

Guide méthodologique d'exploitation des microzonages sismiques pour la transcription dans les PPR sismiques aux Antilles françaises

BRGM/RP-64339-FR
Décembre 2020

Guide méthodologique d'exploitation des microzonages sismiques pour la transcription dans les PPR sismiques aux Antilles françaises

BRGM/RP-64339-FR
Décembre 2020

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du
BRGM 2013-2014 (DGPR) et 2020-2021 (DEAL GUADELOUPE)

D. Bertil, M. Belvaux

Vérificateur :

Nom : Nicolas Taillefer

Date : 30 juin 2021



Approbateur :

Nom : Ywenn De La Torre

Date : 01 juillet 2021



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 et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : Microzonage, PPR, Séisme, Méthodologie, Guadeloupe, Martinique.

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

Bertil D., Belvaux M. (2020) - Guide méthodologique d'exploitation des microzonages sismiques pour la transcription dans les PPR sismiques aux Antilles françaises. BRGM/RP-64339-FR, 74 p., 21 fig., 21 tab., 2 annexes.

© BRGM, 2020, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le Ministère de la Transition Écologique (MTE) (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie – MEDDE, au début du projet) a confié au BRGM le soin de transcrire quatre microzonages sismiques des Antilles françaises en Plan de Prévention des Risques Sismiques (PPRS), dans le cadre des programmes de travail 2013 et 2014 du BRGM relatifs à l'acquisition et à la diffusion de la connaissance sur les risques naturels, en appui à la direction générale de la prévention des risques (DGPR). Pour la Guadeloupe, les communes concernées sont Le Gosier et Baie-Mahault et pour la Martinique Fort-de-France et Le François.

Les propositions de PPR sismiques réalisés pour ces communes pilotes à partir des études citées sont produites sous formes de rapports de présentation, règlements et plans de zonage (Belvaux *et al.*, 2014a, 2014b, 2020a et 2020b.). Cet exercice doit servir d'exemple pour les PPRS des autres communes des Antilles françaises. Ces futurs PPRS seront élaborés par les DEAL de Guadeloupe et Martinique.

Afin de faciliter l'exploitation des documents de microzonages sismiques en vue de la mise en place de PPR sismiques aux Antilles françaises, un support technique est fourni aux DEAL de Guadeloupe et de Martinique, sous forme de guide méthodologique. C'est l'objet de ce rapport élaboré dans le cadre des activités de service public du BRGM et du programme de travail 2015 en appui à la DGPR.

En 2020 la DEAL Guadeloupe a sollicité le BRGM pour actualiser et consolider les différents rapports et jeux de données associés à l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Sismiques en Guadeloupe (Baie-Mahault et Gosier). Ce travail a permis de consolider ce rapport méthodologique.

La méthodologie générale de transcriptions des microzonages sismiques en PPRS comporte cinq étapes :

L'étape 1 consiste à rechercher comment est défini le phénomène pour chaque aléa dans le document de microzonage sismique.

L'étape 2 analyse les effets possibles de chaque phénomène sur la construction. En fonction du type de phénomène, cette qualification d'impact peut être directement indiquée dans le document d'étude : par exemple l'aléa liquéfaction lorsque l'évaluation en aléa faible/moyen/fort provient de critères quantitatifs sur l'indice de liquéfaction I_L . Dans d'autres cas, comme l'effet de site lithologique, cette qualification d'impact n'est pas clairement mentionnée. Dans ce cas une étape de transcription (étape 3) est nécessaire.

L'étape 3 consiste à transcrire l'impact évalué en étape 2 en définition de niveau d'aléa selon les spécifications demandées pour un PPR : niveau d'aléa faible, moyen, fort correspondant à un risque de dommage limité à important.

L'étape 4 croise les aléas et indique les principes généraux de prise en compte des niveaux d'aléa dans le plan de zonage réglementaire. Elle définit le niveau des prescriptions que l'on souhaite appliquer.

L'étape 5 décline pour chaque phénomène et en fonction des enjeux la nature des prescriptions, en veillant à ce qu'elles soient cohérentes d'un phénomène à l'autre.

L'analyse du microzonage en vue d'un PPR se termine à l'étape 3. La mise en œuvre du PPR, les concertations et discussions sur les mesures à appliquer ne débutent qu'à l'étape 4.

Les étapes 1 à 4 sont décrites pour les aléas concernés : rupture en surface de faille active, effets de site lithologiques, effets de site topographiques et aléa liquéfaction. Dans ce rapport, elles sont principalement illustrées par les applications de transcription effectuées pour la commune du Gosier en Guadeloupe.

L'objectif de ce guide est d'explicitier le contenu technique des études de microzonage sismique et d'aider à l'analyse pour définir les niveaux d'aléa selon des critères qui sont propres aux PPRS comme par exemple les niveaux d'impact sur les bâtiments pour une période de retour de référence de 475 ans sur laquelle repose la réglementation nationale. Le croisement avec les enjeux exposés et la nature des prescriptions à appliquer (étape 5) forment l'étape finale du PPR mais sortent du cadre de ce guide méthodologique.

Sommaire

1. Introduction.....	11
1.1. CONTEXTE	11
1.2. OBJECTIFS	11
1.3. CONTENU DU RAPPORT	12
2. Principes Généraux	13
2.1. LE CONTENU D'UNE ETUDE DE MICROZONAGE SISMIQUE	13
2.1.1. Rappel de définitions pour l'aléa sismique	13
2.1.2. Plan général d'un rapport de microzonage sismique	15
2.2. TRANSCRIPTION EN PPRS	16
2.2.1. Le contenu d'un PPR sismique	16
2.2.2. Les besoins d'informations sur les aléas de la commune.....	18
2.3. METHODOLOGIE GENERALE D'EXPLOITATION D'UN MICROZONAGE SISMIQUE	19
3. Aléa sismique régional.....	23
3.1. DESCRIPTIONS DE L'ALEA DANS LE MICROZONAGE SISMIQUE	23
3.2. TRANSCRIPTION DANS LE RAPPORT DE PRESENTATION DU PPRS.....	23
4. Failles actives	25
4.1. LES FAILLES ACTIVES.....	25
4.1.1. Définitions liées au phénomène	25
4.1.2. Qualification des failles actives	25
4.2. LA RUPTURE EN SURFACE DE FAILLE ACTIVE	27
4.2.1. Les dommages attendus et la prise en compte dans un PPR sismique	27
4.2.2. La qualification d'aléa en impact	28
4.3. QUALIFICATION DE L'ALEA POUR LE PPR	29
5. Effets de site lithologiques	31
5.1. DESCRIPTIONS DU PHENOMENE DANS LE MICROZONAGE SISMIQUE	31
5.1.1. Une description simplifiée des formations lithologiques qui caractérisent les classes de sol	31
5.1.2. Un zonage des classes de sols.....	32
5.1.3. Les caractéristiques des spectres de réponse pour chaque classe de sol	32
5.1.4. Bilan	35
5.2. QUALIFICATION DE L'ALEA EFFET DE SITE LITHOLOGIQUE.....	35

