à la liquéfaction est tout d'abord appréciée par l'analyse des données géologiques existantes, en particulier grâce au zonage géologique réalisé pour la présente étude.
- Les coupes géologiques issues des sondages et les résultats des essais en laboratoire viennent compléter cette analyse.
- Le calcul de la sévérité à la liquéfaction est ensuite réalisé. La synthèse de l'ensemble de ces analyses fournit enfin une cartographie de l'aléa.

9.3. DONNEES ANALYSEES

Vu la surface étudiée (10 communes représentant environ 740 km², soit le tiers de la Guadeloupe), les hétérogénéités géotechniques sont fortes. Une synthèse globale de l'ensemble des résultats et des analyses n'est pas possible. L'élaboration des présents microzonages est donc faite commune par commune, site par site.

La démarche expérimentale suit globalement les étapes suivantes :

9.3.1. Analyse des documents existants

- **La liquéfaction lors du séisme du 8 février 1843**

Le 8 février 1843 eu lieu en Guadeloupe un séisme de forte puissance. Si l'on en croit le témoignage qui en a été fait par le géologue Charles Sainte-Claire Deville, ce séisme aurait eu pour conséquence la liquéfaction des sols dans de nombreuses zones de l'île. Ce témoignage ainsi que d'autres documents d'archive ont été repris par le BRGM en 1985.

Les extraits ci-dessous concernent les mouvements du sol supposés comme liés à la liquéfaction :

Deville les décrit comme des "fentes dont l'eau qui en avait d'abord rempli le vide, pressée au moment où la fissure se refermait a dû jaillir entraînant avec elle des parties enlevées au terrain qu'elle traversait".

Dans certains cas, ces substances constituées d'une boue argileuse ont été projetées jusqu'à 1,50 m de hauteur ; Leur dépôt a pu atteindre 0,06 m d'épaisseur.

Ces phénomènes ont été observés sans exception dans les lieux bas et presque au niveau de la mer ou d'une rivière.

En effet, dans la Grande Terre, ils affectent l'ensemble du littoral depuis Port-Louis jusqu'à Saint-François, en particulier dans la savane de l'Arboussier, sur les côtes du Morne-à-l'Eau, du Canal et dans Le Bourg, aux environs de la Pointe-à-Pitre, du Moule, de Sainte-Anne.

Au Port-Louis, dans la plaine des Cayes, en limite des collines calcaires, plusieurs excavations circulaires remplies d'eau, dont l'une d'un diamètre de 3 mètres environ et de 3 à 4 mètres de profondeur, a projeté des matériaux jusqu'à 6 mètres de son centre. Dans ce cas précis la combinaison des processus liquéfaction-effondrement n'est pas exclue.

Sur le territoire de la Basse Terre, les mêmes phénomènes sont observés.

Sur les côtes du littoral depuis Sainte-Rose jusqu'à la Capesterre "se sont ouvertes des fentes d'où sont sorties des matières boueuses".

Dans la plaine alluviale de la Lézarde, "des fissures ont rejeté un sable de transport parfaitement semblable à celui qu'elle a laissé dans quelques parties de son lit abandonné".

De même, "des fissures considérables ont lézardé et bouleversé les plages de sable à peine agrégé qui forment l'anse Allègre (Sainte-Rose), l'anse de la Grande-Plaine (Pointe-Noire), les environs de Saint-Louis (Marie-Galante) et le mouillage de Terre-de-Haut (les Saintes)".

Dans la cité de Basse-Terre, les habitants ont vu une flaque d'eau à l'emplacement de deux maisons écroulées se trouvant sur le cours et sur un "terrain de rapport", précise Deville.

Tels qu'ils sont décrits ces mouvements correspondent effectivement aux observations « classiques » des effets induits par la liquéfaction : fissures dans le sol, éjection de matériaux « liquides », etc. Ces mouvements ont par ailleurs tous été décrits « *dans des lieux bas et presque au niveau de la mer ou d'une rivière* ».

Parmi les 10 communes, objets de la présente étude, le témoignage de Deville de 1843 fait explicitement référence aux 6 communes suivantes :

- Capesterre-Belle-Eau : pas de lieu particulier cité,
- Petit-Bourg : la ravine Lézarde et le bourg,
- Sainte-Anne : le bourg,
- Saint-François : pas de lieu particulier cité,
- Le Moule : le bourg,
- Morne-À-L'eau : les côtes.

Les 4 communes suivantes ne sont en revanche pas explicitement citées :

- Trois-Rivières,
- Goyave,
- Le Gosier,

- Les Abymes.

Comme le dit Deville lui-même, son témoignage n'est pas exhaustif. L'absence de citation explicite de ces 4 communes ne signifie donc pas forcément que la liquéfaction ne s'y est pas produite.

- **Atlas communaux**

Les atlas communaux réalisés au début des années 1990 fournissent une première approche du risque de liquéfaction. Ils présentent une cartographie des zones liquéfiables établie sur la base des observations du séisme de 1843 et sur l'analyse des sondages disponibles à l'époque. Selon la hiérarchie établie par le guide de l'AFPS de 1993, il s'agit d'une étude de niveau A.

Ces atlas sont disponibles pour l'ensemble de la Guadeloupe. Ils constituent la première source d'information pour le présent travail.

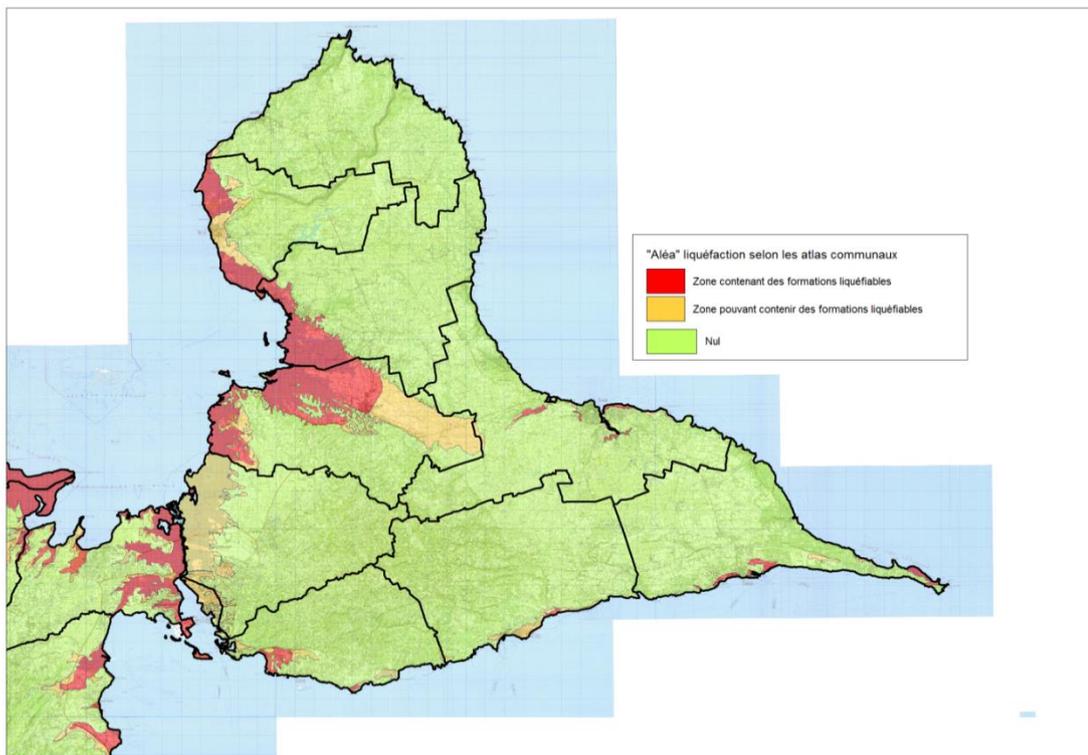


Figure 53 : aléa liquéfaction des atlas communaux en Grande-Terre

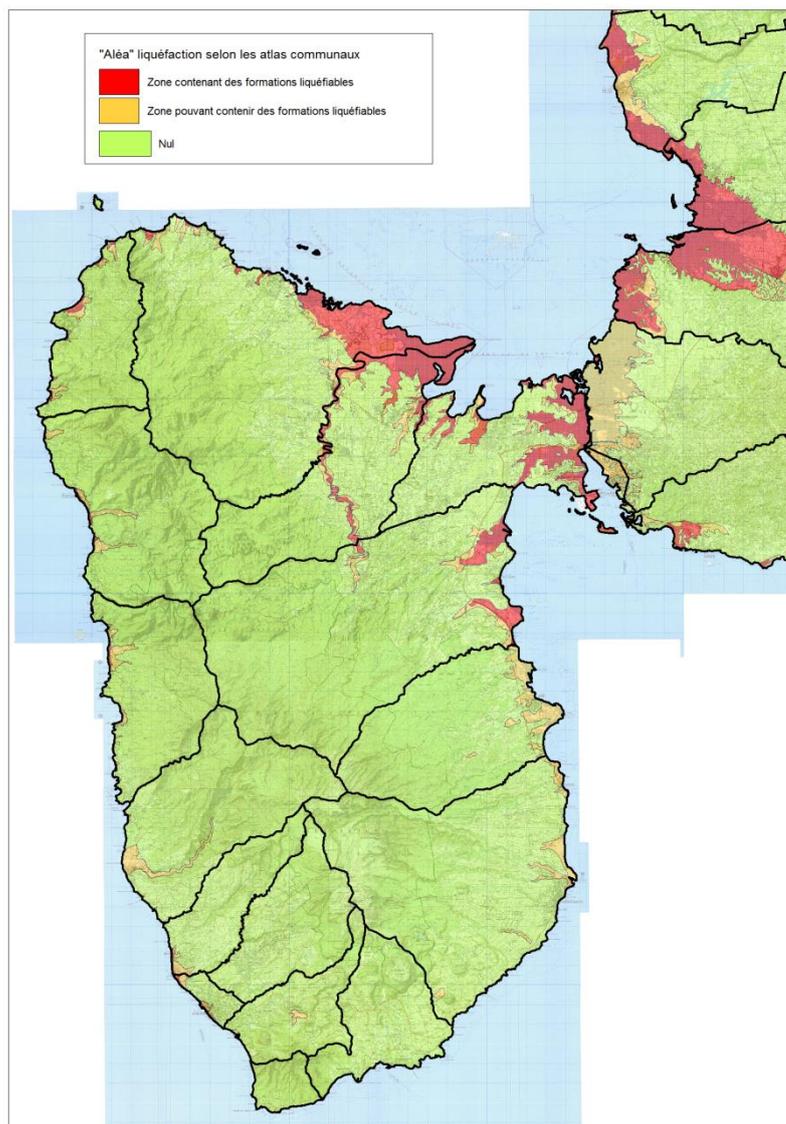


Figure 54 : aléa liquéfaction des atlas communaux en Basse-Terre

- **Microzonages précédents et études spécifiques**

Depuis la réalisation des atlas communaux, neuf communes guadeloupéennes ont fait l'objet de microzonages sismiques, voire d'études spécifiques :

- En 1998, Pointe-à-Pitre, Abymes et Gosier = étude BRGM R 39213 : niveau A+ et niveau C (2 sites).
Les sites de l'aéroport aux Abymes et de Belle-Plaine à Gosier ont fait l'objet d'une étude spécifique du risque de liquéfaction (étude de niveau C) : étude BRGM R 39710.
- En 2003, Basse-Terre, Saint Claude, Gourbeyre et Baillif = étude BRGM RP-52190-FR : niveau C

- En 2009, Lamentin et Baie-Mahault = étude BRGM RP-57487-FR : niveau C

Ces microzonages complètent les atlas communaux du début des années 1990 : ils précisent le risque de liquéfaction avec la réalisation et l'analyse d'investigations complémentaires.

Pour les communes des Abymes et Gosier, le présent travail va encore plus loin : il complète et précise les microzonages réalisés en 1998. L'étude est en effet de niveau C sur toute la commune. Elle est par ailleurs complétée au niveau des sites de l'aéroport des Abymes et de Belle-Plaine à Gosier par les derniers sondages en date.

- **Données géotechniques existantes**

Depuis la réalisation des atlas communaux, de nombreux sondages et études géotechniques ont été réalisés sur l'ensemble du territoire guadeloupéen :

- Une partie de ces sondages est disponible dans la base de données du sous-sol (BSS) établie par le BRGM et mis à disposition sur le site www.infoterre.brgm.fr.

Certaines communes comprennent de nombreux dossiers BSS : Les Abymes = plus de 300 dossiers, Le Gosier # 150 dossiers, etc. D'autres communes sont plus pauvres : Capesterre-Belle-Eau = 66 dossiers, Trois-Rivières = 35 dossiers mais seulement 3 sondages suffisamment profonds pour l'étude, etc.

- D'autres études ont été spécialement fournies par les institutions publiques pour la réalisation des présents microzonages.

De la même manière, la répartition de ces données est hétérogène : Morne à l'Eau # 140 sondages / Petit-Bourg = 28 sondages, etc.

Le présent travail intègre et analyse l'ensemble de ces études. Les données suivantes sont plus particulièrement étudiées :

- Coupe géologique.
- Niveau d'eau.
- Si disponibles : paramètres d'identification des matériaux / caractéristiques mécaniques mesurées in-situ.

L'ensemble de ces données est analysé à la lumière des critères d'études du risque de liquéfaction : critères des règles PS92, compacité / densité des matériaux traversés, etc.

9.3.2. Localisation des zones présentant des lacunes d'information, programmation et réalisation d'investigations complémentaires

Au début de la présente étude, l'ensemble des données géologiques et géotechniques disponibles a été géoréférencé. Ces données ont été intégrées à un Système d'Information Géographique, ce qui a permis de localiser les zones qui pourraient présenter un risque de liquéfaction non négligeable mais où peu de données sont disponibles.

Certaines de ces zones ont fait l'objet d'investigations géotechniques complémentaires. Le choix s'est fait en fonction de l'importance des enjeux mais aussi en fonction du budget disponible.

Ainsi :

- Les communes des Abymes et du Gosier comprennent de nombreuses données d'archives. Elles n'ont pas fait l'objet d'investigations complémentaires.
- Les 8 autres communes (Trois-Rivières, Capesterre-Belle-Eau, Goyave, Petit Bourg, Sainte-Anne, Saint-François, Le Moule, Morne-À-L'eau) comprennent moins de données d'archives. Elles ont donc fait l'objet d'investigations complémentaires.

Dans le détail :

- La commune de Trois-Rivières, présentant a priori peu de risque de liquéfaction, a fait l'objet de 2 sondages.
- La commune de Capesterre-Belle-Eau, présentant de nombreuses zones peu connues, a fait l'objet de 13 sondages
- Les communes de Goyave et Petit-Bourg, présentant plusieurs zones de risques plus ou moins connues, ont également fait l'objet de plusieurs sondages, respectivement 6 et 12 sondages.
- Les communes de Sainte-Anne, Saint-François, Le Moule et Morne-à-l'Eau, disposant de données d'archives relativement nombreuses, ont fait l'objet de quelques sondages.

Le tableau suivant synthétise l'ensemble des investigations complémentaires réalisées :

		Trois-Rivières	Capestere-Belle-Eau	Goyave	Petit-Bourg	Gosier	Sainte-Anne	Saint-François	Le Moule	Morne-à-l'Eau	Abymes	TOTAL
Sondages	Sondages destructifs	1	6	3	5	0	0	2	2	1	0	20
	Essai pénétration dynamique	1	2	0	0	0	1	1	1	0	0	6
	Essai pénétration statique	0	6	4	7	0	0	1	1	1	0	20
Essais laboratoire	Granulométrie	3	28	4	13	0	0	6	4	1	0	59
	Teneur en eau	3	28	4	13	0	0	6	4	1	0	59
	Masse volumique humide et sèche	3	28	4	12	0	0	6	4	1	0	58
	Limites d'Atterberg	0	16	2	7	0	0	3	2	1	0	31

Tableau 17 : Répartition par commune des investigations géotechniques complémentaires réalisées en 2011

Ces investigations complémentaires comprennent :

- Des sondages :
 - Sondages destructifs avec description des matériaux rencontrés et prélèvement d'échantillons remaniés en vue d'essais en laboratoire. Ces sondages ont été descendus à 10 ou 20 m de profondeur.
 - Essais de pénétration statique avec mesure de la pression interstitielle. Ces essais ont été descendus au refus, atteint à des profondeurs variables.
 - Essais de pénétration dynamique. Il s'agit d'essais supplémentaires réalisés en vue de compléter les renseignements collectés par les autres sondages.
- Des essais en laboratoire :

Ils ont été réalisés sur certains des échantillons remaniés prélevés lors des sondages destructifs. Le programme d'essai s'est fait de manière à obtenir des résultats représentatifs de chaque sondage.

Chaque échantillon a fait l'objet d'une série d'essais d'identification :

- analyse granulométrique,
- mesure de la teneur en eau,
- mesure de la masse volumique humide et de la masse volumique sèche,
- mesure des limites d'Atterberg pour les échantillons fins.

Les investigations complémentaires ont été réalisées par le bureau d'étude Geode en juin 2011. Elles ont donné lieu à un rapport factuel d'investigations géotechniques. Ce rapport est disponible dans l'**Annexe technique** du présent rapport.

Ci-dessous l'exemple de deux sondages de type différent réalisés à proximité l'un de l'autre. A noter la différence entre les résultats : la coupe originelle du sondage destructif annonce une « argile sableuse » en tête alors que les caractéristiques enregistrées au CPT correspondent à un sable ou un silt. L'analyse des résultats des essais en laboratoire a validé l'interprétation du signal du CPT.

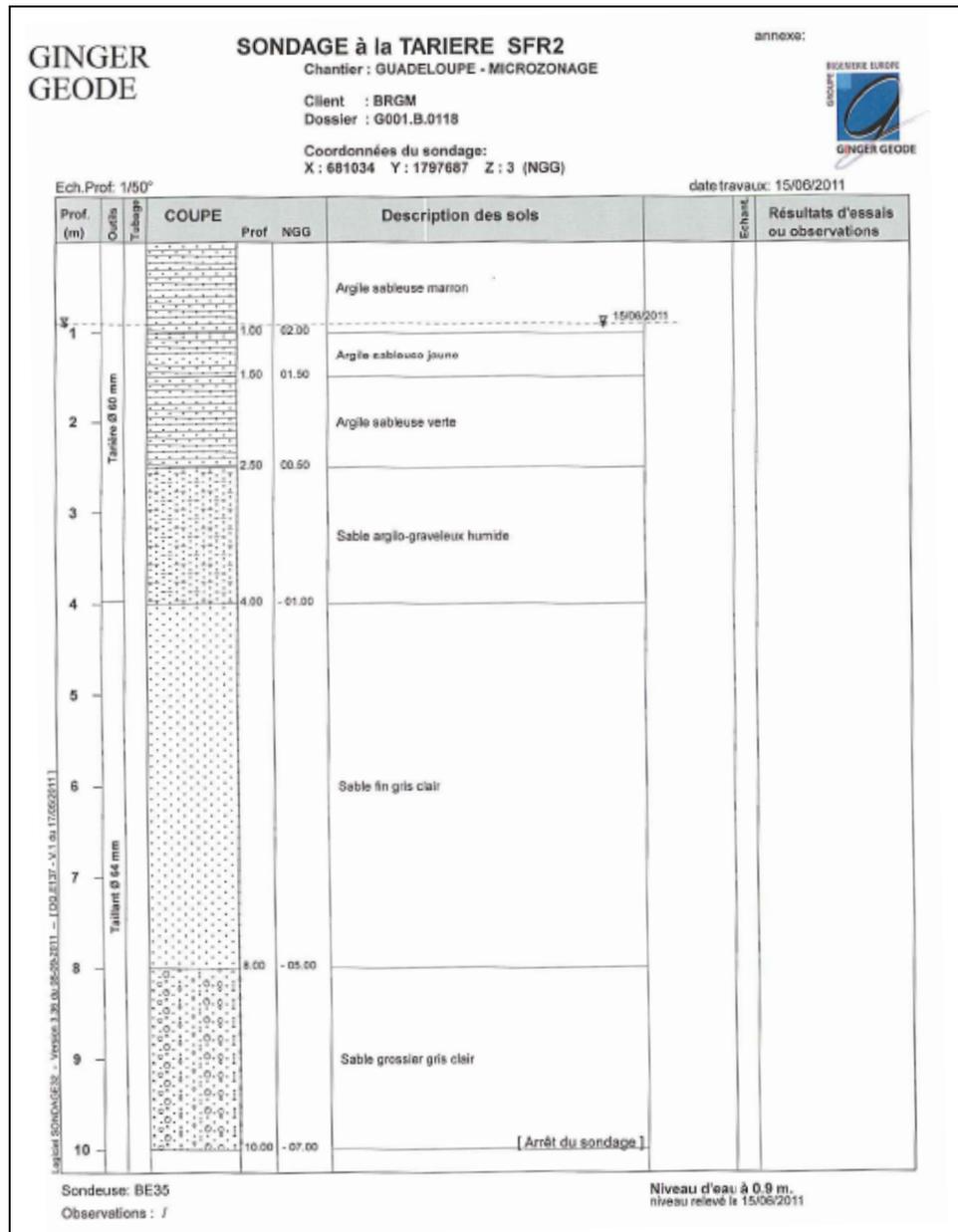


Figure 55 : Exemple d'un sondage complémentaire : Saint-François, sondage destructif SFR2

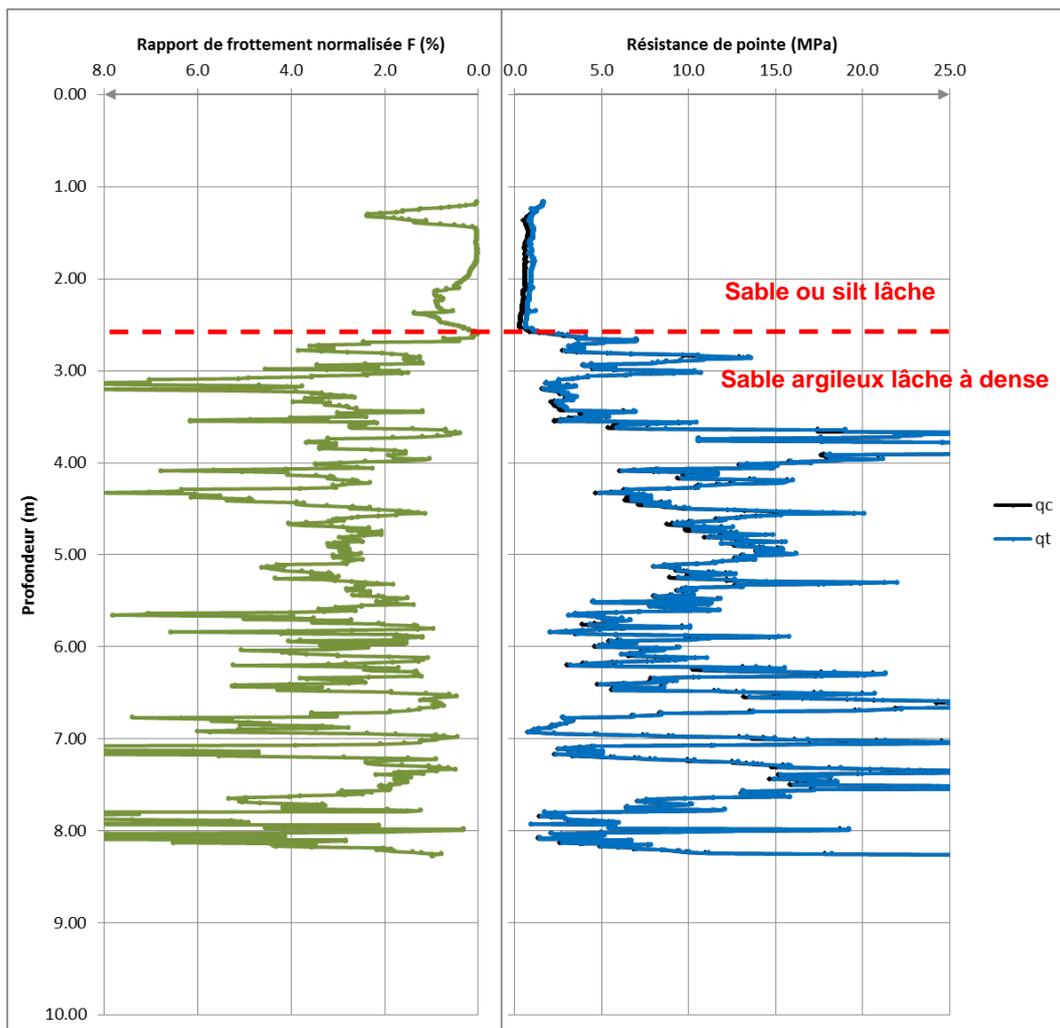


Figure 56 : Exemple d'un sondage complémentaire : Saint-François, essai de pénétration statique SFR2

9.3.3. Analyse des investigations complémentaires

Les résultats des investigations complémentaires ont été traités par le BRGM :

- Les descriptions des sondages destructifs sont complétées par les résultats des essais en laboratoire.
- Ces essais en laboratoire sont analysés à la lumière des critères des règles PS92 vis-à-vis de la susceptibilité à la liquéfaction.
- Enfin, les sondages CPT font l'objet des calculs de la sévérité à la liquéfaction (I_L).

Etant donné le choix d'étude de deux scénarii de séismes, deux calculs de I_L ont été réalisés pour chaque sondage. Le premier calcul correspond à la magnitude 6.3, le second à la magnitude 8.0. Pour ces deux calculs, les accélérations maximales à la surface du sol (PGA) sont inchangées.

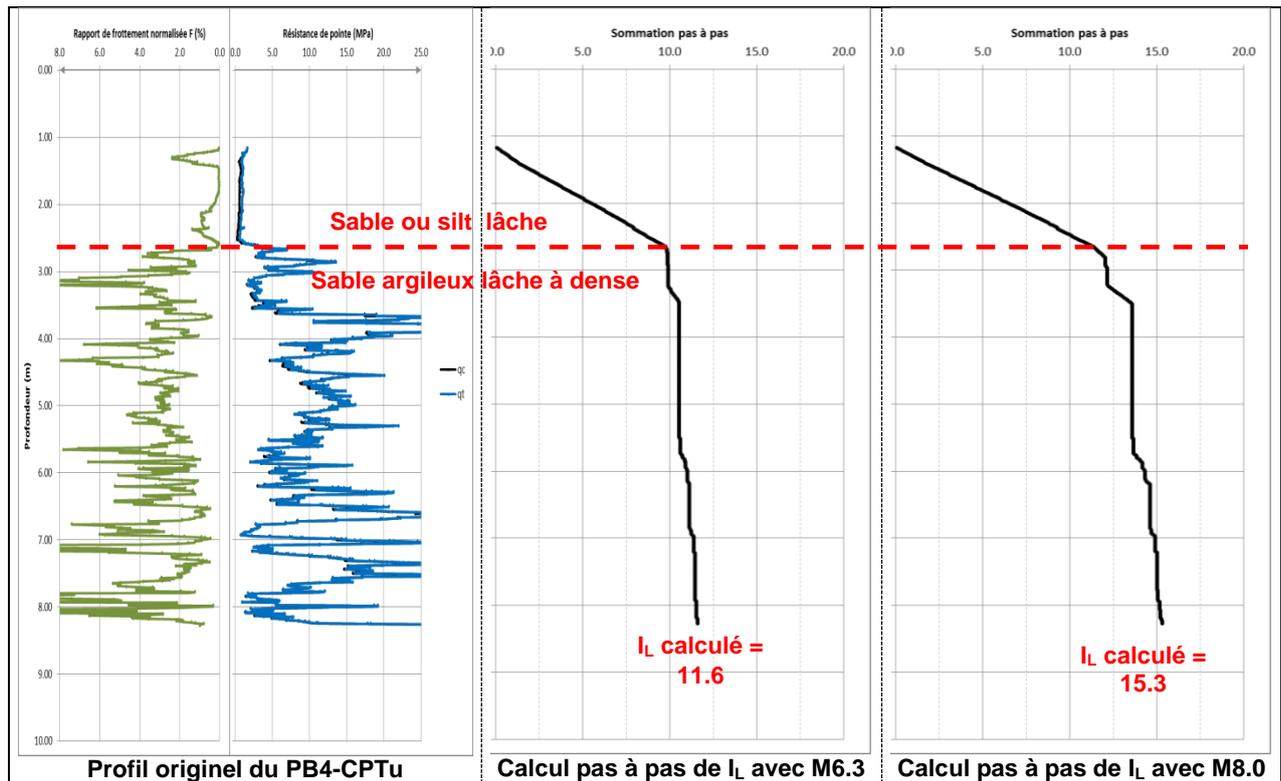


Figure 57 : Exemple du traitement d'un essai de pénétration statique : Saint-François, essai de pénétration statique SFR2, calculs de I_L avec M6.3 et M8.0

L'ensemble des analyses est présentée dans le corps de texte des rapports des communes. Vu la place prise par le détail des analyses, les calculs sont en revanche reportés en **Annexe**.

9.3.4. Synthèse de l'ensemble des analyses et cartographie de l'aléa liquéfaction

L'ensemble des résultats collectés et acquis est synthétisé pour chaque commune. Des zones a priori homogènes sont délimitées. En fonction des résultats des analyses, chacune de ces zones est affectée d'un ou de plusieurs niveau(x) d'aléa liquéfaction : nul / faible / moyen / fort.

Lorsqu'une zone comprend peu ou pas de données, un niveau d'aléa extrapolé est proposé. Cette extrapolation se base sur les résultats d'analyses effectuées pour des contextes géomorphologiques / géologiques similaires les plus proches possibles.

Ce résultat final est présenté sous forme d'une table MapInfo.

9.4. CARTOGRAPHIE

Le détail des cartes obtenues à l'issue de l'ensemble des analyses est explicité commune par commune dans les rapports correspondants.

De manière plus générale, les cartes d'aléa liquéfaction pour les 4 communes étudiées sur Basse-Terre et les 6 communes étudiées sur Grande-Terre sont les suivantes :

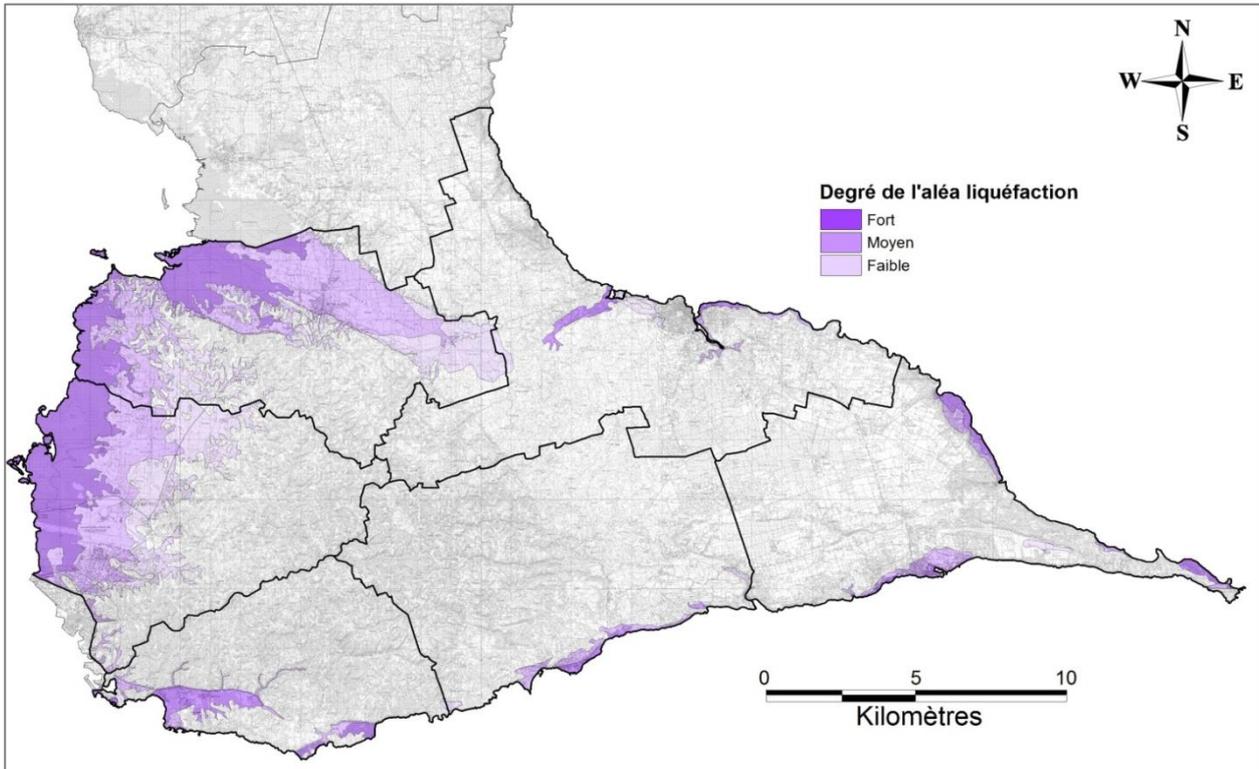


Figure 58 : Carte de l'aléa liquéfaction pour les 6 communes étudiées de Grande-Terre