5.2.1. Quantification de l'effet de site en coefficients d'amplification	35
5.2.2. Coefficients d'amplification et caractérisation des classes de sols en termes de résonance	37
5.2.3. Qualification de l'amplification	38
5.2.4. Qualification de la portance des sols de fondations.....	39
5.3. QUALIFICATION DE L'ALEA POUR LE PPRS.....	40
6. Effets de site topographiques.....	43
6.1. DESCRIPTIONS DU PHENOMENE DANS LE MICROZONAGE SISMIQUE	43
6.2. QUALIFICATION DE L'ALEA EFFET DE SITE TOPOGRAPHIQUE.....	44
6.3. QUALIFICATION DE L'ALEA POUR LE PPRS.....	45
7. Liquéfaction des sols	47
7.1. DESCRIPTIONS DE L'ALEA DANS LE MICROZONAGE SISMIQUE	47
7.1.1. Le phénomène et ses effets.....	47
7.1.2. Documents de référence et niveaux d'étude	47
7.1.3. L'évaluation de l'aléa	49
7.2. QUALIFICATION DE L'ALEA POUR LE PPRS.....	50
8. Croisement des aléas sismiques pour l'établissement de la carte réglementaire	53
8.1. CROISEMENT ENTRE NIVEAU D'ALEA ET CONTRAINTES DE PRESCRIPTIONS.....	53
8.2. CROISEMENT DES ALEAS POUR LA CARTE REGLEMENTAIRE.....	55
8.3. HARMONISATION DES LIMITES DE POLYGONES.....	57
9. Conclusions	61
10. Bibliographie.....	62
Annexe 1 Paragraphes pour l'aléa régional	65
Annexe 2 Qualification des sols à effets de site	71

Liste des figures

Figure 1 : Aléa sismique régional	13
Figure 2 : Aléa sismique local	14
Figure 3 : Les étapes de transcription de l'aléa sismique d'une étude de microzonage vers un PPR sismique	21
Figure 4 : Transcription de l'aléa sismique en niveau d'aléa pour PPRS – Application pour chaque phénomène.....	22
Figure 5 : Recherche des intensités ressenties VI ou plus sur une commune dans la base de données Sisfrance/Antilles (2009).	24
Figure 6 : Systèmes de failles identifiés sur la commune du Gosier (Belvaux et al., 2020a modifié d'après Bengoubou-Valérius et al., 2013).....	27
Figure 7 : Aléa « rupture en surface » identifié sur la commune du Gosier (Belvaux et al., 2020a).....	30
Figure 8 : Zonage spécifique des classes à effets de site lithologiques pour la commune du Gosier, Guadeloupe (Belvaux et al., 2020 modifié d'après Bengoubou-Valerius et al., 2013).	32
Figure 9 : Forme du spectre de réponse élastique en accélération d'après la norme parasismique EC8 référencée NF EN 1998-1.	33
Figure 10 : Spectres de réponse spécifiques proposés pour les différentes classes d'effets de site lithologiques de la commune du Gosier (d'après Bengoubou-Valerius et al., 2013).	34
Figure 11 : Amplifications à partir des spectres de réponse spécifiques (Le Gosier). La classe GT0 représente le spectre au rocher, les classes GT1 à GT4 les spectres pour les autres classes de sols. La ligne verticale pointillée bleu permet d'apprécier l'amplification pour la période spectrale de 0.2 seconde et la ligne verticale pointillée marron pour la période spectrale de 1.0 seconde.	36
Figure 12 : Spectre de réponse des sols et période de résonance de bâtiment. Les immeubles élevés (ou souples) subissent une agression plus forte sur des sols meubles. A l'inverse, les effets de site associés à des sols rigides agressent plus nettement des constructions de faible hauteur.	38
Figure 13 : Principe des effets topographiques.....	43
Figure 14 : Zones susceptibles de présenter un effet de site topographique sur la commune du Gosier (Belvaux et al., 2020a modifié d'après Bengoubou-Valerius et al., 2013).	45
Figure 15 : Cartographie de l'aléa liquéfaction sur la commune de Gosier. (Belvaux et la., 2020a modifié d'après Bengoubou-Valerius et al., 2013).....	52
Figure 16 : Croisement des aléas et plan de zonage PPRS pour la commune du Gosier (Belvaux et al., 2020a - rapport de présentation du PPRS de la commune de Gosier).	56
Figure 17 : Nature des fonds topographiques et des études techniques à la base des cartographies réglementaires proposées dans les PPR pour la commune de Baie-Mahault.	58
Figure 18 : Résultat du croisement des aléas « rupture en surface », « effet de site lithologique » et « liquéfaction » sur une portion de la commune du Gosier. Un nettoyage des polygones de petite surface est nécessaire.....	59
Figure 19 : Exemple de modifications des champs de la couche SIG de la carte réglementaire de Fort-de-France.	60
Figure 20 : Principaux séismes ayant produit des intensités VI ou plus sur la Guadeloupe ou sur la Martinique. L'intensité indiquée entre parenthèse est l'intensité maximale ressentie sur une des deux îles (d'après SisFrance/Antilles, BRGM, 2009).	67

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principe général de règlement d'un PPRS : code de couleur et correspondance avec les niveaux de contraintes et la nature des prescriptions ; exemple du PPR sismique de Gosier (Rapport de présentation RP-64193-FR Tableau 17).	16
Tableau 2 : Application du principe général du règlement de PPR Sismique aux différents aléas ; exemple du PPR sismique de Gosier (Rapport de présentation RP-64193-FR Tableau 16).	17
Tableau 3 : Exemple de principe de réglementation PPRS décliné pour un aléa particulier (ici l'aléa liquéfaction du PPR sismique de Gosier ,rapport de présentation RP-64193-FR Tableau 14)	18
Tableau 4 : Classes de failles actives en fonction de leurs niveaux d'activité et de connaissance (Terrier et al., 2002).	26
Tableau 5 : Classification des sols d'un microzonage sismique avec description simplifiée des types de sol (ici pour la commune du Gosier en Guadeloupe)	31
Tableau 6 : Paramètres des spectres de réponse élastiques par classe d'effets de site lithologiques pour la commune du Gosier (d'après Bengoubou-Valerius et al., 2013).	33
Tableau 7 : Correspondance entre classes d'effets de site lithologiques et les classes de sol EC8 (d'après Bengoubou-Valerius et al., 2013).	34
Tableau 8 : Coefficients d'amplification F_a et F_v pour les classes de sols spécifiques du Gosier, Guadeloupe	37
Tableau 9 : Critères de qualification d'impact de l'amplification lié à l'effet de site lithologique	38
Tableau 10 : Qualification des formations rencontrées sur le territoire du Gosier, en termes d'influence des effets de site.	39
Tableau 11 : Critères de qualification de la portance des sols de fondation.....	39
Tableau 12 : Qualification des formations rencontrées sur le territoire du Gosier, en termes de portance des sols de fondation	40
Tableau 13 : Critères de transcription de la qualification d'effets de site lithologiques en niveaux d'aléa pour le PPRS	41
Tableau 14 : Niveau d'aléa des classes de sols d'effets de site lithologiques de la commune du Gosier, Guadeloupe	41
Tableau 16 : Correspondance de qualification d'aléa liquéfaction dans les études anciennes de microzonage avec une qualification de susceptibilité de liquéfaction	49
Tableau 16 : Association des valeurs d'indice de liquéfaction aux niveaux de probabilité, d'intensité et d'aléa liquéfaction (d'après AFPS, 1993)	50
Tableau 17 : Qualification d'aléa de liquéfaction avec les mesures de prévention et dispositions constructives correspondantes d'après le guide PPR sismique (Fabriol et Garry, 2002).	51
Tableau 18 : Principe proposé pour la détermination des zones du plan de zonage de la commune de Gosier, Guadeloupe (Belvaux et al., 2020a)	54
Tableau 20 : Principaux séismes destructeurs en Guadeloupe (d'après SisFrance/Antilles, BRGM, 2009).	68
Tableau 21 : Principaux séismes destructeurs en Martinique (d'après SisFrance/Antilles, BRGM, 2009).	70

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Depuis le milieu des années 1990, des microzonages sismiques ont été élaborés aux Antilles françaises pour 29 communes (17 en Guadeloupe, 10 en Martinique, 2 dans les îles du Nord).