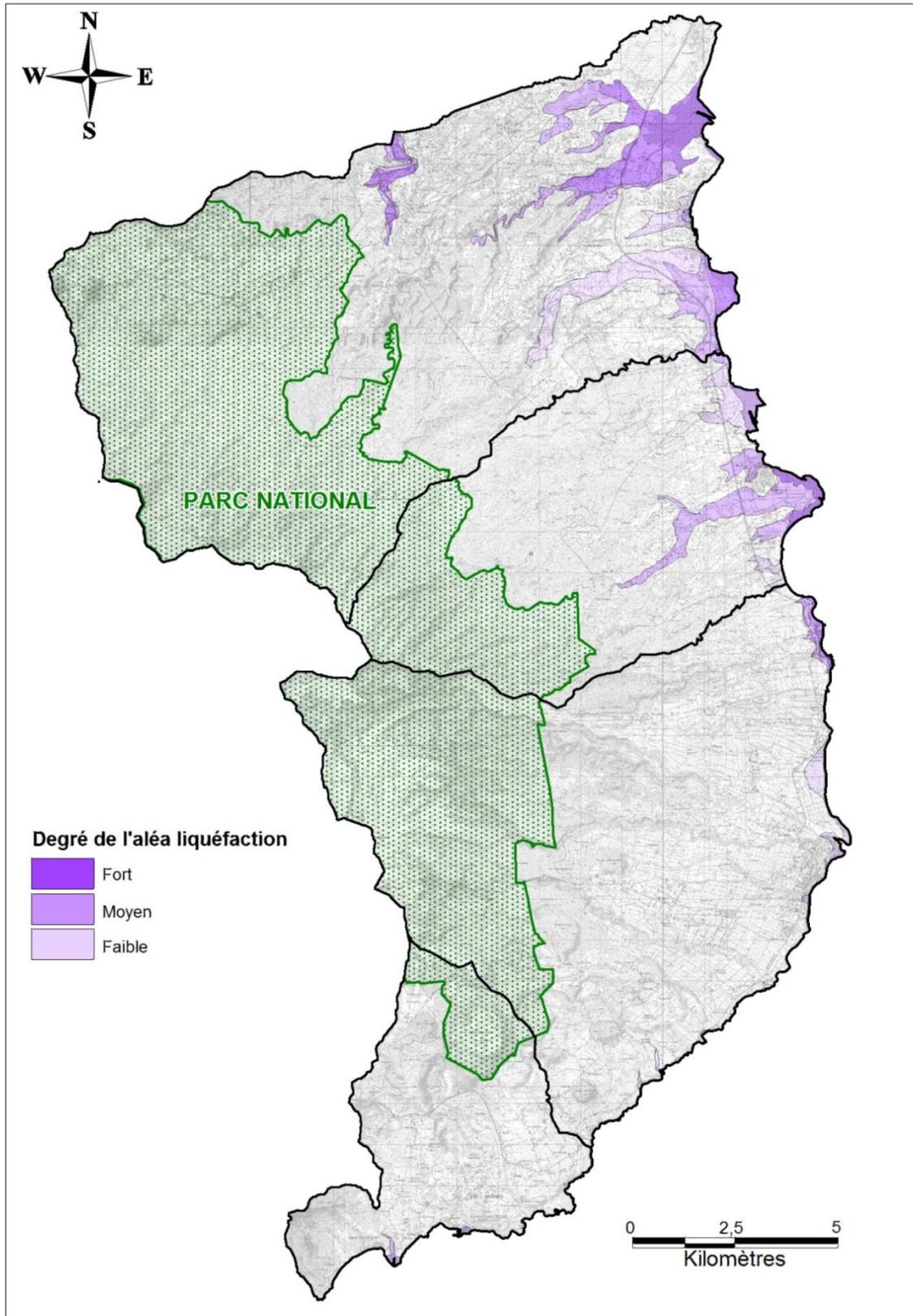


Figure 59 : Carte de l'aléa liquéfaction pour les 4 communes étudiées de Basse-Terre

10. Vulnérabilité sismique du bâti et simulation de dommages

10.1. INTRODUCTION

La méthode comporte 3 étapes principales :

- définir « **l'agression sismique** », c'est-à-dire l'accélération du sol en tout point, tenant compte de la position du séisme, de sa magnitude et du comportement du sol en fonction de sa composition géologique ou de la topographie.
- inventorier les **enjeux exposés** et évaluer leur **vulnérabilité sismique**
- estimer les **dommages attendus** aux bâtiments (léger, modéré, grave, effondrement...) en confrontant enjeux et agression.

L'agression sismique sera définie à partir d'un scénario, dit **d'aléa régional**. Il consiste à appliquer en tout point une accélération du sol fixée arbitrairement à laquelle on rajoute les amplifications liées aux conditions locales de sol. Ce type de scénario ne simule pas un séisme réel mais cherche à comparer les effets possibles sur les différents secteurs des communes ciblées, soumis à une même agression sismique. Il permet d'identifier les communes les plus vulnérables et les secteurs les plus vulnérables sur chacune d'entre elles.

Les **enjeux exposés** prennent en compte le bâti courant d'habitation (maisons individuelles et immeubles d'habitat collectif), les établissements scolaires (écoles, collèges et lycées), les principales zones d'activité commerciales et les principaux bâtiments de catégorie d'importance III et IV.

La vulnérabilité sismique représente la variation de la capacité de résistance d'une construction en fonction du niveau d'agression sismique. Cette perte de capacité peut être fonctionnelle, économique, financière ou structurelle (lorsqu'il y a endommagement de la structure). Le terme « vulnérabilité » est utilisé tout au long de cette étude pour exprimer les différences de comportement 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 parfois complémentaires, pour estimer et exprimer la vulnérabilité peuvent être choisies : description qualitative de la vulnérabilité, avis d'expert, calculs analytiques simplifiées ou analyse numérique (modélisation).

Pour le bâti courant et les zones d'activité commerciales, la vulnérabilité sismique est traitée de façon statistique. Des polygones délimitent différents secteurs à l'intérieur desquels on définit des critères de typologie (lotissements, bâtiments collectifs, habitat dispersé, centres villes...) et d'âge. A chaque type de bâtiment est associé un indice de vulnérabilité. Pour chaque polygone, on calcule un indice de vulnérabilité moyen qui permettra de définir des classes de présomption de vulnérabilité de chaque polygone (vulnérabilité forte, moyenne...).

On utilise ici l'indice de vulnérabilité dit « Risk UE » (de 0 à 1, du moins vulnérable au plus vulnérable, voir définition au paragraphe suivant) qui permet de faciliter les comparaisons avec les scénarios de risque sismique de l'hexagone.

Pour les bâtiments de catégorie d'importance III et IV (dont les bâtiments scolaires), la vulnérabilité sismique est traitée conformément aux avis d'expert émis dans les études de pré diagnostics sismiques. A chaque bâtiment, on associe une classe de présomption de vulnérabilité sismique (faible, moyen, fort). Pour une quarantaine de bâtiments sélectionnés qui n'avaient encore fait l'objet d'aucun diagnostic sismique, la présomption est évaluée à partir d'un examen visuel des bâtiments.

La **simulation de dommages** donne des résultats statistiques de dommages à l'intérieur des polygones ou pour un ensemble de bâtiments si le nombre de bâtiments est suffisamment important. Les dommages aux bâtiments sont répartis en 6 classes D0 à D5 (D0 pour absence de dommage à D5 pour effondrement total). Les informations disponibles sont insuffisantes pour définir le dommage à un bâtiment individuel.

Dans le paragraphe 10.2, nous donnons quelques définitions (démarche Risk-UE niveau 1, indice de vulnérabilité V_i , classification des dommages D0 à D5, logiciel de simulation de dommages).

L'inventaire et la vulnérabilité du bâti sont détaillés dans le paragraphe 10.3, les résultats de simulation de dommages dans le paragraphe 10.4.

10.2. DEMARCHE SUIVIE

Une étude de vulnérabilité du bâti courant à l'échelle de secteurs territoriaux homogènes repose sur :

- Une typologie des bâtiments et leur dénombrement : Le comportement des bâtiments ne pouvant être appréhendé de manière individuelle, il est tout d'abord nécessaire de définir une typologie du bâti courant selon des critères structuraux (matériaux, système de contreventement...) plus ou moins précis. Chaque type de bâti correspond à un groupe de bâtiments caractérisé par une certaine homogénéité de comportement sous séisme.
- Une matrice de probabilité de dommages ou des courbes de vulnérabilité adaptées à la classification retenue. Pour un type de bâti donné, elles expriment le pourcentage de bâtiments atteignant un certain niveau de dommages pour un niveau d'agression sismique donné.

La première étape consiste donc à classer les enjeux en fonction de leur comportement en cas de secousse sismique. Dans le cadre du microzonage sismique, il s'agira donc de réaliser une typologie du bâti courant. Ensuite pour chaque type de bâti identifié, il sera nécessaire de préciser les relations entre niveau de dommage et agression sismique. La typologie de vulnérabilité sismique est basée sur la méthode Risk-UE niveau 1 qui est décrite brièvement dans le paragraphe ci-dessous.

10.2.1. Principe de la méthode Risk-UE niveau 1

La méthode Risk-UE Niveau 1 a été développée dans le cadre d'un projet européen (Milutinovic & Trendafilovski, 2003) ; elle est adaptée à notre zone d'étude.

L'échelle d'intensité EMS98

L'échelle EMS98 (Grünthal *et al.*, 1998) a été établie sur la base du retour d'expérience, en analysant de manière statistique le comportement de différents types de bâtiments ayant subi des séismes dans la période historique.

L'échelle distingue les effets subis par les bâtiments en cas de séisme en fonction de leur vulnérabilité. Elle distingue 6 classes de vulnérabilité de A à F, A étant la classe la plus vulnérable, F étant le degré de conception parasismique le plus élevé. Pour un certain nombre de structures de bâtiment, l'échelle définit la classe de vulnérabilité correspondante (Figure 60).

En parallèle, l'échelle définit aussi 5 degrés de dommages aux constructions. Leur définition est illustrée sur la Figure 61. Pour les besoins des simulations de dommages, un niveau de dommage nul, D0, a été introduit.

Le niveau de dommages observé pour les bâtiments en fonction de leur classe de vulnérabilité est utilisé pour établir l'intensité macrosismique subie pour les degrés V à XI de l'échelle (Figure 62).

La méthode Risk-Ue niveau 1 utilise cette corrélation statistique entre l'intensité macrosismique et le dommage apparent.

Typologie des Structures		Classe de Vulnérabilité					
		A	B	C	D	E	F
MAÇONNERIE	Moellon brut - pierre tout-venant	○					
	Brique crue (adobe)	○	—				
	Pierre brute	—	○				
	Pierre Massive		—	○	—		
	Maçonnerie non armée avec des éléments préfabriqués	—	○	—			
	Maçonnerie non armée avec des planchers en béton armée		—	○	—		
	Maçonnerie renforcée ou chaînée			—	○	—	
BÉTON ARMÉ	Ossature sans conception parasismique	—	—	○	—		
	Ossature avec un niveau moyen de conception parasismique		—	—	○	—	
	Ossature avec un bon niveau de conception parasismique			—	—	○	—
	Murs en béton armé sans conception parasismique		—	○	—		
	Murs en béton armé avec un niveau moyen de conception parasismique			—	○	—	
	Murs en béton armé avec un bon niveau de conception parasismique				—	○	—
ACIER	Bâtiments en charpente métallique			—	—	○	—
BOIS	Bâtiments en bois de charpente		—	—	○	—	

○ classe de Vulnérabilité — gamme la plus probable
 --- gamme la moins probable, cas exceptionnel

Figure 60 : Définition des typologies EMS98 et la classe de vulnérabilité associée.

Classification des dégâts aux bâtiments en MAÇONNERIE	
	<p>Degré 1 : Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structurel, légers dégâts non structuraux)</p> <p>Fissures capillaires dans très peu de murs. Chute de petits débris de plâtre uniquement. Dans de rare cas, chute de pierres descellées provenant des parties supérieures des bâtiments.</p>
	<p>Degré 2 : Dégâts modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)</p> <p>Fissures dans de nombreux murs. Chutes de grand morceau de plâtre. Effondrement partiel des cheminées.</p>
	<p>Degré 3 : Dégâts sensibles à importants (dommages structuraux modérés, dommages non structuraux importants)</p> <p>Fissures importantes dans la plupart des murs.</p> <p>Les tuiles se détachent du toit. Fracture des cheminées à la jonction avec le toit. Défaillance d'éléments non structuraux séparés (cloisons).</p>
	<p>Degré 4 : Dégâts très importants (Dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants)</p> <p>Défaillance sérieuse des murs, défaillance structurale partielle des toits et planchers.</p>
	<p>Degré 5 : Destruction (Dégâts structuraux importants)</p> <p>Effondrement total ou presque total.</p>

Figure 61 : Classification et description des dommages pour les bâtiments en maçonnerie selon l'échelle EMS98.

Intensité V: Fort	Dégâts de degré 1 de quelques bâtiments de classes de vulnérabilité A et B
Intensité VI: Dégâts légers	Dégâts de degré 1 de nombreux bâtiments de classes de vulnérabilité A et B Dégâts de degré 2 de quelques bâtiments de classes de vulnérabilité A et B Dégâts de degré 1 de quelques bâtiments de classes de vulnérabilité C
Intensité VII: Dégâts	De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3 Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 2 Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 1
Intensité VIII: Dégâts importants	De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3 Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 2
Intensité IX: Destructions	De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3 Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 2
Intensité X: Destructions importantes	La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité A subit des dégâts de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3 Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité F subissent des dégâts de degré 2
Intensité XI: Catastrophe	La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité A et B subit des dégâts de degré 5 La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité C subit des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité F subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3

Figure 62 : Définition de la caractérisation des dommages en fonction des intensités EMS98.

Méthode Risk-UE Niveau 1

Le principe de la méthode est décrit de façon détaillée par Sedan *et al.* (2006), et dans Risk-UE (2003,2006).

Dans un premier temps il s'agit de quantifier par une valeur numérique, l'**indice de vulnérabilité** V_i , la vulnérabilité d'un type de bâtiment qui s'exprime de manière qualitative dans l'EMS98 (classes de vulnérabilité A à F). Les valeurs de cet indice sont comprises entre 0 (non vulnérable) et 1 (très vulnérable).

Cet indice permet le calcul d'un **taux de dommage moyen** μ_D , en fonction de l'intensité macrosismique I et de l'indice de vulnérabilité V_i selon l'équation suivante :

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

μ_D est un nombre variant entre 0 et 5 balayant de façon continue les niveaux de dommages D0 à D5 définis par l'échelle EMS98. $\mu_D = 0$ signifie une absence de dommages, $\mu_D = 5$ signifie un dommage D5 (=destruction du bâtiment).

Une loi de distribution de type bêta permet alors de transcrire ce taux moyen de dommage en distribution d'endommagement.

Par exemple, un bâtiment dont l'indice de vulnérabilité est $V_i=0.9$, soumis à une intensité VIII aura un taux de dommage moyen $\mu_D=3$. La Figure 63 présente un exemple de distribution de dommages et de courbe de fragilité correspondant à un degré de dommage moyen (μ_D) de 3.

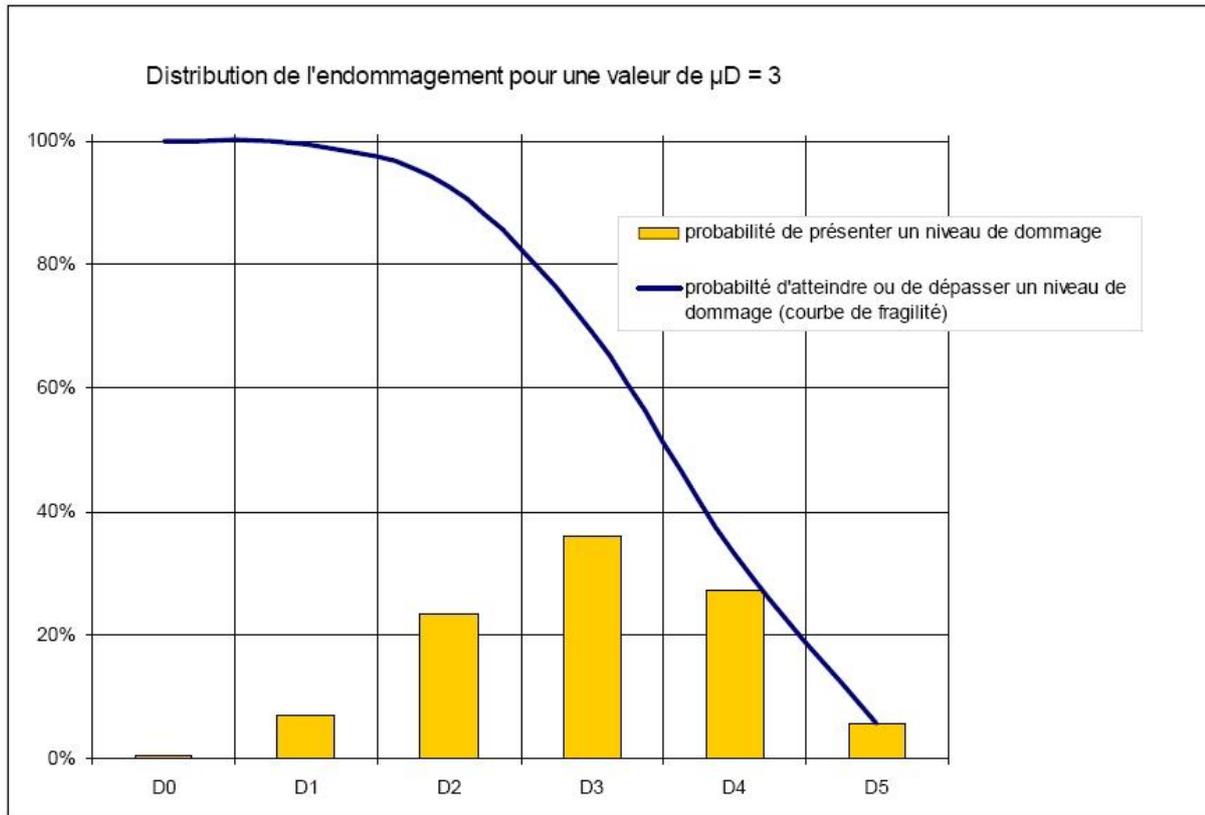


Figure 63 : Exemple de distribution de dommages et de courbe de fragilité pour $\mu_D=3$.