L'élaboration de Plans de Prévention des Risques Sismiques (PPRS) nécessite de pouvoir prendre en compte les résultats de ces études de microzonages. Cependant la transcription des cartographies d'aléa en PPRS est délicate :

- Les caractéristiques de ces aléas sont quantifiées sous forme de paramètres techniques souvent difficiles à interpréter lorsqu'il s'agit de les confronter aux enjeux exposés et aux moyens d'actions possibles.
- Les Plans de Prévention des Risques Naturels tiennent compte de la multiplicité des risques en dressant un plan de zonage multi-aléas, alors que les microzonages sismiques traitent les phénomènes liés à l'aléa sismique de façon séparée. Il faut donc pouvoir comparer les niveaux d'aléa entre eux pour plusieurs phénomènes possibles sur le même site.

Ainsi pour le passage du domaine technique (microzonage sismique) au domaine réglementaire (PPR sismique), il y a une étape nécessaire de mise en adéquation.

1.2. OBJECTIFS

Le Ministère de la Transition Écologique (MTE) (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie – MEDDE, au début du projet) a confié au BRGM le soin de transcrire quatre microzonages sismiques des Antilles françaises en PPRS, dans le cadre des programmes de travail 2013 et 2014 du BRGM relatifs à l'acquisition et à la diffusion de la connaissance sur les risques naturels, en appui à la direction générale de la prévention des risques (DGPR).

Pour la Guadeloupe, les communes concernées sont : Le Gosier (rapports de microzonage sismique de Bengoubou-Valérius *et al.*, 2012, 2013) et Baie-Mahault (Monge *et al.* 1998, pour Baie-Mahault Est et Bertil *et al.* 2009, pour Baie-Mahault Ouest). Pour la Martinique les communes concernées sont : Fort-de-France (rapport de microzonage sismique de Chassagneux *et al.* 1996) et Le François (Auclair *et al.*, 2011). Les propositions de PPR sismique obtenues pour ces communes pilotes à partir des études citées sont produites, conformément à l'article R.562-3 du code de l'environnement, sous formes de rapports de présentation, règlements et plans de zonage (Belvaux *et al.*, 2020a, 2020b, 2014c et 2014d).

Cet exercice doit servir d'exemple pour les PPRS des autres communes des Antilles françaises. Ces futurs PPRS seront élaborés par les DEAL de Guadeloupe et Martinique. En plus des 4 dossiers PPRS pilotes, un support technique est fourni aux DEAL, sous forme de guide méthodologique, afin de faciliter l'exploitation des documents de microzonages sismiques en vue de la mise en place des futurs PPR sismiques.

En 2020 la DEAL Guadeloupe a sollicité le BRGM pour actualiser et consolider les différents rapports et jeux de données associés à l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Sismiques en Guadeloupe (Baie-Mahault et Gosier). Ce travail a permis de consolider le rapport méthodologique ainsi que les rapports de présentations et réglementaires pour les deux

communes pilotes de Guadeloupe et aussi de fournir au format SIG une mise à jour des bases de données cartographiques associées.

Le présent rapport répond à cet objectif de consolidation et d'actualisation du guide méthodologique à destination de la DEAL de Guadeloupe et de la DEAL Martinique.

1.3. CONTENU DU RAPPORT

Le chapitre 2 rappelle les principes généraux sur les microzonages communaux et sur les PPR sismiques. Il propose une méthodologie d'analyse applicable à l'ensemble des phénomènes étudiés dans un microzonage sismique.

Le chapitre 3 donne quelques explications sur l'aléa régional et les informations qui peuvent être utilisées pour le rapport de présentation du PPRS.

Les chapitres 4 à 7 appliquent la méthodologie à chacun des phénomènes étudiés : failles actives, effets de site lithologiques et topographiques, liquéfaction des sols.

Le chapitre 8 indique les principes de croisement des aléas pour l'obtention du plan de zonage réglementaire.

2. Principes Généraux

2.1. LE CONTENU D'UNE ETUDE DE MICROZONAGE SISMIQUE

2.1.1. Rappel de définitions pour l'aléa sismique

L'**aléa sismique** indique la probabilité d'une action sismique due à la contribution des possibles tremblements de terre (de magnitudes ou intensités différentes) lors d'une période de temps donnée.

La notion d'aléa sismique fait intervenir:

- d'une part, une **grandeur physique quantifiable** (une intensité, une accélération du sol ...);
- d'autre part, une probabilité ou une notion de **période de retour associée** à la grandeur physique.

L'**aléa régional** (Figure 1) ne fait intervenir que la source (le séisme) et ses effets après la propagation des ondes sismiques dans un sous-sol supposé homogène.

L'**aléa local** (Figure 2) traduit l'aggravation du phénomène par **les caractéristiques locales** du sous-sol.

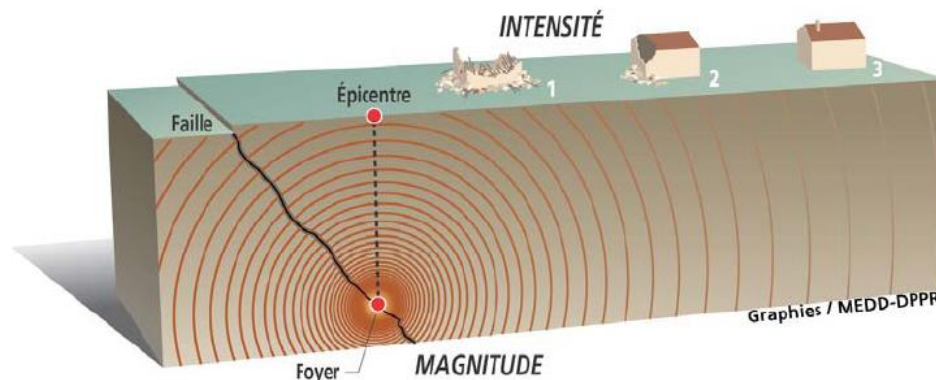


Figure 1 : Aléa sismique régional

Plusieurs effets sont pris en considération :

- les failles tectoniques actives et les **ruptures de surface** qui peuvent leur être associées ;
- les amplifications du mouvement du sol liées à la topographie (**effets de site topographiques**) ;
- les amplifications du mouvement du sol liées à la nature du sous-sol (**effets de site lithologiques**) ;
- le phénomène de **liquéfaction** du sol ;
- les **mouvements de terrain**.

Le **microzonage sismique** est une évaluation quantitative et une cartographie de l'**aléa local** à l'échelle d'une commune ou d'une agglomération urbaine.

Le microzonage intègre donc la notion d'aléa : quantification d'un phénomène physique associé à une période de retour. La période de retour de référence sur laquelle repose la réglementation nationale est 475 ans ou 10% de probabilité de dépassement sur une période de 50 ans. Les paramètres physiques quantifiés ne se résument pas forcément à une variable unique et simple (par exemple, les accélérations du sol, fonction de la fréquence d'oscillation, peuvent être représentées sous forme de spectre de réponse).