En réalité, un type de bâtiment ne satisfait pas à un indice de vulnérabilité V_i constant, mais plutôt à une fourchette d'indices centrée autour d'une valeur « la plus probable » notée V_i^* , comprise entre des valeurs $V_i \text{ min}$ et $V_i \text{ max}$, limites inférieures et supérieures des valeurs possibles de V_i . On définit aussi des bornes V_i^- et V_i^+ , plus restrictives que $V_i \text{ min}$ et $V_i \text{ max}$, limites de l'intervalle plausibles de V_i .

Des valeurs de V_i ont été définies pour 23 types principaux de bâti organisés selon la matrice de typologie Risk-UE. Elles sont représentées dans le Tableau 18.

Code	Typologie	Vimin	Vi-	Vi	Vi+	Vimax
M1	Murs porteurs en maçonnerie de pierres composées de :					
M1.1	Moellons	0,62	0,81	0,873	0,98	1,02
M1.2	Pierres appareillées	0,46	0,65	0,74	0,83	1,02
M1.3	Pierres de taille	0,3	0,49	0,616	0,793	0,86
M2	Adobe	0,62	0,687	0,84	0,98	1,02
M3	Murs porteurs en maçonnerie non armée:					
M3.1	Plancher en bois	0,46	0,65	0,74	0,83	1,02
M3.2	Voûtes en maçonnerie	0,46	0,65	0,776	0,953	1,02
M3.3	Planchers avec poutrelles métalliques et maçonnerie	0,46	0,527	0,704	0,83	1,02
M3.4	Plancher en béton armé	0,3	0,49	0,616	0,793	0,86
M4	Murs porteurs en maçonnerie armée ou confinée	0,14	0,33	0,451	0,633	0,7
M5	Constructions en maçonnerie renforcées dans leur ensemble	0,3	0,49	0,694	0,953	1,02
RC1	Système poteaux/poutres	-0,02	0,047	0,442	0,8	1,02
RC2	Murs de refend en béton	-0,02	0,047	0,386	0,67	0,86
RC3.1	Système poteaux/poutres avec mur de remplissage en maçonnerie non armée Structures régulières	-0,02	0,007	0,402	0,76	0,98
RC3.2	Système poteaux/poutres avec mur de remplissage en maçonnerie non armée Structures irrégulières (i.e.	0,06	0,127	0,522	0,88	1,02
RC4	Structure mixte en béton armé (portiques et murs en béton)	-0,02	0,047	0,386	0,67	0,86
RC5	Murs en béton préfabriqué	0,14	0,207	0,384	0,51	0,7
RC6	Structure en béton préfabriqué avec murs de refend en béton	0,3	0,367	0,544	0,67	0,86
S1	Système poteaux/poutres en acier	-0,02	0,467	0,363	0,64	0,86
S2	Structure en acier contreventé	-0,02	0,467	0,287	0,48	0,7
S3	Système poteaux/poutres en acier avec mur de remplissage en maçonnerie non armée	0,14	0,33	0,484	0,64	0,86
S4	Système poteaux/poutres en acier avec mur de refend béton coulés en place	-0,02	0,047	0,224	0,35	0,54
S5	Système de composant acier et béton armé	-0,02	0,257	0,402	0,72	1,02
W	Structure en bois	0,14	0,207	0,447	0,64	0,86

Tableau 18 : Matrice de typologies de bâtiments et indices de vulnérabilité (méthode Risk-UE).

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 en ajoutant (facteur aggravant) ou en retranchant (facteur favorable), un facteur ΔV_m à l'indice de vulnérabilité V_i^* . Le Tableau 19 et le Tableau 20 donnent des exemples de facteurs correctifs pour les bâtiments en acier, béton armé et maçonnerie. Certains facteurs non adaptés au contexte de la Guadeloupe (par exemple, le facteur « cheminée ») ont été remplacés par des facteurs caractéristiques à la zone d'étude.

Un facteur de vulnérabilité régionale ΔV_r est introduit pour prendre en compte la qualité particulière de certains types de bâtiments au niveau régional. Il modifie l'indice de vulnérabilité V_i^* sur la base d'un jugement d'expert ou prend en considération la vulnérabilité observée. Le facteur de vulnérabilité régional ΔV_r peut être introduit à la fois pour une typologie et pour une catégorie.

Facteurs aggravants pour les bâtiments RC et acier	Facteurs de vulnérabilité		Code Bas	Code Moyen
	Nb d'étages	Bas (1, 2 ou 3)	-0,04	-0,04
		Moyen (4, 5 ou 6)	0	0
		Haut (7 ou plus)	+0.08	+0.06
Irrégularité en plan	Forme (L, C)	Oui	+0.02	+0.01
		Non	0	0
	Protubérance	Oui	+0.02	+0.01
		Non	0	0
Irrégularité élévation	Saillie	Oui	+0.02	+0.01
		Non	0	0
	Retrait	Oui	+0.02	+0.01
		Non	0	0
	Joints insuffisants (non PS)	Oui	+0.04	0
		Non	0	0
	Poteaux courts	Oui	+0.02	+0.01
		Non	0	0
Règles PS	Avant 1982 : L	+0.16		
	Après 1982 : M		0	

Tableau 19 : Facteurs aggravants pour les bâtiments en acier et béton armé.

Facteurs aggravants pour les bâtiments en <u>maçonnerie</u>	Facteurs de vulnérabilité		
	Etat d'entretien		B = bon
M = mauvais			+0.04
Nb d'étages		Bas (1 ou 2)	-0,04
		Moyen (3, 4 ou 5)	0
Irrégularité en plan	Forme (L, C)	Oui	+0.02
		Non	0
	Protubérances	Oui	+0.02
		Non	0
Irrégularité élévation	Saillie	Oui	+0.01
		Non	0
	Retrait	Oui	+0.01
		Non	0
Interaction entre bâtiment	Position dans l'îlot	A = angle	+0.04
		M = milieu	-0.04
		T = tête d'îlot	+0.06
	Différence de hauteur/voisin	Oui	+0.02
		Non	0
	Irrégularité en toiture	Oui	+0.04
		Non	0
	Décalage de plancher	Oui	+0.04
	Transparence - démolition	Oui	+0.04
	Balcons - cheminées	Oui	+0.01
	Etages: haut. différente	Oui	+0.04
		Non	0

Tableau 20 : Facteurs aggravants pour les bâtiments en maçonnerie.

10.2.2. Logiciel de simulation ARMAGEDOM©

La simulation de risque sismique sur les dix communes du projet, consiste à évaluer l'endommagement du parc bâti dès lors que sont définis :

- l'agression sismique ;
- les enjeux exposés ;
- la vulnérabilité sismique associée à ces enjeux.

Elle est faite à l'aide du logiciel ARMAGEDOM© mis au point au BRGM (Sedan *et al.*, 2012). ARMAGEDOM© 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. Cette évaluation peut être directe (dommages aux bâtiments résultant de la confrontation entre agression et vulnérabilité) ou indirecte (par exemple, les dommages aux personnes (préjudices humains) sont déduits des dommages physiques aux bâtiments).

Conçu comme une plateforme pouvant accueillir différents modules (module séisme, module mouvement de terrain, module tsunami, etc.), le logiciel est, dans sa version actuelle, dédié à la réalisation de scénarios sismiques. Le principe de la méthodologie est résumé dans la

Figure 64.

Pour le bâti courant de catégorie d'importance II, les résultats de scénario sismique permettent un affichage par maille carrée de 250m, du nombre et du pourcentage de bâtiments présentant un degré de dommage Di selon l'échelle de classification EMS98. Les mêmes résultats sont également exprimés en nombre ou pourcentage de logements.

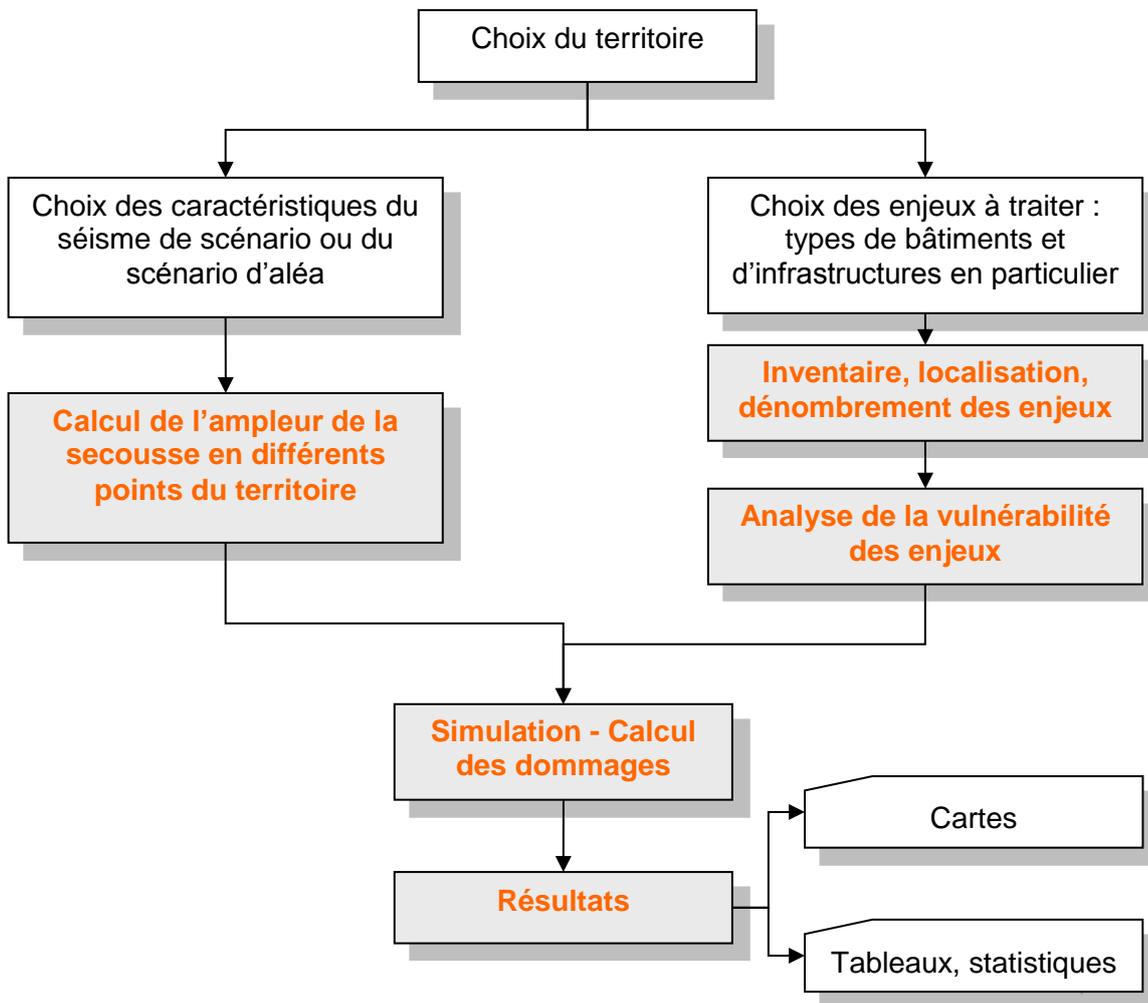


Figure 64 : Organigramme d'un scénario de risque. En rouge sur fond gris, tâches à traiter par un modèle de simulation

10.3. INVENTAIRE ET VULNERABILITE SISMIQUE DU BATI

10.3.1. Bâti courant à usage d'habitation

Les statistiques de logement par communes sont fournies dans le Tableau 21, sur la base des données du SDRS (Scénarios Départementaux du Risque Sismique en Guadeloupe ; Bertil *et al.*, 2009).

Commune	Logements	Logements en maison individuelle	Logements en habitat collectif	% Logements après 1990	% Logements en dur (BA)	Population
---------	-----------	----------------------------------	--------------------------------	------------------------	-------------------------	------------

					ou maçonnerie)	
Capesterre- Belle-Eau	8619	7845	558	34.75%	87.92%	19610
Goyave	3336	2301	989	47.09%	89.04%	7575
Le Gosier	14021	10598	3163	39.61%	92.81%	27370
Le Moule	10318	8803	1449	47.93%	86.03%	21027
Les Abymes	28548	16093	11885	32.08%	86.20%	60053
Morne-à- l'Eau	7668	6999	626	40.54%	85.19%	16703
Petit-Bourg	9343	7816	1406	38.12%	90.40%	21153
Sainte- Anne	11421	9778	1191	46.09%	91.32%	23073
Saint- François	7355	5942	1315	55.31%	84.97%	13424
Trois- Rivières	3867	3589	193	38.48%	90.66%	8864

Tableau 21 : statistiques de logements INSEE (2006)

L'habitat sur les 10 communes est majoritairement récent puisque entre 30% et 50% des logements ont été construits après 1990. Le logement en maison individuelle est prépondérant, sauf pour la commune des Abymes où le logement en habitat collectif représente ~40% du parc immobilier.

Délimitation des zones bâties homogènes

Ce travail est principalement repris de l'étude SDRS (Bertil *et al.*, 2009). La typologie du bâti d'habitation et les indices de vulnérabilité sismique sont repris de l'étude (2006).

Chaque carte communale est divisée en zones de bâti homogènes, c'est-à-dire en secteurs où l'on considère que le bâti est constitué :

- Soit par un seul bâtiment ;
- Soit par plusieurs types de bâtiments répartis d'une manière homogène, telle que l'on puisse évaluer la proportion de chaque type.

Ce travail est réalisé sur la base des orthoplans (édition 2004) et cartes topographiques (édition 1988) de l'IGN et des contours IRIS INSEE.

Les différentes zones bâties homogènes sont classées sous une typologie générale : centre-ville, lotissement de maisons individuelles, résidence d'immeuble d'habitation collective, habitat dispersé. Cette typologie est illustrée sur la Figure 65 et la Figure 66.



Figure 65 : Exemples de zones à habitat collectif (à droite) et lotissement (à gauche).



Figure 66 : Exemples de zones d'habitat disparate (à gauche) et de centre-ville (à droite).

Les deux éditions de cartes IGN permettent de dater les zones de bâti homogène, en estimant l'antériorité ou la postériorité d'une zone bâtie par rapport à l'année de levé de la carte. Ainsi, on distingue les secteurs où l'habitat est majoritairement d'âge antérieur à 1988, et ceux où l'habitat récent et anciens sont mélangés de façon plus ou moins homogène dans chaque polygone.

Dès qu'un polygone homogène est délimité, on évalue la densité de bâtiments par hectare, ce qui permet de calculer statistiquement le nombre de bâtiments du secteur.

Pour le bâti collectif, le nombre de bâtiments est compté individuellement. Le nombre de logements est évalué d'une part à partir de pré-diagnostic de vulnérabilité sismique disponibles, d'autre part à partir de visites sur le terrain et d'estimations visuelles effectuées au cours de cette étude.

La typologie des centre-bourgs des communes de Trois-Rivières, Capesterre Belle-Eau, Goyave, Petit-Bourg, Gosier, Sainte-Anne, Le Moule et Morne à l'eau a fait l'objet d'une visite de terrain spécifique lors de l'étude préliminaire du SDRS (Bertil *et al.*, 2006), celle des centre-bourgs des communes des Abymes et de Sainte-Anne a fait l'objet de visites de terrain effectuées dans cette présente étude (une typologie standard de centre-ville avait été utilisée pour ces deux zones dans le cadre du SDRS).

L'estimation du nombre de logements par commune est comparée aux statistiques INSEE de 2006. On constate une surestimation d'environ 13 % du nombre de logements par rapport aux données INSEE. Comme indiqué dans l'étude SDRS, cela est dû à la méthode de comptage qui d'une part, évalue le nombre de bâtiment de façon statistique, et d'autre part ne permet pas d'éliminer les bâtiments dispersés au sein de chaque polygone qui sont affectés à un autre usage que l'habitation.

Typologie et vulnérabilité sismique du bâti courant

La typologie du bâti courant à usage d'habitation et les indices de vulnérabilité sismique sont repris de l'étude Bertil *et al.* (2006). Pour le bâti courant en Guadeloupe, on distingue schématiquement :

- Un **habitat de fortune** qui tend progressivement à se résorber mais persiste dans certains quartiers pauvres de Pointe à Pitre et de manière diffuse dans l'ensemble de la Guadeloupe.
- Quelques **bâtiments anciens en maçonnerie de pierres** (volcaniques) non taillées et liant maigre à la chaux, essentiellement concentrés dans le centre-ville de Basse-Terre ;
- Des **constructions en bois**, se rattachant de près ou de loin à la case créole traditionnelle, qui constituent encore une proportion non négligeable du bâti. Quelques maisons récentes en bois, réalisées par des professionnels, suggèrent le renouvellement de cette tradition constructive.
- Des **maisons individuelles** plus récentes (postérieures à 1960), le plus souvent en **maçonnerie de parpaings chaînés**, présentant éventuellement un niveau en ossature béton (pilotis).
- Dans les centre-bourgs, des **petits collectifs en maçonnerie chaînée ou structure poteaux-poutres avec remplissage**, pouvant présenter une transparence généralement pour accueillir un commerce à leur rez-de-chaussée.
- Des **logements sociaux individuels**, groupés en bandes, construits en **maçonnerie légère ou béton banché** pour les plus récents.
- De nombreux **immeubles en béton**, également à vocation sociale, présents dans l'immédiate périphérie des villes principales de Guadeloupe, construits dans la période 65-85 selon des techniques importées de métropole (**coffrages tunnels...**).
- Des **immeubles plus récents** et à l'architecture plus recherchée, fréquemment réalisés à base de **murs voiles banchés**, en conformité supposée avec les codes de construction parasismique. Ce type de constructions constitue une part importante du parc locatif récent.