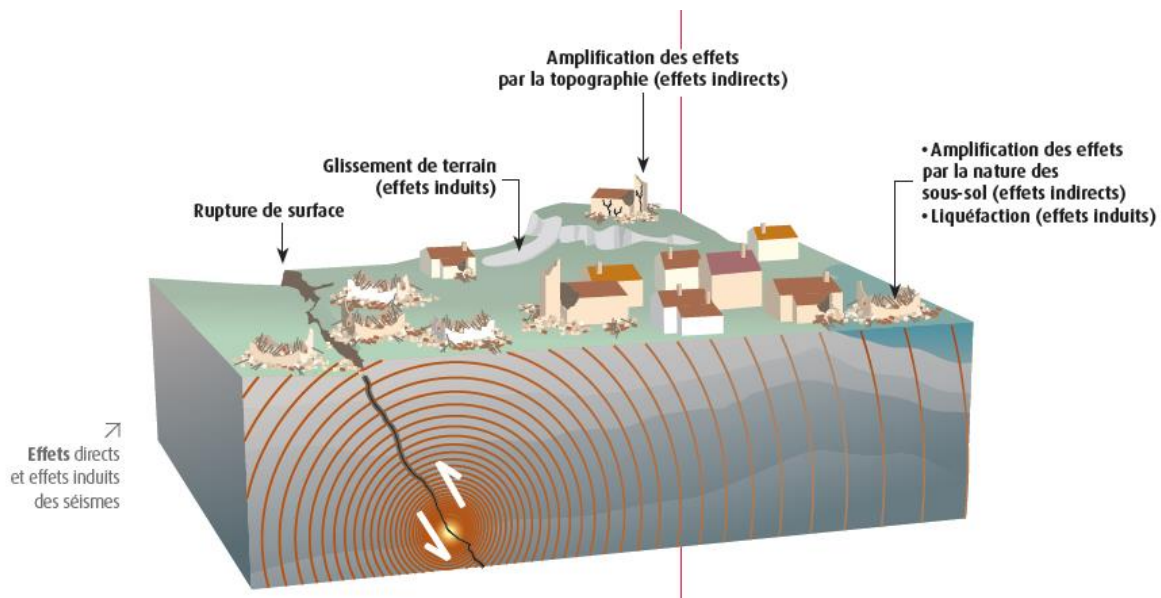


Figure 2 : Aléa sismique local

Dans un microzonage sismique, chaque aléa est analysé de façon séparée, la cartographie multi-aléa n'y est pas du tout traitée.

L'importance qu'on accorde à chaque aléa (en qualifiant par exemple « Aléa Fort, Moyen ou Faible ») n'est déjà plus une analyse physique de l'aléa mais une interprétation par rapport à un enjeu (impact sur un bâtiment) et à une période de retour donnée (un impact pourra par exemple être jugé faible à 475 ans mais fort à 5000 ans). **L'étude physique** d'un aléa sismique s'arrête à sa quantification pour une période de retour donnée.

La **qualification d'un aléa** est dépendante d'un **impact** attendu, donc d'un enjeu. Cela va donc au-delà de la définition d'un aléa et empiète ainsi sur la notion de risque.

Les études de microzonages sismiques sont, la plupart du temps, réalisées en amont de l'élaboration du dossier de PPRS. L'intégration du microzonage sismique dans un PPRS nécessite une qualification d'aléa, alors que parfois l'étude s'arrête à des critères techniques qui ne sont pas adaptés pour ce besoin spécifique. Ce guide permet l'interprétation de ces critères techniques.

Ces notions seront illustrées par la suite dans les chapitres consacrés à chaque phénomène.

2.1.2. Plan général d'un rapport de microzonage sismique

La plupart des études de microzonages sismiques sont structurées en 3 ou 4 parties :

1. aléa régional
2. analyse géologique
3. aléa local pour chaque phénomène
4. scénario de dommages (essentiellement pour quelques études récentes)

Aléa régional

Ce chapitre présente d'abord le contexte géodynamique et sismotectonique régional. Il indique également la sismicité connue, d'abord régionalement puis à l'échelle de la commune. **Cette partie d'un rapport de microzonage peut être reprise dans le rapport de présentation du PPRS.**

Il est suivi d'un paragraphe technique qui définit le mouvement sismique de référence, au rocher, puis le choix des accélérogrammes pour l'analyse des effets de site. Ce niveau de détail n'est pas nécessaire au dossier de PPRS.

Analyse géologique

Il s'agit d'une synthèse de l'état des connaissances de la géologie de proche surface sur la commune, qui est nécessaire notamment pour l'analyse de l'effet de site lithologique et l'aléa liquéfaction. Les formations superficielles, leur mode de dépôt, leur âge y sont décrits. Ces informations sont ensuite croisées avec les données géotechniques et géophysiques pour définir des unités géomécaniques.

Ce niveau de détail n'est pas non plus nécessaire au dossier de PPRS.

Aléa local pour chaque phénomène

Un chapitre décrit chaque phénomène étudié :

- Rupture en surface de faille active
- Effet de site lithologique
- Effet de site topographique
- Aléa liquéfaction

On peut rajouter aussi dans certains cas un chapitre sur l'aléa mouvement de terrain. Celui-ci est étudié indépendamment du déclencheur (séisme, fortes pluies, cyclone...). Il n'est donc pas spécifique à l'aléa sismique et n'est pas introduit, *a priori*, dans un PPR sismique.

Chaque chapitre va donc fournir une évaluation de l'aléa et sa cartographie. Dans certains cas (liquéfaction), la qualification de l'aléa peut être donnée directement. Dans d'autres cas, il faut extraire les informations nécessaires à cette qualification (cf. chapitres suivants).

Chaque chapitre peut exposer quelques principes de la réglementation nationale et des recommandations pour une prise en compte dans les PPR. Ces dernières sont données uniquement à titre indicatif et sont à examiner au cas par cas.

Scénario de dommages

Dans certaines études, les microzonages vont au-delà de l'évaluation de l'aléa sismique local en examinant la vulnérabilité sismique du bâti de catégorie d'importance II (au sens de la réglementation en vigueur) et en proposant une cartographie de l'indice de vulnérabilité par quartiers. Cette analyse est complétée par des scénarios de dommages.

Ces informations sont éventuellement exploitables aussi pour aider à l'élaboration du PPR sismique. Elles sortent néanmoins du cadre de l'aléa sismique et de ce guide méthodologique.

2.2. TRANSCRIPTION EN PPRS

2.2.1. Le contenu d'un PPR sismique

Les recommandations principales pour l'élaboration de PPR sismiques proviennent du guide pour la réalisation des PPR sismiques, publié en 2002 par la DPPR/SDRM (Garry et Fabriol, 2002) et des fiches thématiques du Comité d'Evaluation des PPRS (CEPPRS, 2010).

Conformément à l'article R.562-3 du code de l'environnement, un PPR est composé :

- d'un plan de zonage unique pour tous les aléas sismiques (faille, effets de site, liquéfaction) ;
- d'un rapport de présentation ;
- d'un rapport de règlement.

Les zones du plan de zonage sont définies avec des codes de couleurs qui ont une signification en termes de niveau de contraintes et de nature des prescriptions imposées à une parcelle de terrain, indépendamment des aléas. Le Tableau 1 illustre le principe général de Règlement sur l'exemple du PPRS du Gosier.

Zone	Niveau de contraintes	Nature des prescriptions
Bleu	Contraintes spécifiques moyennes	Zones soumises à prescriptions individuelles moyennes
Bleu clair	Contraintes spécifiques modérées	Zones soumises à prescriptions individuelles modérées
Beige	Contraintes spécifiques faibles	Zones soumises à prescriptions individuelles limitées

Tableau 1 : Principe général de règlement d'un PPRS : code de couleur et correspondance avec les niveaux de contraintes et la nature des prescriptions ; exemple du PPR sismique de Gosier (Rapport de présentation RP-64193-FR Tableau 17).

Les codes de couleurs et leur signification sont en cours d'harmonisation au niveau national. Il existe des variantes en fonction des départements et des impératifs de cohérences avec les PPR multi-aléas en vigueur.

Une première étape de l'élaboration du PPRS consiste à :

- examiner séparément chaque composante de l'aléa sismique (rupture de faille en surface, effets de site lithologiques, effets de site topographiques, liquéfaction).
- examiner si le phénomène est présent ou non sur le territoire de la commune. S'il est présent : indiquer, en les cartographiant, les niveaux d'aléa possibles sur le territoire.
- associer, à chaque niveau d'aléa, un code de couleur pour permettre de définir le niveau de contraintes ou la nature des prescriptions.

Un exemple est illustré sur le Tableau 2, également extrait du dossier PPRS du Gosier (RP-64193-FR – Rapport de présentation). Le passage d'un zonage d'aléa à un zonage réglementaire passe par une qualification d'aléa (faible, moyen, fort).

Enjeux	Phénomène naturel	Type d'aléa	Niveau de contrainte	Zone
tous	rupture de faille	aléa faible	courante	non coloré
		aléa moyen	moyenne	bleu
	effets de site lithologique	aléa nul	non présent	non présent
		aléa faible (GT4)	faible	beige
		aléa moyen (GT1, GT2, GT3)	moyenne	bleu
	effets de site topographique	zones susceptibles	courante	non coloré
	liquéfaction	aléa faible	modérée	bleu clair
		aléa moyen	moyenne	bleu
		aléa fort	moyenne	bleu

Tableau 2 : Application du principe général du règlement de PPR Sismique aux différents aléas ; exemple du PPR sismique de Gosier (Rapport de présentation RP-64193-FR Tableau 16).

Le code rouge (zone inconstructible) ne s'applique pas aux effets directs d'un séisme, car il est techniquement possible de construire en zone d'aléa sismique fort. Par contre l'interdiction de construire peut se discuter dans les zones d'aléa fort relatif aux effets induits (mouvements de terrain et liquéfaction). Si cette interdiction se justifie pour l'aléa de mouvement de terrain, elle est discutable pour la liquéfaction dans la mesure où les règles de construction parasismique prennent en compte ce phénomène. Toutefois, il peut y avoir des volontés de recommander ou de prescrire dans certains secteurs des opérations préalables à leur aménagement.

Enfin la nature des prescriptions est déclinée pour chaque phénomène naturel en règlements spécifiques qui dépendent non seulement du niveau d'aléa mais aussi des enjeux exposés.

Niveau d'aléa liquéfaction	Niveaux d'enjeux	Catégorie d'importance du bâtiment			
		I	II	III	IV

			maisons individuelles	autres		
Faible	tous	-	Avis géotechnique recommandé	étude G1-PGC, complétée par d'autres moyens (type CPTu) en vue de vérifier la présence ou non de sols liquéfiables		
Moyen / Fort	tous	-	une étude G2-AVP suivie d'une G2-PRO			

Tableau 3 ci-dessous illustre un exemple de Principe de réglementation pour l'aléa liquéfaction. Les enjeux sont représentés sous forme d'un tableau à double entrée : l'occupation des sols du Plan Local d'Urbanisme en lignes et la catégorie d'importance du bâtiment en colonnes. La nature de la prescription résulte du croisement du niveau d'aléa (faible, moyen, fort) avec l'enjeu exposé.

Niveau d'aléa liquéfaction	Niveaux d'enjeux	Catégorie d'importance du bâtiment				
		I	II		III	IV
			maisons individuelles	autres		
Faible	tous	-	Avis géotechnique recommandé	étude G1-PGC, complétée par d'autres moyens (type CPTu) en vue de vérifier la présence ou non de sols liquéfiables		
Moyen / Fort	tous	-	une étude G2-AVP suivie d'une G2-PRO			

Tableau 3 : Exemple de principe de réglementation PPRS décliné pour un aléa particulier (ici l'aléa liquéfaction du PPR sismique de Gosier, rapport de présentation RP-64193-FR Tableau 14)

2.2.2. Les besoins d'informations sur les aléas de la commune

Pour appliquer un principe général de réglementation du PPRS (Tableau 1) et le décliner en prescriptions adaptées à chaque aléa (Tableau 2, Tableau 3), on est donc amené à définir un « niveau d'aléa » qualifié de faible, moyen ou fort. **C'est cette information de « niveau d'aléa » qu'on cherche à extraire d'une étude de microzonage sismique.**

Premièrement, il convient de noter que ce terme de « niveau d'aléa » affiché dans les PPR est ambigu. Il est important de bien maîtriser sa signification par rapport aux définitions rappelées au paragraphe 2.1.1.

Les définitions de niveau d'aléa sont généralement données dans un PPR de la façon suivante (PPR multi-aléas de Martinique, 2013) :

Niveau d'Aléa Fort : Les risques de dommages y sont très redoutables. En général, il n'existe pas de mesures de protection efficaces et économiquement opportunes en dehors d'un aménagement de toute une zone concernée par l'aléa.

Niveau d'Aléa Moyen : Il concerne des zones qui peuvent être le siège de manifestations physiques encore très dommageables notamment en raison de la constitution de leur sous-sol. Il existe cependant des mesures de nature à prévenir les conséquences du risque où à les rendre supportables à l'égard des biens et activités futurs.

Niveau d'Aléa Faible : Les risques de dommages y sont limités.

Ce **niveau d'aléa** ne se rapporte pas forcément à la qualification de l'ampleur d'un phénomène mais se rapporte à la **qualification de l'ampleur de son impact sur un enjeu**, ce qui n'est pas du tout la même chose.

Cette définition se rapporte ainsi plus à une notion de **risque** que d'aléa, d'où une certaine ambiguïté.

Pour la transcription d'un microzonage sismique vers un PPRS, le besoin est de transformer un **aléa quantitatif** étudié indépendamment des enjeux en **niveau d'aléa** qualitatif qui s'applique à un enjeu particulier. Le terme « **niveau d'impact** » serait plus approprié et rappelle bien qu'il s'agit ici d'une qualification relative à un objectif et un usage précis (ici un PPR sismique et les conséquences d'un séisme sur le bâti).

Deuxièmement, il convient de bien interpréter au cas par cas cette notion d'aléa faible, moyen ou fort.

Par exemple, un aléa faible « effet de site lithologique » ne signifie pas forcément que le niveau de la secousse est faible. Les Antilles françaises se situent réglementairement en « zone de sismicité forte » avec une accélération maximale horizontale fixée à 0,3 g (**soit 3 m/s²**). La secousse est donc forte, avec ou sans effet de site.

Un aléa faible « effet de site lithologique » signifie que l'**impact supplémentaire** dû à l'amplification de la secousse liée à la configuration du sol est **faible**.

Finalement, cette notion de niveau d'aléa répond au besoin de pouvoir comparer les impacts relatifs des phénomènes naturels entre eux pour une meilleure définition de la nature des prescriptions. Il faut que ces critères de niveau d'impact de l'aléa soient compatibles entre eux en termes de niveau de contraintes et de nature des prescriptions à imposer.

Le besoin, pour la transcription en PPRS, est donc de définir les niveaux d'aléa pour chaque aléa présent sur le territoire en maîtrisant bien cette notion particulière spécifique au PPRS mais qui n'est pas fournie directement par un microzonage sismique.