Une typologie simplifiée en 12 types est retenue. A chaque type est associé un indice de vulnérabilité « Vi moyen Risk-UE » (Tableau 22). Cet indice varie de 0 à 1 par vulnérabilité croissante. Pour chaque polygone, on identifie les types de bâti présent et leur répartition.

CODE	Type	Indice de Vulnérabilité Vi
HABFOR	habitation de fortune	1,00
MCPIER	maçonnerie en pierre	0,94
CASTRA	case traditionnelle	0,50
VIBOIS	villa en bois	0,45
MCVIEU	maçonnerie ancienne pas ou mal chaînée	0,80
VDR0R1	villa dure R0/R1	0,70
VDR2R2	villa dure R+2	0,78
VDR1PI	villa dure R+1 pilotis	0,86

COLBAN	immeuble béton banché	0,51
COLPPB	immeuble PPBA (Poteau Poutre Béton Armé) + remplissage	0,80
COLBAT	immeuble BA + transparence rez-de-chaussée	0,84
COLURB	Immeuble collectif urbain R+3 maxi	0,75

Tableau 22: Typologie du bâti d'habitation pour la Guadeloupe et indice de vulnérabilité associé.

Pour chaque polygone, nous avons calculé un indice moyen pondéré $v_{i_{pond}}$ correspondant à la moyenne des indices V_i de tous les bâtiments présents. Les polygones sont alors répartis en 3 catégories :

- **présomption de vulnérabilité faible à moyenne :** $V_i \leq 0.55$
- **présomption de vulnérabilité moyenne à forte :** $0.55 < V_i < 0.74$
- **présomption de vulnérabilité forte** $V_i \geq 0.74$

Dans les rapports spécifiques par commune, une carte détaillera les zones d'habitat homogènes, ainsi que la répartition des bâtiments ayant une présomption de vulnérabilité comprise dans ces trois catégories.

10.3.2. Bâtiments de catégorie d'importance III et IV

Les bâtiments concernés sont :

- pour la catégorie III (ouvrages à risque élevé pour les personnes ou les activités) :
 - les bâtiments d'habitation collectifs, bureaux, de hauteur supérieure à 28 m ;
 - les établissements recevant du public de 1ère à 3ème catégories ;
 - les autres bâtiments accueillant plus de 300 personnes ;
 - les établissements sanitaires et sociaux sauf exception ;
 - les bâtiments de production collective d'énergie ;
 - les établissements scolaires ;
- pour la catégorie IV (ouvrages dont le fonctionnement est primordial pour la sécurité civile, pour la défense ou l'ordre public) :
 - les bâtiments abritant les moyens de secours ;
 - les bâtiments définis par le ministère de la Défense ;
 - les bâtiments assurant les communications ;
 - les établissements recevant du public de santé spécialisés en affectations graves ;
 - la production et stockage d'eau potable ;
 - la distribution publique de l'énergie ;
 - les centres de météorologie.

Etablissements scolaires

L'inventaire et la géo localisation des bâtiments scolaires ont été réalisés dans le cadre du projet BD-bâti (Bertil, 2008) ; ils ont tenu compte :

- de l'inventaire des écoles de Guadeloupe sous forme de SIG MapInfo de la DDE ;

- de la liste des établissements scolaires de l'Académie de Guadeloupe (site Internet et CD-ROM des PPMS (Plan Particulier de Mise en Sureté), du Conseil Général (pour les collèges), du Conseil Régional (pour les lycées).

Sont géoréférencés sur les 10 communes étudiées : 154 écoles, 14 collèges, 11 lycées. Le nombre total de bâtiment pris en compte est respectivement 702 pour les écoles, 174 pour les collèges et 327 pour les lycées.

Des campagnes de pré-diagnostic sismique des bâtiments scolaires ont été lancées en Guadeloupe en 2008 / 2009. Les études pour les écoles primaires et maternelles (Dunand, 2009), et pour les lycées (Dunand *et al.* 2009) sont terminés. Les résultats des études de prédiagnostics de vulnérabilité pour les collèges réalisés en 2011 ne nous ont pas été communiqués par le Conseil Général.

Les résultats de pré-diagnostic donnent des indications de présomption de vulnérabilité pour chaque bâtiment en distinguant 5 catégories : vulnérabilité très faible, faible, moyenne, forte et extrême.

Pour l'ensemble des bâtiments scolaires présents sur les 10 communes étudiées, la répartition de la vulnérabilité sismique est illustrée dans le Tableau 23. Elle met en évidence la situation préoccupante des bâtiments scolaires de Guadeloupe vis-à-vis de la menace sismique.

Vulnérabilité sismique des bâtiments scolaires	faible à très faible	moyenne	forte à extrême
Nombre	187	147	595
Pourcentage	20%	16%	64%

Tableau 23 : Vulnérabilité sismique des bâtiments scolaires.

Autres bâtiments de catégorie d'importance III et IV

Les bâtiments abritant les PC communaux ont fait l'objet d'une étude de pré-diagnostic sismique en 2004 (Davidovici, 2004). Le Tableau 24 regroupe ces pré-diagnostic de vulnérabilité et donne une indication de vulnérabilité.

Commune	Bâtiment	Année	Vulnérabilité	Source
Le Gosier	Mairie		« Pas de garantie suffisante vis à vis des charges sismiques »	Davidovici 2004
Goyave	Services techniques bureaux	1995	« Satisfaisant »	Davidovici 2004
Saint François	Mairie	1930	« Pas satisfaisant »	Davidovici 2004
Le Moule	Centre technique	1991-92	« Satisfaisant »	Davidovici 2004
Morne à l'Eau	Mairie	1925	« Pas satisfaisant »	Davidovici 2004

Les Abymes	Mairie	1983 (PS69)	« <i>Comportement satisfaisant sans garantir la fonctionnalité du PC</i> »	Davidovici 2004
Trois-Rivières	Mairie	1956	« <i>Pas de garantie suffisante vis à vis des séismes</i> »	Davidovici 2004
Capesterre-Belle-Eau	Mairie	1930	« <i>Comportement pas satisfaisant</i> »	Davidovici 2004
Sainte-Anne	Marie neuve) (partie	1992	« <i>La stabilité du bâtiment reste à justifier.</i> »	Davidovici 2004
Petit Bourg	Police municipale	1988	« <i>Comportement satisfaisant</i> »	Davidovici 2004

Tableau 24 : Inventaire des bâtiments abritant les PC communaux en Guadeloupe et résultats de pré-diagnostic (Davidovici, 2004).

D'autres bâtiments de classe III et IV des communes concernées par cette étude ont été recensés et géoréférencés dans Bertil *et al.* (2009) ; cette liste ne traite pas des bâtiments mentionnés ci-dessus, ni de l'habitat collectif, ni des centres commerciaux et installations classées SEVESO. Un tableau récapitulatif sera présent dans les rapports spécifiques par commune. L'étude de Lebrun *et al.* (2001) donne une présomption de vulnérabilité sur les bâtiments de police municipale, de gendarmerie et les bâtiments de santé.

Analyse de vulnérabilité sismique des bâtiments sélectionnés

L'étude de microzonage sismique prévoit la sélection d'une quarantaine de bâtiments pour l'ensemble des dix communes (4 à 5 bâtiments par commune) pour lesquels les facteurs de vulnérabilité seraient analysés à partir d'une inspection visuelle intérieure et extérieure de chaque bâtiment par un expert en vulnérabilité sismique.

Lors de l'analyse, les critères suivants sont pris en compte :

- la typologie structurelle (maçonnerie, structure portique béton armé, structure métallique, etc) ;
- la hauteur du bâtiment et le niveau de code parasismique appliqué (date de construction) ;
- l'état d'entretien, les désordres apparents (fissures, infiltrations d'eau ...), l'environnement du bâti ;
- l'identification de facteurs de vulnérabilité sur l'architecture, la structure et les éléments non structuraux.

De cette analyse, une indication de présomption de vulnérabilité sismique est proposée (faible, moyenne, forte...) comme pour les pré-diagnostic des établissements scolaires de Guadeloupe.

Le choix des bâtiments à analyser s'est effectué lors du comité de pilotage de suivi du 12 avril 2011. Ont été sélectionnées, de préférence, des catégories de bâtiment ne faisant pas l'objet de campagne de diagnostic sismique à court terme. Parmi ceux-ci :

- des crèches ;
- les lieux de culte religieux les plus importants ;
- des bâtiments recevant du public (culture/spectacle/sport).

Les 48 bâtiments sélectionnés et leurs présomptions de vulnérabilité sismique sont listés dans le Tableau 26. Des fiches de synthèse des visites et des analyses sont détaillées dans les rapports spécifiques par commune.

Vulnérabilité sismique de bâtiments III et IV	faible à moyenne	moyenne à forte	forte
Nombre	14	21	16
Pourcentage	27.4%	41.2%	31.4%

Tableau 25 : Vulnérabilité sismique des bâtiments visités.

Commune	Bâtiment	Année de construction	Vulnérabilité
Morne à l'Eau	Mairie	1925	Forte
Morne à l'Eau	Police municipale et service culturel	Années 1930	Forte à moyenne
Saint François	Mairie		Forte
Saint François	STM		Forte
Saint Anne	Mairie	Bâtiment principal et annexe (plus récent). Age indéterminé.	Forte (ancien) et moyenne (annexe)
Saint Anne	Accueil petite enfance	Bâtiment original de 1977, extension en 2009	Moyenne (partie ancienne) et faible (partie neuve)
Saint Anne	Centre culturel	1980	Moyenne à forte
Saint Anne	Cuisine centrale	1983-84	Moyenne
Le Gosier	MJC	Années 1970	Forte (dojo) et moyenne (reste)
Le Gosier	Crèche	1997	Faible
Le Gosier	Eglise		Forte
Le Gosier	Médiathèque	1996	Faible à moyenne (angle affaibli en façade)
Trois Rivières	Mairie	1956	Forte

Trois Rivières	Eglise	1931	Forte
Trois Rivières	Régie des eaux	1990	Moyenne
Trois Rivières	Service culturel et sportif	~1985	Moyenne à faible
Trois Rivières	Salle Blancourt	1971	Forte
Petit Bourg	Mairie	Bâtiment principal (Ali Tur) et annexe (1960).	Forte
Petit Bourg	Dispensaire (CLASS)	Fin années 1980- début 1990	Moyenne à forte
Petit Bourg	Eglise du bourg	1932	Moyenne
Petit Bourg	Eglise Prise d'Eau	1953	Moyenne
Petit Bourg	Services techniques	Plus de 40 ans	Moyenne
Les Abymes	Mairie	1985	Faible à moyenne (ponctuellement)
Les Abymes	Police municipale Raizet	Plus de 40 ans	Forte à moyenne
Les Abymes	Ancienne mairie	Années 1930	Forte
Les Abymes	Centre culturel Cité Lacroix	Indéterminée	Moyenne à faible
Les Abymes	Salle René Elie Chazeau		Moyenne à forte
Le Moule	Mairie	Plus de 50 ans	Forte
Le Moule	Eglise	Bâtiment historique	Forte
Le Moule	Médiathèque	1991-1993	Faible à moyenne
Le Moule	Centre Robert Loyson	Années 1990 (bureaux)	Moyenne à forte
Le Moule		Années 2000. Théâtre-cinéma	Faible
Le Moule	Régie des sports	1980 (salle)	Moyenne
Le Moule		2000 (bureaux)	Faible
Capesterre-Belle-Eau	Mairie	Construit dans les années 1930, extension en 1970	Forte
Capesterre-Belle-Eau	Police municipale	2008	Faible
Capesterre-Belle-Eau	Gymnase	1985	Moyenne
Capesterre-	Temple hindou	1976	Moyenne

Belle-Eau			
Capesterre-Belle-Eau	Crèche Man-tine	Environ 1977	Moyenne
Capesterre-Belle-Eau	OMSC. Principal	1952	Forte
Capesterre-Belle-Eau	OMSC. Bureaux		Faible
Goyave	Restaurant scolaire	Années 1980	Moyenne à forte
Goyave	Eglise	Age inconnu, plus de 40 ans	Entre moyenne en forte
Goyave	Presbytère	~1860	Faible
Goyave	Ancienne mairie (salle de fêtes)	Plus de 50 ans	Forte
Goyave	Mairie	Début années 1990	Moyenne et forte (ponctuellement)
Goyave	STM. Bureaux	Années 1980	Moyenne à faible
Goyave	STM. Atelier / hangar		Moyenne à faible

Tableau 26 : Inventaire des bâtiments sélectionnés et leur présomption de vulnérabilité

10.4. SIMULATION DE DOMMAGES

10.4.1. Scénario et calcul de l'ampleur de la secousse

Les simulations d'endommagement sont effectuées pour un scénario d'aléa régional qui consiste à appliquer une accélération maximale au rocher (PGA) constante en tout point du territoire. Le PGA au rocher est égal à 300mg d'après le spectre de référence retenu pour le calcul de l'aléa régional (Tableau 4).

A partir du zonage des effets de site lithologiques (Figure 29), on définit un coefficient d'amplification à appliquer sur les sols non rocheux, défini comme le rapport des valeurs d'accélération au palier du spectre de réponse élastique, entre spectre de la classe d'effet de site lithologique considérée et spectre de référence au rocher (Tableau 27, Tableau 28).

Classe d'effets de site lithologiques	Coefficient d'amplification (rapport R_M)	Accélération maximale horizontale (mg)	Intensité macrosismique (EMS-98)
0 (rocher)	1	300	VIII

1	1.33	400	VIII-IX
2	1.73	520	IX
3	1.93	580	IX
4	1.46	440	VIII-IX
5	1.6	480	IX
6	2.26	680	IX

Tableau 27 : Coefficients d'amplification dans les classes d'effets de site lithologiques pour les communes de Basse-Terre.

Classe de sol	Coefficient d'amplification (rapport RM)	Accélération maximale horizontale mg	Intensité
0 (rocher)	1	300	VIII
1	2.4	720	X
2	2	600	IX
3	1.46	438	VIII-IX
4	1.67	501	IX

Tableau 28 : Coefficients d'amplification dans les classes d'effets de site lithologiques pour les communes de Grande-Terre.

La simulation est faite à l'aide du logiciel ARMAGEDOM© mis au point au BRGM (Sedan *et al.*, 2012). ARMAGEDOM© 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. Conçu comme une plateforme pouvant accueillir différents modules (module séisme, module mouvement de terrain, module tsunami, etc ...). Le logiciel est, dans sa version actuelle, dédié à la réalisation de scénarios sismiques.

On rappelle ici que cette évaluation de dommage est fictive. Il ne s'agit pas ici d'un scénario de séisme réel et de dommages possibles liés à ce séisme mais d'un niveau d'accélération arbitrairement imposé pour faire des comparaisons de comportement en cas de séisme entre secteurs d'habitation. Ces scénarios de risque n'ont été réalisés que pour le bâti à usage d'habitation.

Dans les rapports spécifiques, les résultats sont détaillés pour chacune des communes étudiées.

Pour le bâti courant de catégorie d'importance II (et uniquement pour cette catégorie), les résultats de scénario sismique sont présentés sous différentes formes :

- Cartes de pourcentage de bâtiments ou de logements par maille carrée de 250m (ou par zone homogène selon le cas) présentant un Di et donnant une indication du risque relatif ;
- Des cartes de nombre de bâtiments ou de logements par maille carrée de 250m (ou par zone homogène selon les cas) présentant un degré de dommage Di et donnant une indication du risque absolu.

Le Tableau 29 montre la répartition des dommages pour les différentes communes.

Les communes avec des taux d'endommagement plus fort sont les Abymes et Morne à l'eau, une grande partie du territoire communal de ces communes étant dans une zone à très fort effet de site et par conséquent avec des plus forts ratios d'endommagement d'après le risque sismique. Les résultats sont détaillés dans les rapports spécifiques sous forme de fiche présentant les degrés d'endommagement observés pour chaque commune.

Dommages	D0	D1	D2	D3	D4	D5
Capesterre-Belle-Eau	2.76%	10.66%	20.92%	28.64%	26.21%	10.81%
Gosier	2.04%	9.13%	21.18%	30.52%	26.66%	10.46%
Goyave	5.86%	17.89%	27.92%	27.69%	16.47%	4.17%
Le Moule	2.95%	11.47%	23.00%	30.51%	24.45%	7.62%
Les Abymes	1.94%	8.48%	19.03%	28.48%	28.05%	14.01%
Morne-A-L'eau	1.58%	8.05%	18.81%	28.72%	28.95%	13.89%
Petit-Bourg	5.28%	16.36%	26.98%	28.66%	18.23%	4.49%
Ste-Anne	1.95%	9.53%	21.82%	30.39%	25.97%	10.34%
St-François	2.28%	10.97%	23.43%	30.78%	24.38%	8.16%
Trois-Rivières	3.15%	11.53%	21.52%	28.60%	25.40%	9.80%

Tableau 29 : Répartition de dommages par commune.