2.3. METHODOLOGIE GENERALE D'EXPLOITATION D'UN MICROZONAGE SISMIQUE

Compte tenu des explications des paragraphes précédents, on peut résumer le passage de l'aléa sismique à la transcription en Plan de Prévention des Risques Sismiques en 5 étapes comme illustré sur la Figure 3.

L'étape 1 consiste à rechercher comment est défini le phénomène pour chaque aléa dans le document de microzonage sismique.

L'étape 2 analyse les effets possibles de chaque phénomène sur la construction. En fonction du type de phénomène cette qualification d'impact peut être directement indiquée dans le document d'étude : par exemple l'aléa liquéfaction lorsque l'évaluation en aléa faible/moyen/fort provient de critères quantitatifs sur l'indice de liquéfaction IL; (cf. paragraphe 7). Dans d'autres cas, comme l'effet de site lithologique, cette qualification d'impact n'est pas clairement mentionnée. Dans ce cas une étape de transcription est nécessaire (étape 3). Elle est expliquée au paragraphe 5.

L'étape 3 consiste à transcrire l'impact évalué en étape 2 en définition de niveau d'aléa selon les spécifications demandées pour un PPR : niveau d'aléa faible, moyen fort correspondant à un risque de dommage limité à important.

L'étape 4 croise les aléas et indique les principes généraux de prise en compte des niveaux d'aléa dans le plan de zonage réglementaire. Elle définit le niveau des prescriptions que l'on souhaite appliquer.

L'étape 5 décline pour chaque phénomène et en fonction des enjeux la nature des prescriptions, en veillant à ce qu'elles soient cohérentes d'un phénomène à l'autre.

Le passage de l'étape 3 à 4 est une transition importante puisqu'on sort du cadre de l'évaluation technique d'un aléa et de sa qualification pour passer aux actions de prévention possibles face à ces aléas. **L'analyse du microzonage en vue d'un PPRS se termine à l'étape 3. La mise en œuvre du PPRS, les concertations et discussions sur les mesures à appliquer ne débutent qu'à l'étape 4.**

La Figure 4 traduit les étapes 1 à 3 pour chaque phénomène. L'explication détaillée est donnée dans les paragraphes 4, 5, 6, 7 consacrés à chaque phénomène. Dans chaque paragraphe, on indiquera systématiquement l'étape d'analyse telle qu'elle est définie dans la Figure 4.

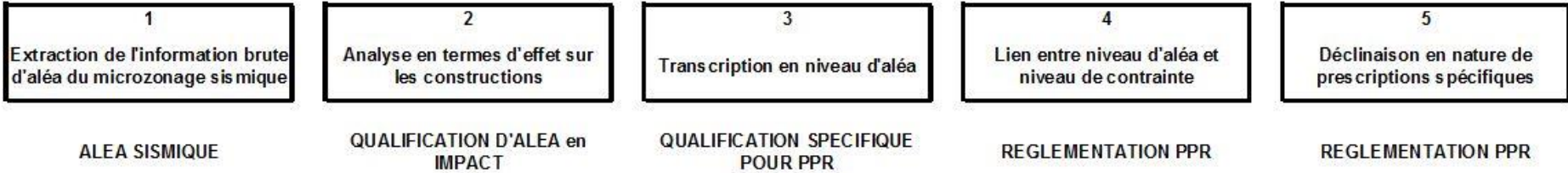


Figure 3 : Les étapes de transcription de l'aléa sismique d'une étude de microzonage vers un PPR sismique

	1 Extraction de l'information brute d'aléa du microzonage sismique	2 Analyse en terme d'effet sur les constructions	3 Transcription en niveau d'aléa
	ALEA SISMIQUE	QUALIFICATION D'ALEA EN IMPACT	QUALIFICATION SPECIFIQUE POUR PPR
Effet topographique	Quantification d'un paramètre amplification forfaitaire Tau	Tau=1 pas d'effet topo Tau>1 effet possible	aléa nul Tau =1 aléa faible Tau >1
Effet lithologique	Description lithologique simplifiée VS ₃₀ Paramètres de sol pour spectre de réponse : RA, RM, T _B , T _C , T _D	Amplification Fa bâtiment faible hauteur/rigide Amplification Fv bâtiment grande hauteur/souple Portance des sols de fondations Qualification des sols pour guide CPMI	aléa nul = rocher aléa moyen = Fa fort ou Fv fort ou portance faible à moyenne aléa faible = autres cas
Faille active	Analyse de l'activité et de la connaissance des failles classement en catégorie 1, 2, 3	Déplacement différentiel attendu en surface	Classe: aléa négligeable = 1, 2A, 3A aléa faible = 2C, 2B aléa moyen = 3C, 3B
Liquéfaction	Quantification d'un indice de liquéfaction I _L impact sur une colonne de sol	Critères sur I _L I _L =0 aléa nul I _L 0-5 aléa faible I _L 5-15 aléa moyen I _L >15 aléa fort	Critères sur I _L aléa nul I _L =0 aléa faible I _L 0-5 aléa moyen I _L 5-15 aléa fort I _L >15

Figure 4 : Transcription de l'aléa sismique en niveau d'aléa pour PPRS – Application pour chaque phénomène.

3. Aléa sismique régional

L'aléa sismique régional n'est pas utilisé pour définir des niveaux de contraintes ou des natures de prescriptions dans le PPRS.

Il sert d'une part à rappeler les prescriptions générales données par la réglementation nationale à appliquer au niveau de la commune. **Toutes les communes des Antilles françaises sont situées dans une « zone de sismicité forte » (zone 5) au sens de la réglementation en vigueur dans laquelle les accélérations de référence sont égales à 0,3 g ou 3 m/s².**

D'autre part, il permet de resituer la commune dans son contexte sismotectonique.

3.1. DESCRIPTIONS DE L'ALEA DANS LE MICROZONAGE SISMIQUE

Dans un rapport d'étude de microzonage sismique, les informations concernant l'aléa régional peuvent être réparties dans deux sous-chapitres :

- Contexte sismotectonique
- Mouvement de référence au rocher

La description du mouvement de référence au rocher n'est pas utile pour un PPRS en dehors de la définition du spectre de réponse au rocher. Il s'agit d'informations et de justifications techniques qui servent aux évaluations d'effets de site et de spectres de réponse. Ce niveau de détail n'a pas à être repris pour un dossier de PPRS.

Le chapitre de contexte sismotectonique décrit :

- Le cadre géodynamique global
- L'arc des Petites Antilles
- La sismicité au niveau du département

Ces informations sont utiles pour alimenter le rapport de présentation du PPRS en particulier le chapitre « Principaux séismes connus ». Dans le cadre de la mise en œuvre de ces transcriptions Microzonage/PPRS pour Fort-de-France, Le François, Le Gosier, Baie-Mahault, des paragraphes-types ont été écrits pour la Martinique et la Guadeloupe. Ils sont retranscrits en Annexe 1.

3.2. TRANSCRIPTION DANS LE RAPPORT DE PRESENTATION DU PPRS

La Figure 20 de l'Annexe 1 présentant les épicentres des principaux séismes destructeurs en Guadeloupe et Martinique peut être reprise sans modification d'un département à l'autre.

Le Tableau 19 pour la Guadeloupe et le Tableau 20 pour la Martinique, dans l'Annexe 1, listent les principaux séismes ayant provoqué des dommages dans ces îles (Intensités macrosismiques VI ou plus). Ces tableaux proviennent de la base Sisfrance/Antilles (BRGM, 2009) et doivent être actualisés en cas de nouveaux séismes destructeurs.