11. Conclusion générale

L'objectif de cette étude portait sur l'évaluation de l'aléa sismique local sur le territoire de 10 communes de Guadeloupe non pourvu jusqu'alors d'un microzonage sismique : Trois-Rivières, Capesterre-Belle-Eau, Goyave, Petit-Bourg, Gosier, Abymes, Sainte-Anne, Saint-François, Moule, Morne à l'Eau.

A 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 des Plans de Prévention du Risque Sismique édités par les Ministères concernés.

Les résultats sont fournis sous la forme de cartes pour chaque commune : à 1/25 000 pour l'ensemble de la commune et à 1/10 000 pour les centre-bourgs. Leur lecture permet de connaître, en tout point de coordonnées de la commune :

- Les zones de réponse homogène ;
- L'existence de phénomènes d'amplification topographique et de zones susceptibles de liquéfaction ;
- L'intensité de l'aléa mouvement de terrain ;
- La vulnérabilité des secteurs d'habitation.

Le **mouvement sismique de référence au rocher** est déterminé à partir d'une démarche probabiliste. Les séismes de référence sont choisis à partir de la désagrégation de l'aléa sismique régional calculé pour une période de retour de 475 ans à partir des paramètres définis par l'étude de Geoter (Martin, 2002).

Le **zonage des effets de site lithologiques** permet de définir pour la Basse-Terre, 6 classes de sol spécifiques (rocher inclus) et pour la Grande-Terre, 4 classes de sol spécifique. Les contours des zones ont été mis en continuité avec ceux des microzonages de l'agglomération de Basse-Terre et de Baie-Mahault/Lamentin. Il est à noter que la classe BT6 regroupe trois zones pour lesquelles les colonnes de sol sont mal contraintes. Elle est donc sujette à caution et son spectre de réponse très pénalisant et peu réaliste en termes d'amplification, est donné à titre indicatif. Pour cette classe particulière, il est recommandé de réaliser une étude de sol au droit du site à construire.

Les **zones d'amplification du mouvement sismique par effet de site topographique** sont concentrées pour la Basse-Terre majoritairement à l'intérieur du Parc National et pour la Grande-Terre, la zone des Grands-Fonds.

L'étude des **failles actives** s'est focalisée sur les failles classées parmi les mieux connues et les plus actives selon l'étude de Terrier et al (2002). Dix failles ont ainsi été retenues pour la Basse-Terre (Failles des Monts Caraïbes, Morne Liquin, ...) et seize pour la Grande-Terre (Faille du Gosier, des Grippons, de la Rivière Salée). Un descriptif spécifique à chaque faille active identifiée est présenté sous forme de fiche.

Concernant l'**aléa mouvement de terrain**, la cartographie est reprise des PPR existants sauf pour la commune de Petit-Bourg où l'aléa a été révisé en tenant compte des instabilités survenues depuis 1993.

Le **zonage d'aléa liquéfaction** est aussi représenté. Les communes de Trois-Rivières et de Capesterre Belle-Eau ne sont que très peu concernées contrairement aux Abymes et à Morne à

l'Eau où on retrouve la plupart des zones liquéfiables. Un aléa fort est souvent associé aux zones littorales.

Concernant la **vulnérabilité du bâti**, une sélection de bâtiments municipaux de catégorie d'importance III et IV (voire II) ont fait l'objet de pré-diagnostic. Les fiches des bâtiments concernés sont présentées dans les rapports spécifiques aux communes.

Pour les bâtiments scolaires présents sur les 10 communes étudiées, la répartition de la vulnérabilité sismique de l'ensemble de ceux-ci montrent qu'une grande proportion est classée en vulnérabilité « forte à extrême ».

Une **simulation des dommages** est effectuée à partir d'un scénario d'aléa (application de l'accélération maximale au rocher issu du spectre d'aléa régional et prise en compte de l'aléa local). Les résultats sont présentés sous forme de fiche pour chacune des communes. Les résultats montrent que ce sont les communes des Abymes et de Morne à l'eau qui présentent les plus forts ratios d'endommagement.

Les différentes composantes de l'aléa sismique local devraient idéalement 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 du projet. Une phase de transcription de ces résultats purement technique et l'appropriation de mesures préventives restent nécessaires pour l'élaboration des plans de Prévention des Risques (PPR).

Si au cours des 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 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, il reste à convaincre tous les acteurs y compris les particuliers 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 aux constructions qui n'ont pas fait l'objet de dispositions constructives parasismiques. Au contraire, les constructions pour lesquelles les dispositions élémentaires ont été appliquées, se comportent bien en général.

Pour appliquer ces dispositions élémentaires, il est nécessaire qu'un cadre réglementaire astreigne constructeurs, aménageurs et urbanistes à les suivre. Ainsi, transposer les constats techniques des études de microzonages en documents opposables aux tiers est une nécessité. C'est précisément l'objet des Plans de Prévention du Risque Sismique dont la réalisation est du ressort des services de l'Etat.

12. Bibliographie

Abrahamson, N. A. & Silva, W. J. (2007), Abrahamson & Silva NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters, , PEER Report 200x/xx, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, July 9 2007, Draft Version 2.

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

AFPS (1993) - Guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique.

Akkar, S. & Bommer, J. J. (2007), Prediction of elastic displacement response spectra in Europe and the Middle East, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(10), 1275-1301, doi: 10.1002/eqe.679.

Ambraseys, N. N. Douglas, J. Sarma, S. K. & Smit, P. M. (2005), Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 3(1):1–53.

Atkinson, G. M., & Boore, D. M. (2003), Empirical ground-motion relations for subduction zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(4), 1703–1729.

Atkinson, G. M. et Sonley, E. (2000), Empirical relationships between modified Mercalli intensity and response spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(2), 537-544.

Baubron J.-C. (1990). Prospection géochimique par analyse des gaz des sols en vue de la localisation d'une fracture majeure sous recouvrement. Faille de Montserrat –Marie-Galante : secteurs de Marie-Galante et de Capesterre-Belle-Eau, Basse Terre (Guadeloupe). Rapport BRGM ANA SGN 90.

Bengoubou-Valerius M., (2008). Contribution à la connaissance de l'aléa sismique dans les Antilles Françaises. Analyse des données sismologiques et accélérométriques régionales. Thèse de Doctorat, Université des Antilles et de la Guyane, 283 pp ;

Berge-Thierry, C., Cotton, F., Scotti, O., Griot-Pommer, D.-A. & Fukushima, Y., (2003), New empirical spectral attenuation laws for moderate European earthquakes, *Journal of Earthquake Engineering*, 7(2), 193-222.

Bertil D. avec la collaboration de M. Bengoubou-Valérius, J. Péricat et S. Auclair (2009) – Scénarios Départementaux de Risque Sismique en Guadeloupe. Rapport BRGM/RP-57488-FR. 88 p., 32 fig. 14 tab. 3 annexes

Bertil D., Roullé A., Mompelat J.M., Auclair S., Bayle E., Bengoubou-Valérius M., Bitri A., Chauvet M., Gehl P., Imbault M., Negulescu C., Samyn K., Vanoudheusden E., Vermeersh F. (2009) – Microzonages sismiques des communes de Baie-Mahault et Lamentin (Guadeloupe). Rapport BRGM/RP-57487-FR. 174pp.

Bertil D., Roussillon P., Bes-de-Berc S. (2006) - Etude préliminaire à la mise en place des Scénarios Départementaux de Risque Sismique en Guadeloupe. Rapport final. Rapport BRGM/RP-55187-FR.

Blès J.L. (1996), Etude de la faille de Houëlbourg au niveau du quartier Trioncelle à Baie-Mahault (Guadeloupe). Rapport BRGM N2360.

Borcherdt, R.D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **60**, 29-61.

Bommer, J. J., Stafford, P. J., Alarcon, J. E. & Akkar, S. (2007), The influence of magnitude range on empirical ground-motion prediction, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(6), 2152-2170, DOI 10.1785/0120070081.

Boore, D. M. & Atkinson, G. M. (2007), Boore-Atkinson NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters, PEER Report 2007/01.

Boudon G., Dagain J., Semet M., Westercamp D. (1988). Carte et notice explicative de la carte géologique du Massif volcanique de la Soufrière (Département de la Guadeloupe, Petites Antilles), échelle 1/20 000, Edit. BRGM, Orléans.

Bour M., Fabriol H., Monge O., avec la collaboration de Sedan O. (2000). XIème CPER Guadeloupe : évaluation des mouvements sismiques locaux à l'échelle régionale (cas du séisme lointain et du comportement linéaire équivalent). Rapport BRGM R40897, 72 p.

Campbell, K. W. & Bozorgnia, Y. (2007), Campbell-Bozorgnia NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters, PEER Report 2007/02.

CDSA (2008) – Base de données du Centre de données sismologique des Antilles (CDSA) (www.seismes-antilles.fr)

Chiou, B. S.-J. & Youngs, R. R. (2006), Chiou and Youngs PEER-NGA empirical ground motion model for the average horizontal component of peak acceleration and pseudo-spectral acceleration for spectral periods of 0.01 to 10 seconds, Interim report for USGS review, June 14 2006 (revised July 10 2006), On Internet at: http://peer.berkeley.edu/lifelines/nga_docs/nov_13_06/Chiou_Youngs_NGA_2006.html

Clément C., Bernard P., avec la collaboration de Viodé J.P., Anténor C., Lépine J.C., Beauducel F. (2001) - Compilation et validation du catalogue de sismicité des Observatoires IPGP des Antilles Françaises. Rapport IPGP pour le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE). 96 p.

Coron S., Feuillard M., Lubart J.M. (1975) – Etudes gravimétriques en Guadeloupe et dans les îles de son archipel Petites-Antilles. *Ann. Geophys*, 31(4) : 531-548.

Costa J.E, Schuster R.L. (1988). The formation and failure of natural dams. *Geological Society of America Bulletin*. 100: 1054-1068.

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.

Davidovici V. (2004) Bâtiments et équipements des PC communaux. Prédiagnostic de la tenue au séisme. Rapport général. Rapport Antilles Etudes / Dynamique Concept pour DDE Guadeloupe . Decembre 2004.

Dorel J. (1978) – Sismicité et structure de l'arc des Petites Antilles et du Bassin Atlantique. Thèse d'état, Univ. Paris VI. 326p.

Douglas, J., Bertil, D., Roullé, A., Dominique, P., Jousset Ph. (2006) - A preliminary investigation of strong-motion data from the French Antilles. *J.Seismol*, 10, pp.271-299.

Dumon A., Bourdon E., Lachassagne P., Ladouche B. (2009) – Caractérisation hydrogéologique du bassin versant de la rivière Pérou à Capesterre-Belle-Eau - Guadeloupe. BRGM/RP-56766-FR. 89.

Dunand F., Mauclaire X., & Martin C. (2007). Etude de la vulnérabilité du patrimoine de la SIG au risque sismique – Harmonisation et synthèse des différentes études. Rapport GEOTER GTR/SIGG/0907-403.

Dunand F., Pfeiffer F., Hauss C., S. Bremond, C. Gomes, Ch Martin & S. Dumoulin (2009). Evaluation de la vulnérabilité sismique du Parc des lycées publics de Guadeloupe en vue de l'élaboration de stratégies de renforcement. Rapport GEOTER-Hauss GTR/CRGU/0109-544. 65p.

Dunand F. (2009) Evaluation et analyse du risque sismique, de la pertinence des renforcements et des priorités d'intervention sur le parc des écoles publiques de Guadeloupe. Etude complémentaire à l'inventaire sismique. Rapport de synthèse. Rapport GEOTER-Hauss 2008.02-02.902.0. 83 p.

EGIS EAU BCEOM (2008), Atlas des zones inondables des cours d'eau de la Basse-Terre par des techniques d'analyse hydrogéomorphologique, Rapport GRI60358G.

Fabriol, H., Garry, G., (2002) Plans de prévention des risques naturels (PPR). Risques sismiques : guide méthodologique. Paris. La documentation française. 112 p. ISBN 2-11-005156-6.

Feuillet N. (2000). Sismotectonique des Petites Antilles. Liaison entre activité sismique et volcanique. Thèse de Doctorat, Université Paris VII, 283 pp ;

Field, E.H., and K.H. Jacob (1995). A comparison and test of various site-response estimation techniques, including that are not reference-site dependent, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **85**, 1127-1143.

Garrabé F. et Andreieff P. (1988). Notice explicative et carte géologique à 1/50 000 de la Grande-Terre. Département de la Guadeloupe. BRGM

GEOMAT Antilles (2009) – Reconnaissances des sols et études géotechniques à Baie-Mahault et au Lamentin. Rapport Geomat pour BRGM n°09-2240-A/MT/MG. 176p.

GEOTER. (2006). Contraintes liées au risque sismique vis-à-vis du patrimoine immobilier de la SIKOA. Rapport GEOTER GTR/SIK/0206-286.

Godefroy P., Mouroux P., Paulin C., Rabier P., Rançon P., Sauret B. (1990), Etude et prévention du risqué sismique aux petites Antilles. Evaluation de l'aléa sismique sur l'archipel de la Guadeloupe : rapport de synthèse. Rap BRGM R30857.

Godefroy P., Mouroux P., Leroi E., Paulin C., Rabier P., Rançon P., Sauret B. (1991) – Etude et prévention du risque sismique aux Petites Antilles. Evaluation de l'aléa sismique sur l'île de la Martinique. Rapport de synthèse. Rapport BRGM/R 33 923.

Grünthal G., Musson R. M. W., Schwarz J., Stucchi M., (1998). European Macroseismic Scale 1998 (EMS98). Cahiers du centre européen de géodynamique et de séismologie, volume 15, Luxembourg.

Hancock J., Watson-Lamprey J., Abrahamson N.A., Bommer J.J., Markatis A., McCoy E., Rishmilla M. (2006) – An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets. *Journal of Earthquake Engineering*, 10, Special Issue 1, 67-89.

Idriss, I. M. (2007), Empirical model for estimating the average horizontal values of pseudo-absolute spectral accelerations generated by crustal earthquakes, volume 1 (sites with $v_{s30}=450$ to 900m/s), Interim report issued for USGS review, January 19 2007.

International Building Code. (2009). International Code Council, Inc.
<http://publicecodes.cyberregs.com/>

Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S. and Sato, H. (1982) - Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. 3rd International Earthquake Microzonation Conference, Seattle, 1319-1330.

Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H., & Fukushima, Y. (2006), A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**(3), 879–897.

Keller E. A. and Pinter N. (1996) Active tectonics: Earthquakes Uplift and Landscapes, Prentice Hall, New Jersey.

Kokusho T. (1980) - Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range. *Soils and foundations*, 20(4):45-60.

Lachet, C., and Bard P.Y (1994). Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique, *J. Phys. Earth*, **42**, 377-397.

Le Brun B., Mompelat J.M., Chauvel F., Leroi E., Monge O., Martin C., Souloumiac R. (1999) – GEMITIS Pointe-à-Pitre – Evaluation et réduction du risque sismique. Annexe 4 : Analyse de vulnérabilité des bâtiments stratégiques et d'habitation collective. BRGM RP-40618-FR.

Le Brun B., Monge O., Bour M. (2001) - XIème Contrat de Plan-Etat-Région Guadeloupe relatif à l'évaluation et la réduction du risque sismique : évaluation de la vulnérabilité des bâtiments : méthodes et résultats. BRGM RP-50500-FR, 19 tabl., 5 ann.

Lermo, J., and F.J. Chávez-García (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **83**, 1574-1594.

Léticée J-L. (2008). Architecture d'une plate-forme carbonate insulaire plio-pléistocène en domaine de marge active (avant-arc des Petites Antilles, Guadeloupe) : chronostratigraphie, sédimentologie et paléoenvironnement. Thèse de doctorat.

Liao, S. and Whitman, R.V. (1986) - Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 112(3), 373-377.

Lilhanand, K. and W. S. Tseng (1988) - Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple damping response spectra, Ninth World Conf. Earth. Engin., Tokyo, Japan, Vol II, 819-824.

Lin, P.-S., & Lee, C.-T. (2008). Ground-motion attenuation relationships for subduction-zone earthquakes in northeastern Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(1), 220–240. doi: 10.1785/0120060002

Martin C. (2001) – Méthodologie d'évaluation du risque sismique de la zone industrielle de Jarry (Guadeloupe). Rapport Géoter GTI/BRG/0701-04. 30 p.

Martin C., Combes Ph., Secanell R., Lignon G., Carbon, D., Fioravanti A, Grellet B. (2002) - Révision du zonage sismique de la France; étude probabiliste. Rapport Geo-TER GTR/MATE/0701-150.

McVerry, G. H., Zhao, J. X., Abrahamson, N. A., & Somerville, P. G. (2006), New Zealand acceleration response spectrum attenuation relations for crustal and subduction zone earthquakes. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, **39**(4).

Modaressi H., Foerster E., Mellal A. (1997) - Computer aided seismic analysis of soils. *Proc. Of the 6th Int Symp. On Numerical Models in Geomechanics*, NUMOG VI, Montréal, Québec, Canada July 2-4.