Un exemple de paragraphe « Principaux Séismes connus » est reproduit en Annexe 1. Il se termine par un récapitulatif de quelques lignes sur les séismes qui ont affecté la commune (lignes surlignées en jaune dans l'Annexe 1). Ces lignes sont donc à adapter pour chaque commune.

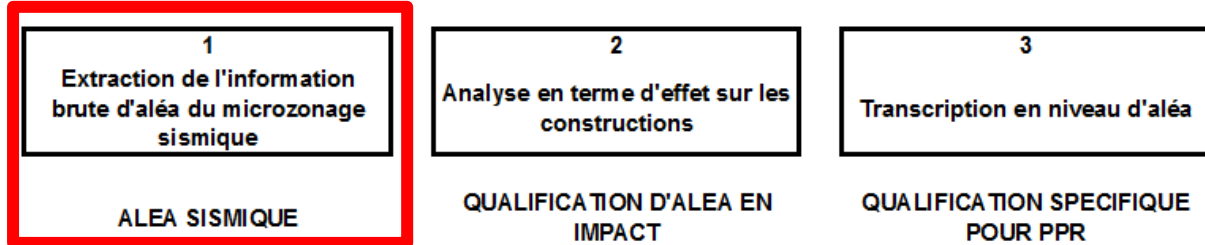
Pour cela, il est recommandé de consulter le site internet <https://sisfrance.irsn.fr/Antilles/donnees-seisme--> et de sélectionner les critères désirés (Figure 5).

The screenshot displays the 'SisFrance' website interface. At the top, there is a header with the BRGM logo and the text 'SisFrance : séismes ressentis dans un département ou une commune'. Below the header, there is a navigation menu on the left with options like 'Présentation', 'Définitions', 'Contexte', 'Catalogue des séismes', 'Droits d'usage', 'Accueil', 'Liens', 'Aide', and 'Contact / FAQ'. The main content area contains search filters: 'Limites d'utilisation des données', 'A partir de l'année (facultatif)', 'Jusqu'à l'année (facultatif)', 'Avec une intensité macrosismique minimum (facultatif)' (set to 6.0: Légers dommages), 'Avec une intensité macrosismique maximum (facultatif)', 'Département' (set to GUADELOUPE - (971)), and 'Commune' (set to LE GOSIER (971)). A 'Validez votre sélection avec le bouton ci-dessous' button is visible. At the bottom, there is a 'Documents' section and a footer with 'Source : BRGM / sisfrance-Antilles' and 'Date de dernière mise à jour : 01/01/2010'.

Figure 5 : Recherche des intensités ressenties VI ou plus sur une commune dans la base de données Sisfrance/Antilles (2009).

4. Failles actives

4.1. LES FAILLES ACTIVES



4.1.1. Définitions liées au phénomène

Généralement, une **faille** est considérée **active** si elle a subi des mouvements 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 35 000 dernières années ou qui ont joué plusieurs fois dans les 500 000 dernières années.

Parmi les failles actives, on distingue :

- les failles actives asismiques : Le mouvement sur la faille est initié très lentement 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 celles susceptibles de générer une rupture du plan jusqu'en surface du sol, et de fait donner lieu à un séisme de très forte magnitude.

Lorsque la rupture sismique se propage jusqu'à la surface du sol, on parle de **déformation co-sismique du sol** ; cette déformation est alors caractérisée par une valeur de déplacement du sol au niveau du plan de faille actif ainsi que par la direction et le sens de ce déplacement (normal, inverse, décrochant, composite).

L'**aléa rupture en surface** est donc représenté par une valeur quantitative de déplacement du sol en surface, liée à une rupture le long d'une faille active, et associée à une probabilité d'occurrence (ici pour les PPR la période de retour associée à cette probabilité est de 475 ans).

4.1.2. Qualification des failles actives

Peu d'études de microzonages sismiques traitent ou étudient l'aléa rupture en surface de faille. L'état de connaissance est, le plus souvent, insuffisant. Les autres études qui traitent des failles actives donnent :

- une cartographie des failles ;
- une qualification de niveau d'activité (à partir d'indices néotectoniques, de croisement avec la sismicité historique et instrumentale...)

- une magnitude maximale possible (à partir de la longueur maximale de la faille ou du segment de faille).

Les études BRGM de ces dernières années aux Antilles françaises ont « normalisé » la qualification de niveau d'activité en **catégorie de faille** (catégorie de faille 1, 2, 3) et en qualifiant également le **niveau de connaissance** A, B, C suivant une démarche de classification décrite par Terrier *et al.* (2002).

Trois catégories d'activité sont définies dans le rapport de Terrier *et al.* (2002) :

- **Catégorie 3 – niveau d'activité élevé**: faille sismogène, active, de longueur supérieure à 5 km ;
- **Catégorie 2 – niveau d'activité moyen**: faille sismogène, moyennement active, de longueur supérieure à 5 km, ou faille secondaire d'une faille principale sismogène active (le jeu de la faille principale pouvant entraîner le mouvement sur la faille secondaire) ;
- **Catégorie 1 – niveau d'activité faible**: faille peu active ou de longueur inférieure à 5 km.

A chacune de ces catégories est affecté un des niveaux de connaissance suivants :

- **Niveau C** : bon niveau de connaissance régionale, information correspondant à des observations directes de la déformation.
- **Niveau B** : connaissance régionale moyenne, information déduite d'une interprétation régionale basée sur des observations indirectes de la déformation et bien renseignées.
- **Niveau A** : connaissance régionale médiocre, information déduite d'une interprétation régionale.

Le Tableau 4 résume les différents cas possibles.

			Niveau de connaissance		
			bon	moyen	faible
			C	B	A
Niveau d'activité	Elevé	3	Classe 3C	Classe 3B	Classe 3A
	Moyen	2	Classe 2C	Classe 2B	Classe 2A
	Faible	1	Classe 1C	Classe 1B	Classe 1A

Tableau 4 : Classes de failles actives en fonction de leurs niveaux d'activité et de connaissance (Terrier *et al.*, 2002).

Les microzonages sismiques récents de communes en Guadeloupe (Bengoubou-Valérius *et al.*, 2012) cartographient les failles actives présentes sur les communes et reprennent ce système de classification. Un exemple pour la commune du Gosier est illustré sur la Figure 6.