Mompelat J.-M. et B. Le Brun avec la collaboration de A. Bitri, D. Bertil, C. Lembezat, T. Pirrion, P. Sabourault et J. Vinçon (2003) – Microzonage sismique des communes de Basse-Terre, Saint-Claude, Gourbeyre et Baillif (Guadeloupe). *Rapport BRGM/RP-52198-FR*. 143 pages.

Mompelat J.M. (1994) – Unités cartographiques et évaluation de l'aléa Mouvement de terrain en Guadeloupe (Antilles Françaises), Thèse de doctorat, Université Paris 6, 337p.

Monge O., Vermeersch F., Martin C. (1998) - Microzonage sismique de l'agglomération pontoise: extension aux communes des Aymes et du Gosier et homogénéisation. *Rapport BRGM/RP-39213-FR*. 78 pages.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR of RTR1*, **30**, **1**, 25-32.

NF EN 1998-5 (2005) - Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 5 : Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques (P 06-035-1), AFNOR.

Ordaz, M., A. Aguilar, and J. Arboleda (2003) - Crisis 2003. Program for computing seismic Hazard, Ver. 3.01.

Paulin C. (1988) - Recherche d'eau souterraine dans le Nord Est de la Basse Terre – Guadeloupe – Synthèse des connaissances et interprétation des travaux exécutés de 1983 à 1986. Rapport BRGM 88 GLP 087.

Projet ANR Belle-Plaine – Etude des sols liquéfiables dans des sols liquéfiables dans des conditions réelles ; site pilote et modèles prédictifs (Guadeloupe), n°ANR-06-CATT-003, 2007-2010.

Reynal de Saint Michel A. (1966) – Notice explicative des feuilles de Basse-Terre et des Saintes. Carte géologique du Département de la Guadeloupe, Basse Terre. 1 : 50000. Service de la carte géologique de la France

RISK-UE, 2003. An advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different european towns. Projet européen, EVK4-CT-2000-00014.

RISK-UE, 2006 - Special Issue: Earthquake Scenarios for European Cities - The RISK-UE Project (Guest Editors: Robin Spence and Benoît Le Brun), Bull. of Earthquake Engineering, vol.4, n°4.

Robertson, P.K. (1990) - Soil classification using CPT. Canadian Geotechnical Journal, 27(1), 151-158.

Robertson, P.K., and Wride, C.E. (1998) - Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 35(3), 442-459.

Sedan O., Negulescu C., Fontaine M., Winter T., Terrier-Sedan M., Douglas J., Roullé A., Arnal C., Dewez T. (2006) - Scénario départemental de risque sismique- Zone pilote des Bouches du Rhône - Rapport méthodologique et résultats. Rapport BRGM/RP-54764-FR, 99 p, 57 fig., 3 annexes.

Sedan O. et Terrier M. (2001) – Travaux de reconnaissance pour l'étude de paléosismicité de la faille du May (Guadeloupe) Rapport BRGM/RP 51420 FR

Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1971) - Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division., ASCE, 97(9), 1249-1273.

SISFRANCE (2007) - Base de données SisFrance des séismes historiques (www.sisfrance.net). BRGM, EDF, IRSN

Slemmons D. B. (1977). Faults and earthquakes magnitude, U.S. Army Waterways Experiment Station, Vicksberg, Miss., Misc., Pap. S-73-1, Rep.6, 129pp.

Stephan J.F., Mercier-de-Lépinay B., Calais E., Tardy M., Beck C., Carfantan J.Ch., Olivet J.L., Vila J.M., Bouysse Ph., Mauffret A., Bourgois J., Théry J.M., Tournon J., Blanchet R., Dercourt J. (1990) – Paleogeodynamic maps of the Caribbean : 14 steps from Lias to Present. *Bull. Soc. géol. France*, (8), VI, 6, 915-919, 1 fig., 14 cartes coul. h.t.

Taboada A., Rivera L.A., Fuenzalida A., Cisternas A., Philip H., Bijwaard H., Olaya J., Rivera Cl. (2000) – Geodynamics of the northern Andes: subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, vol. 19, n° 5, pp787-813

Terrier M., Belvaux M., de Michele M., D. Monfort-Climent , Sedan O. (2010) – Failles actives et PPR sismique : analyse en retour, calcul des sur-dommages. Rapport final BRGM/RP -59269-FR, 128p, 76 fig, 7 tab.

Terrier M., coll. Bes-de-Berc S. (2007) - Réalisation d'un zonage sismique de la plaque caraïbe préalable aux choix de scénarios de tsunamis aux Antilles françaises - Rapport BRGM/RP-55376-FR, 77p, 31 fig, 1pl.Ht.

Terrier M., Combes Ph., Carbon D., Grellet B., Sedan O. (2002) – Failles actives et évaluation de l'aléa sismique : Prise en compte des failles actives dans l'aménagement du territoire aux Antilles (Martinique et Guadeloupe). Partie 1 : Identification des systèmes de failles actives dans l'archipel de la Guadeloupe et l'île de la Martinique. *Rapport BRGM/RP-51258-FR*. 118 pages. 30 figures. 8 tableaux. 4 annexes.

Terrier M., Graillat A., Durand F. (1993) Atlas communal des Risques Naturels de la commune de Baie-Mahault. Rapport BRGM R37166 ANT 4S93.

Terrier M., Graillat A., Durand F. (1993) Atlas communal des Risques Naturels de la commune du Lamentin. Rapport BRGM R37167 ANT 4S93.

Valensise G. and Pantosti D. (2001). The investigation of potential earthquake sources in peninsular Italy: a review, *J. of Seismology*, 5, 287-306.

Westercamp D. et Tazieff H. (1980) Martinique, Guadeloupe, Saint-Martin, la Desirade. Guides géologiques régionaux. Masson, Paris.

Westercamp D. (1977), Levés géologiques, évaluation et zonation des risques volcaniques à la soufrière de Guadeloupe F.W.I., Rapport 77ANT29.

Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Liam Finn, W.D., Harder Jr., L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S., Marcuson, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B. and Stokoe, K.H. (2001) - Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(10), 817-833.

Youngs, R. R., Chiou, S.-J., Silva, W. J., & Humphrey, J. R. (1997). Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 58–73.

Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., Somerville, P. G., Fukushima, Y., & Fukushima, Y. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898–913.

Bibliographie Atlas communaux des risques naturels et PPR

ANTEA (2010), Plan de Prévention des risques : Commune de Saint-François. Rapport de présentation.

ANTEA (2010), Plan de Prévention des risques : Commune du Moule. Rapport de présentation.

ANTEA (2008), Plan de Prévention des risques : Commune de Sainte-Anne. Rapport de présentation.

ANTEA (2008) – Mouvements de terrain et inondation – microzonage des risques – secteur des Grands Fonds (Guadeloupe) – Note de présentation générale – Dossier n°A 37824

Baubron J.-C. (1990), Prospection géochimique par analyse des gaz des sols en vue de la localisation d'une fracture majeure sous recouvrement. Faille de Montserrat –Marie-Galante : secteurs de Marie-Galante et de Capesterre-Belle-Eau, Basse Terre (Guadeloupe). Rapport BRGM ANA SGN 90.

BLES J.L. (1991) – Atlas communal des risques naturels – Département de la Guadeloupe – Commune de Sainte-Anne. Rapport R 33807 ANT 4S 91.

BLES J.L. (1991) – Atlas communal des risques naturels – Département de la Guadeloupe – Commune de Saint-François. Rapport R 33808 ANT 4S 91.

BLES (1991) – Atlas communal des risques naturels – Département de la Guadeloupe – Commune du Moule. Rapport R 33809 ANT 4S 91.

Bouysse P. (1983), Données sur la structure de l'arc insulaire des Petites Antilles, entre Sainte-Lucie et Anguilla. Marine Geology, n°53, p. 131-166.

BRGM (1991), Atlas communal des risques naturels : Commune de Sainte-Anne. Rapport R 33807 ANT 4S 91.

BRGM (1991), Atlas communal des risques naturels : Commune de Saint-François. Rapport R 33808 ANT 4S 91.

BRGM (1991), Atlas communal des risques naturels : Commune du Moule. Rapport R 33809 ANT 4S 91.

BRGM (1991), Atlas communal des risques naturels : Commune de Goyave. Rapport R 33811 ANT 4S 91.

Ciron P. (1991) – Atlas communal des risques naturels – Département de la Guadeloupe – Commune de Capesterre-Belle-Eau. Rapport R 33810 ANT 4S 91

Ciron P. (1991) – Atlas communal des risques naturels – Département de la Guadeloupe – Commune de Goyave. Rapport R 33811 ANT 4S 91

Cottez S. (1970), Etude des ressources en eau souterraine de la Grande-Terre : Etude de la plaine de Grippon - Morne à l'Eau. Rapport 70 ANT 014.

Cottez S. (1971), Etude des ressources en eau souterraine de la Grande-Terre : Etude des plateaux de l'Est. Rapport 71 ANT 030.

Cottez S. (1972), Etude des ressources en eau souterraine de la Grande-Terre : Etude des Grands Fonds. Rapport 72 ANT 021.

Dominique P., Monge O., Sedan O. (1997) - Atlas communal des risques naturels – commune de Pointe à Pitre et d'Abymes – Notice générale et principes de cartographie. Rapport BRGM R 39523.

Grellet B. (1988), Cadre général de la tectonique récente de la Guadeloupe. Rapport BRGM 88-SGN-627-GEG.

Grellet B. (1988). Geomorphologie et niveaux marins des îles calcaires de l'archipel de la Guadeloupe. Implications pour l'évaluation de l'aléa sismique à l'échelle régionale et à l'échelle locale. Rapport BRGM 88-SGN-256-GEG.

GEOTER (2005), Plan de prévention des risques météorologiques et géologiques : Commune du Gosier. Rapport de présentation, GTR/DDEG/1207-273 Rev2.

GEOTER (2005), Plan de prévention des risques météorologiques et géologiques : Commune des Abymes. Rapport de présentation, Rapport GTR/DDEG/0406-272 Rev1.

GEOTER (2005) – Mise à jour des PPR des communes des Abymes et du Gosier – Rapport méthodologique. Rapport GTR/DDEG/0406-271 Rev2.

GEOTER (2001). Identification des segments de faille de gosier sur l'emprise du site : Quartier Carenage-Zamia. Rapport GTR/SEMG/0301-142.

IMSRN (2006), Plan de prévention des risques naturels prévisibles : Commune de Goyave. Rapport de présentation.

IMSRN (2006), Plan de prévention des risques naturels prévisibles : Commune de Capesterre Belle-Eau. Rapport de présentation.

IMSRN (2006), Plan de prévention des risques naturels prévisibles : Commune de Trois-Rivières. Rapport de présentation.

IMSRN (2007), Plan de prévention des risques naturels prévisibles : Commune de Morne à l'Eau. Rapport de présentation.

Mompelat J.M. et Vincon J. (2002) – Réalisation de six PPR multi-aléas sur les communes de Baie-Mahault, Saint-Claude, Abymes, Point-à-Pitre et Saint-Martin – Description des travaux réalisés – Rapport BRGM/RP-51639-FR

Mompelat J.M. (1994) – Unités cartographiques et évaluation de l'aléa mouvement de terrain en Guadeloupe (Antilles françaises) – Thèse n° 94-09 – Académie de Paris, Université Pierre et Marie Curie – 321 p

Paulin C. (1984), Inventaire des ressources en eau souterraine dans le Nord Est de la Basse Terre– Résultats de la campagne géophysique par prospection. Rapport BRGM 84-ANT-023.

Préfecture de la Région Guadeloupe – Commune du Moule- Plan de prévention des risques – Note méthodologique sur l'élaboration du PPR de la commune du Moule.

Préfecture de la Région Guadeloupe – Commune du Moule- Plan de prévention des risques – Rapport de présentation.

Préfecture de la Région Guadeloupe (2002) – Commune de Petit-Bourg- Plan de prévention des risques - PPR – Rapport de présentation

Préfecture de la Région Guadeloupe – Commune de Saint-François - Plan de prévention des risques – Note méthodologique sur l'élaboration du PPR de la commune de Saint-François.

Préfecture de la Région Guadeloupe – Commune de Saint-François - Plan de prévention des risques – Rapport de présentation

Préfecture de la Région Guadeloupe (2008) – Commune de Sainte-Anne - Plan de prévention des risques – Rapport de présentation

Sedan O. et Terrier M. (2001) – Travaux de reconnaissance pour l'étude de paléosismicité de la faille du May (Guadeloupe) Rapport BRGM/RP 51420 FR

Sedan O. et Terrier M. (1992) - Atlas communal des risques naturels – Département de la Guadeloupe – Commune de Morne-à-l'Eau. Rapport R 36 377 ANT 4S 92

Terrier M. (1992), Reconnaissance structurale de la tranchée de la déviation de Petit-Bourg (Guadeloupe, Antilles). Rapport BRGM R35893 GEO-SGN-92.

Terrier M., coll. Bes-de-Berc S. (2007) - Réalisation d'un zonage sismique de la plaque caraïbe préalable aux choix de scénarios de tsunamis aux Antilles françaises - Rapport BRGM-RP-55376-FR, 77p, 31fig., 1pl. H.T.

Terrier M., Combes P., coll. D. Carbon, B. Grellet, O. Sedan (2002) - Failles actives et évaluation de l'aléa sismique : Prise en compte des failles actives dans l'aménagement du territoire aux Antilles (Martinique et Guadeloupe). Partie 1 : Identification des systèmes de failles actives dans l'archipel de la Guadeloupe et l'île de la Martinique. Rapport BRGM/RP-51258-FR, 118p., 30 fig, 8 tab, 4 annexes, 2 planches hors texte.

Terrier M., Belvaux M., de Michele M., D. Monfort-Climent, Sedan O. (2010) – Failles actives et PPR sismique : analyse en retour, calcul des sur-dommages. Rapport final BRGM/RP -59269-FR, 128p, 76 fig, 7 tab.

Valensise G. and D. Pantosti (2001). The investigation of potential earthquake sources in peninsular Italy: a review, J. of Seismology, 5, 287-306.



Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction Géologique régionale Guadeloupe

Route de l'observatoire
Le Houélmont

97 113 – Gourbeyre – Guadeloupe

Tél. : 0590.41.35.48



Microzonage sismique des communes de Petit-Bourg, Goyave, Capesterre Belle-Eau, Trois-Rivières, Abymes, Morne-à-l'eau, Gosier, Sainte-Anne, Saint-François, Le Moule (Guadeloupe)

Annexes techniques

BRGM/RP-61405-FR

Annexe 1



Direction Régionale de l'Environnement
GUADELOUPE



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Sommaire

Liste des annexes

Annexe 1 : Mesures géophysique H/V	5
ANNEXE 1.1 : METHODE H/V	5
LES LOCALISATIONS DE L'ENSEMBLE DES MESURES H/V RECUEILLIES ET ACQUISES LORS DE CETTE ETUDE EST MONTREE SUR LES FIGURES 19 ET 20 DU RAPPORT METHODOLOGIQUE BRGM/RP-61405-FR.....	6
ANNEXE 1.3 : RESULTATS DES MESURES H/V	7
Annexe 2 : Mesures géophysiques SASW	9
ANNEXE 2.1 : METHODE SASW	9
LES LOCALISATIONS DE L'ENSEMBLE DES MESURES SASW ACQUISES LORS DE CETTE ETUDE EST MONTREE SUR LES FIGURES 19 ET 20 DU RAPPORT METHODOLOGIQUE BRGM/RP-61405-FR.	12
ANNEXE 2.2 : RESULTATS DES MESURES SASW.....	13

Annexe 1 : Mesures géophysique H/V

Annexe 1.1 : Méthode H/V

De nombreuses techniques théoriques, numériques ou instrumentales ont été développées pour estimer les effets de site lithologiques (par ex. Borchardt, 1970). 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 (Lermo et Chávez-García, 1993). 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 (Nakamura, 1989). Le dispositif expérimental est constitué d'un sismomètre trois composantes et d'une station d'acquisition (Figure 1).

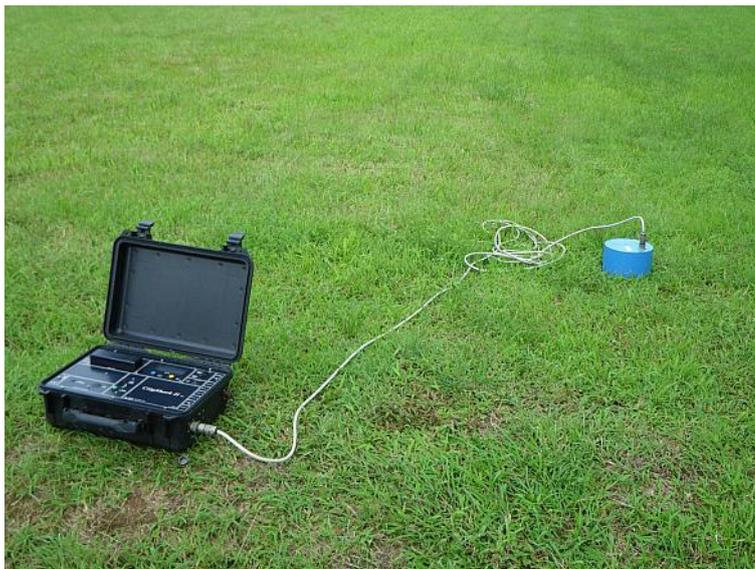


Figure 1 : Dispositif H/V utilisé en Guadeloupe : à gauche : la station d'acquisition CityShark et à droite : le sismomètre tridimensionnel Lennartz 5 secondes.

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 (Lachet et Bard, 1994 ; Field et Jacob, 1995). 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).

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.

Les localisations de l'ensemble des mesures H/V recueillies et acquises lors de cette étude est montrée sur les figures 19 et 20 du rapport méthodologique BRGM/RP-61405-FR.

Annexe 1.3 : Résultats des mesures H/V

Annexe 2 : Mesures géophysiques SASW

Annexe 2.1 : Méthode SASW

Les méthodes basées sur la dispersion des ondes de surface pour la détermination des vitesses des ondes de cisaillements représentent une alternative intéressante par rapport aux méthodes de forages fréquemment utilisées en géotechnique (type cross-hole).

La méthode d'analyse spectrale des ondes de surface (SASW) a été utilisée sur les communes de Baie-Mahault et Lamentin afin de déterminer le profil vertical de vitesse des ondes de cisaillement.

Mise en œuvre

Le matériel nécessaire pour effectuer des mesures sismiques d'ondes de surface est composé de :

- une centrale d'acquisition sismique
- des géophones
- une source impulsionnelle ou vibratoire

Nous avons utilisé pour cette étude une centrale d'acquisition Geode (Geometrics) de 24 traces, et 24 géophones tractables de fréquence propre 10 Hz, associés à une flûte sismique de 48 m. Pour la source nous avons utilisé un marteau de 10 kg. Le déport entre la source et le premier géophone était de 2 m. Le choix de l'espacement des géophones est un compromis entre la résolution spatiale et l'incertitude sur la vitesse de phase. Un petit espacement entre géophones augmente la résolution mais diminue la précision de calcul de vitesse de phase. Pour cette étude, l'espacement entre géophones est fixé à 2 m. Dix tirs espacés de 6 m ont été réalisés pour chaque profil. La distance source-géophone maximale est de 50 m. Deux tirs sismiques enregistrés sur une des bases sont présentés en Figure 2, mettant en évidence des trains d'onde de surface (onde de Rayleigh) marqués.

Dispersion des ondes de surface

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 surfaces contiennent alors de l'information sur les milieux traversés entre la surface et la profondeur maximale de pénétration des différentes modes. En analysant la dispersion de ces ondes, il est donc possible d'obtenir des informations sur les valeurs de paramètres physiques à différentes profondeurs. Les diagrammes de dispersion pour les deux points de tir dans la zone d'étude (Figure 2) sont présentés en Figure 3. Le maximum d'énergie (en rouge) dans le diagramme de dispersion donne les courbes de dispersion. La courbe de dispersion, ainsi que ses barres d'erreurs, sont ensuite extraites du diagramme pour être inversées.

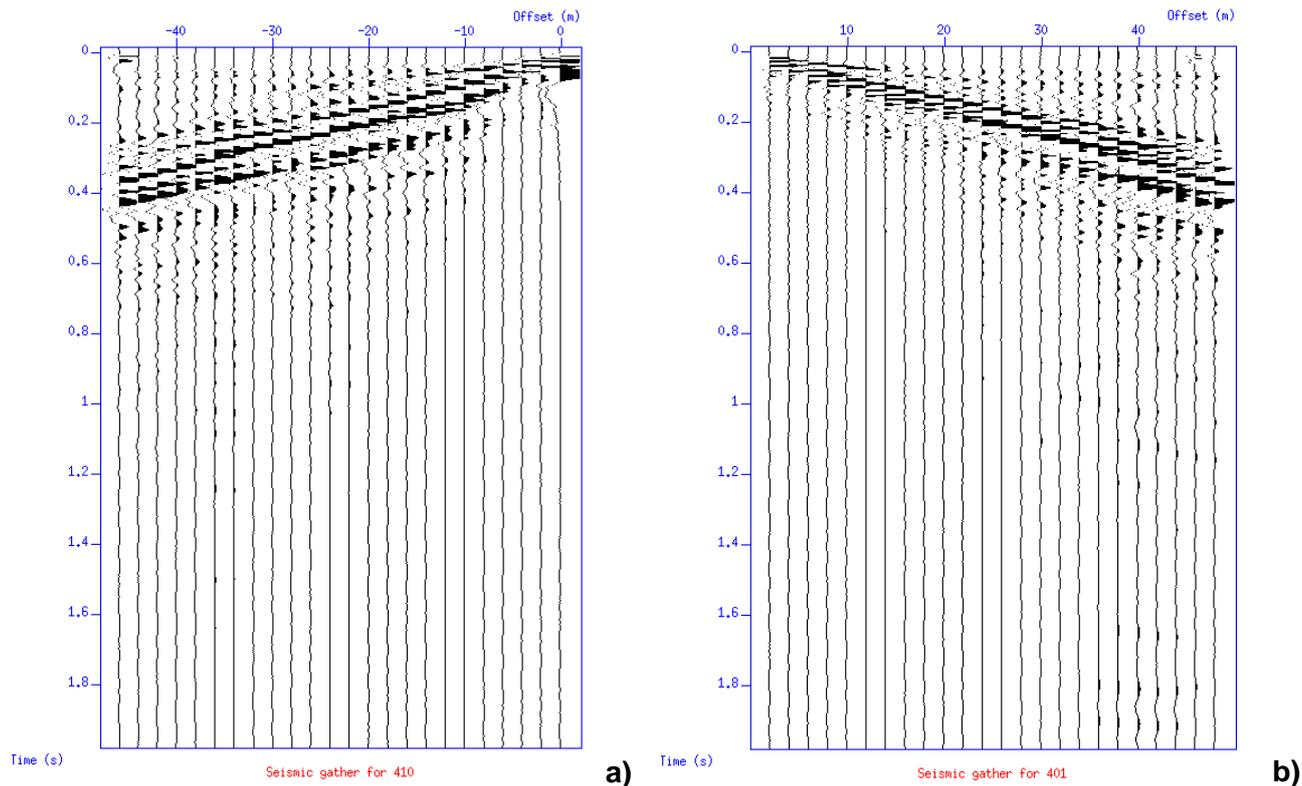


Figure 2 : Exemple de collection de traces issue de deux points de tir enregistrés sur le site 4 a) point de tir à 2m de la trace 24 ; b) point de tir à 6m de la trace 1.

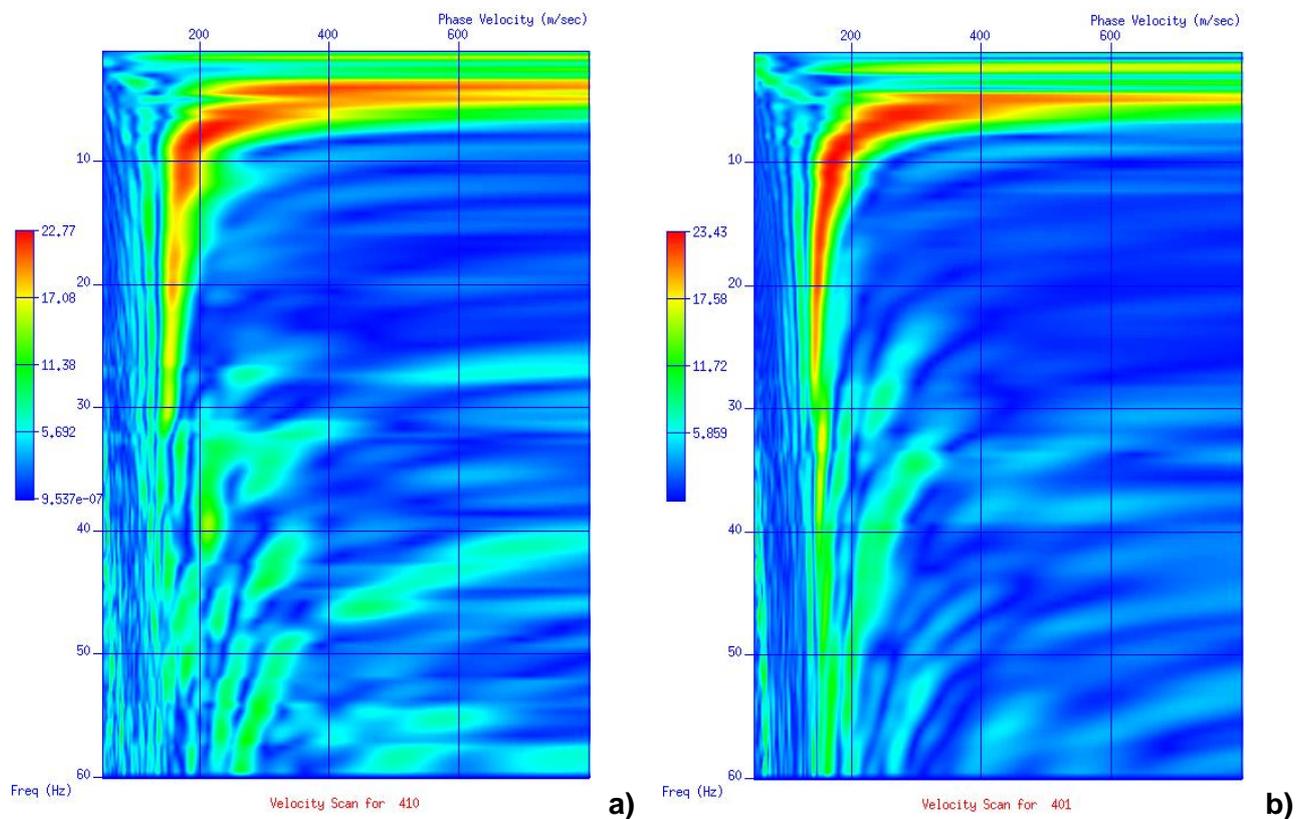


Figure 3 : Diagrammes de dispersion associés aux tirs enregistrés sur le site 4 a) diagramme de tir à 2m de la trace 24 ; b) diagramme de tir à 6m de la trace 1.

Inversion des courbes de dispersion

L'inversion des courbes de dispersion a pour but de retrouver le profil vertical de vitesse des ondes S. Les courbes de dispersion réelle, comparées aux courbes de dispersion synthétiques calculées, à partir d'un modèle *a priori* conduisent à des résidus de vitesse de phase. Le modèle de départ est défini par quatre paramètres : les épaisseurs des couches, leur densité et leur vitesse des ondes P et S. Les vitesses des ondes S et les épaisseurs des couches peuvent être obtenues par inversion de courbes de dispersion. Les vitesses des ondes P peuvent être déterminées par analyse des ondes réfractées et la densité peut être estimée à partir des données géologiques disponibles dans la zone d'étude. Les courbes de dispersion dépendent essentiellement des vitesses des ondes S et des épaisseurs. Par conséquent, une estimation approximative des vitesses des ondes P ou de la densité aura une influence minimale sur la courbe de dispersion. Dans notre étude, les paramètres du modèle initial sont calculés à partir des valeurs de la vitesse de phase. Dans l'hypothèse d'un milieu élastique et d'un coefficient de Poisson de 0.38, les relations suivantes ont été utilisées:

$$V_s = V_{ph} * 1.1 \quad (1)$$

$$V_p = 2.4 * V_s \quad (2)$$

$$\rho = 2.5 - 0.0002 * (4000 - V_p) \quad (3)$$

Pour la profondeur de pénétration des ondes de surface une relation empirique trouvée dans la littérature spécialisée a été utilisée :

$$Z = 0.53 V_{ph} / f \quad (4)$$

avec f la fréquence des ondes de surface.

L'information apportée par les ondes de surface ne permet pas d'inverser simultanément au cours d'une même itération les vitesses et les épaisseurs de couche.

Une méthode inverse linéarisée est utilisée pour obtenir les vitesses des ondes S et les épaisseurs des couches. Au cours des itérations, les vitesses et les épaisseurs des couches sont inversées successivement de façon à ajuster une courbe synthétique de dispersion aux données réelles. Les résultats obtenus montrent un bon accord entre les données et les valeurs calculées (Figure 4).

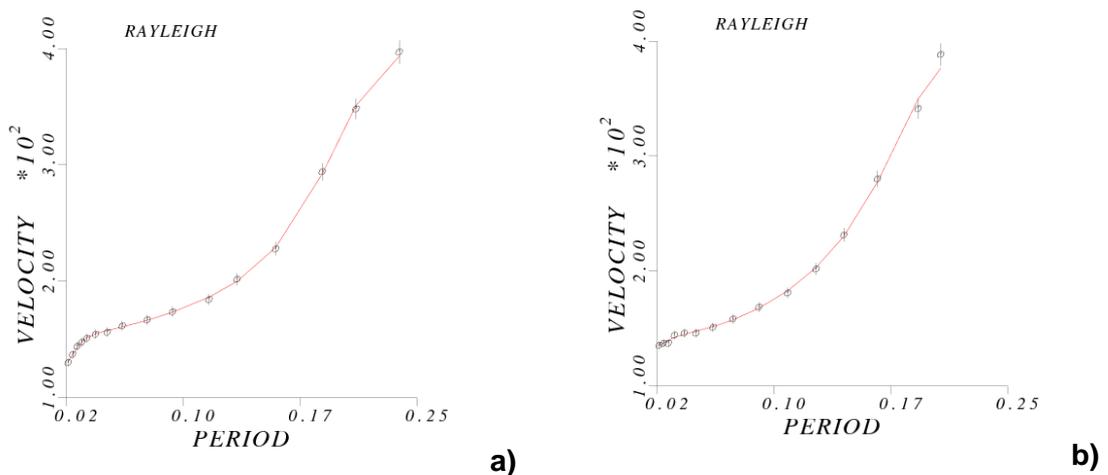


Figure 4 : Courbes de dispersion réelles (cercles et barres d'erreurs associés) et obtenues par inversion (trait continu) a) pour le tir à 2m de la trace 24 ; b) pour le tir à 6m de la trace 1.

Les modèles de vitesse associés à ces courbes de dispersion sont présentés en Figure 4. L'interpolation des courbes $V_s(z)$ pour chacun des tirs du profil permet d'obtenir une section $V_s(x,z)$ représentant les variations de V_s en fonction de la profondeur le long du tracé.

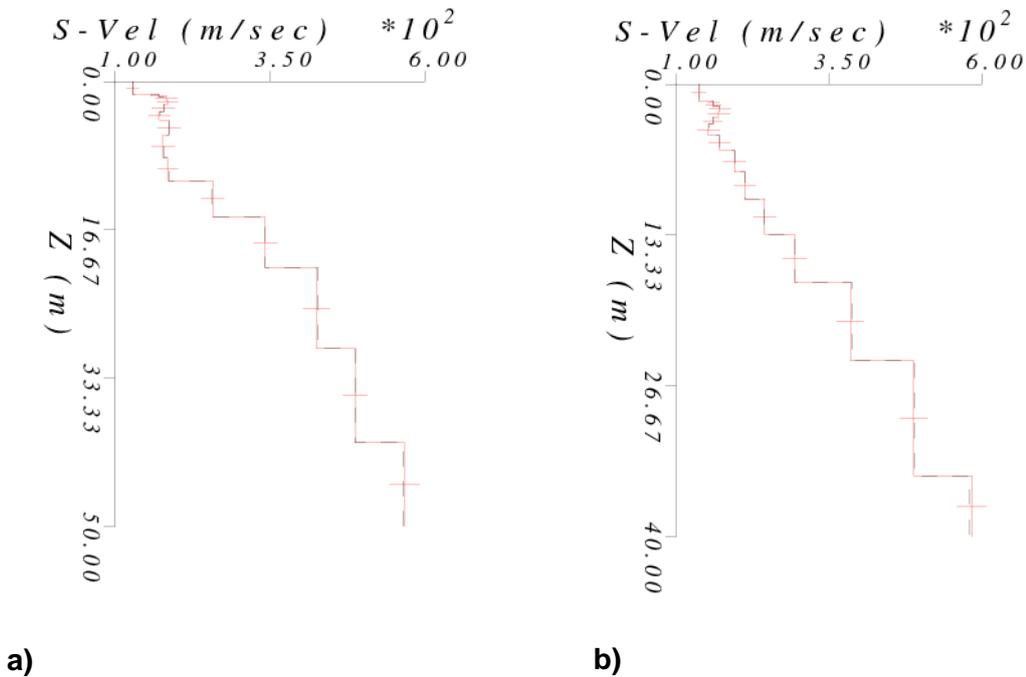


Figure 5 : Modèles de vitesse des ondes S obtenus par inversion des courbes de dispersion a) pour le tir à 2m de la trace 24 ; b) pour le tir à 6m de la trace 1.

Les vitesses des ondes S obtenues par inversion sont caractéristiques de ces formations. L'ensemble des paramètres géotechniques déduits de l'inversion des ondes de surface pour les bases SASW de l'étude sont présentés en résultats sous forme de profils de vitesse $V_s(z)$.

Les localisations de l'ensemble des mesures SASW acquises lors de cette étude est montrée sur les figures 19 et 20 du rapport méthodologique BRGM/RP-61405-FR.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Guadeloupe
SGR/GUA
Morne Houélmont, Route de l'Observatoire
97113 – Gourbeyre
Tél. : 05.90.41.35.48