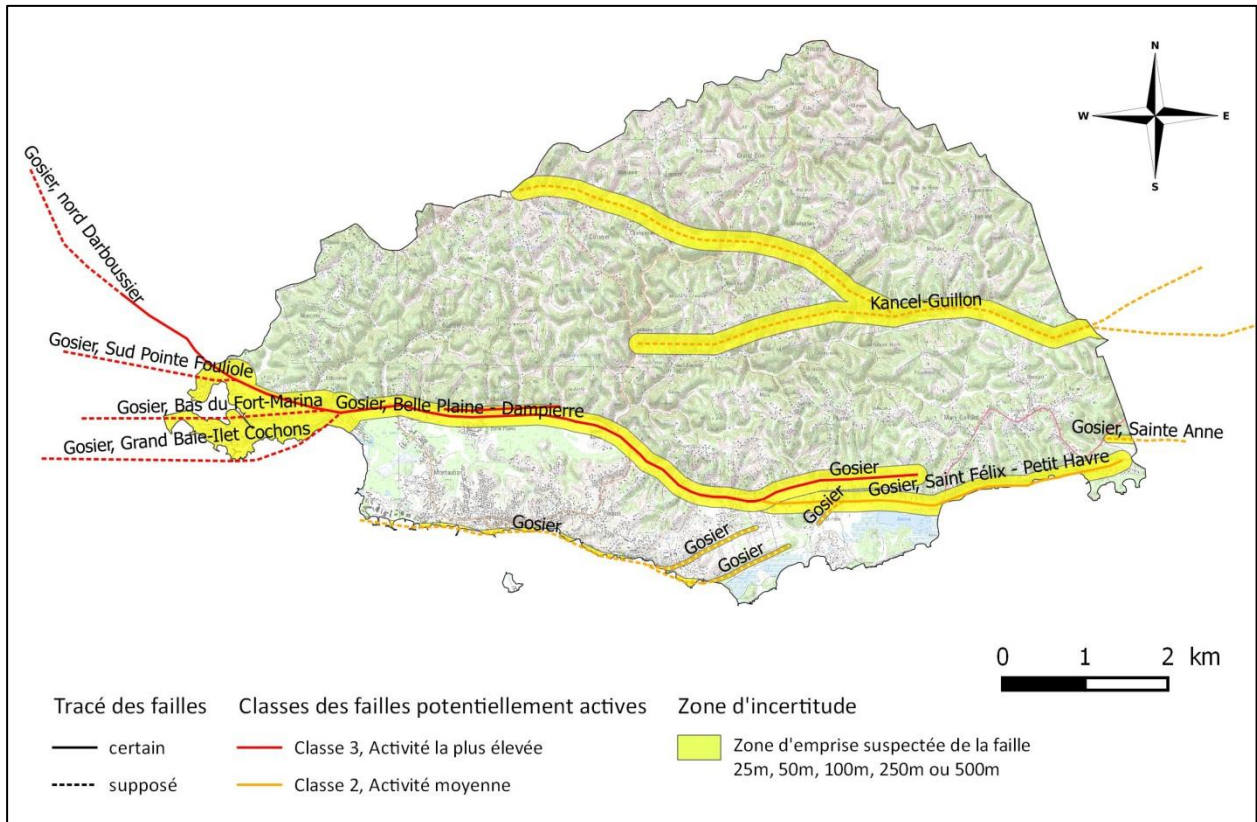
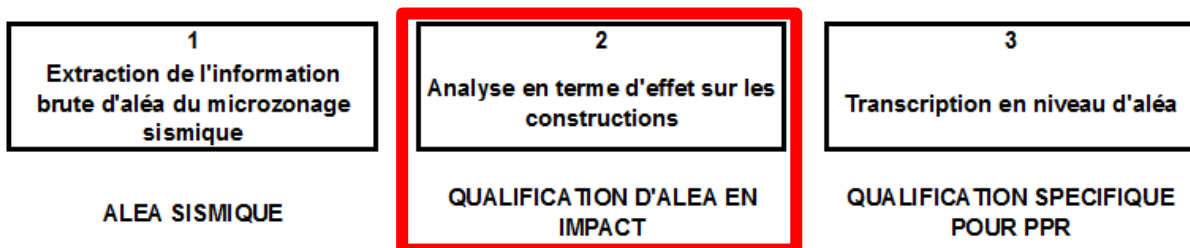


Figure 6 : Systèmes de failles identifiés sur la commune du Gosier (Belvaux et al., 2020a modifié d'après Bengoubou-Valérius et al., 2013).

4.2. LA RUPTURE EN SURFACE DE FAILLE ACTIVE



4.2.1. Les dommages attendus et la prise en compte dans un PPR sismique

Cet aléa concerne donc les déplacements induits en surface le long de la ligne de rupture lors de séismes. Les bâtiments et infrastructures construits sur la faille, en plus de subir de fortes accélérations du sol, seront fortement affectés par ces déplacements en surface.

Dans le cadre d'une étude pour le Ministère de l'Environnement, Terrier *et al.* (2010) font une analyse en retour de séismes majeurs ayant produit des ruptures en surface du sol dans le monde.

De cette étude, il en ressort que :

- les destructions généralisées du bâtiment sont dues à des décalages de failles d'ordre plurimétrique ;
- l'intensité des dommages est variable en fonction du type de mouvement de la faille ;
- certaines constructions ont donné lieu à une déviation des contraintes autour de la rupture, suffisante pour engendrer un contournement du bâtiment par la fracture ;
- l'intensité des dommages est fonction de la structure du bâtiment et des matériaux utilisés (vulnérabilité).

Les exemples de **destructions totales du bâtiment du fait de la rupture en surface concernant des décalages supérieurs au mètre**, provoqués par des séismes de magnitude au moins égale à 7,0. Or, au niveau des Antilles françaises, la probabilité de survenance d'un séisme de cette magnitude dans un contexte intraplaque et qui s'accompagnerait de ruptures en surface, est extrêmement faible.

Aussi dans le cadre des PPR, une interdiction stricte de construire dans une zone de faille semble extrêmement conservatrice.

En 2010, le CEPPRS (Comité d'Evaluation des PPRS) a formulé des recommandations sous la forme de fiches thématiques (en libre accès sur le site internet du Plan Séisme : http://www.planseisme.fr/IMG/pdf/fiches_cepprs_novembre2010.pdf). Pour les failles actives, le CEPPRS considère donc que seuls les ouvrages « à risque normal » de catégorie d'importance IV pourront être concernés par la réglementation relative aux failles actives.

Ces dispositions peuvent être :

- soit une inconstructibilité dans les zones de failles actives, dans ce cas, à la fois le tracé des zones de failles et l'activité de celles-ci devront faire l'objet d' « évidences scientifiques absolument indubitables »,
- soit des dispositions constructives particulières dans la zone de failles actives afin que la structure (et ses fondations) soit peu sensible aux déplacements différentiels du sol.

4.2.2. La qualification d'aléa en impact

L'impact sur un bâtiment situé à l'aplomb de la rupture dépendra :

- de la longueur du déplacement en surface occasionné par la rupture
- de la période de retour associée à la longueur de déplacement

La rupture en surface dépend d'abord de la magnitude du séisme. A titre d'exemples et sur la base de relations empiriques entre magnitude de séisme et dimension de la rupture co-sismique (Wells et Coppersmith, 1994), concernant les failles à mouvement normal :

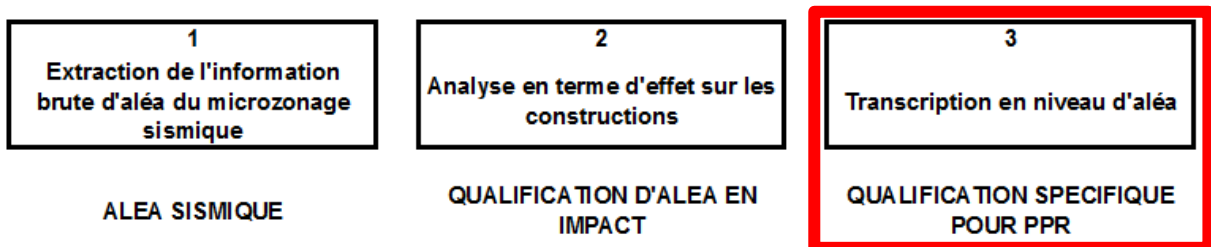
- une magnitude M_w de 5,5 correspond à une longueur moyenne de 7,5 (± 3) km et peut donner lieu à une rupture de surface co-sismique verticale d'amplitude moyenne 10 cm ;
- une magnitude M_w de 6,0 correspond à une longueur moyenne de rupture de faille de 13 (± 5) km et peut donner lieu à une rupture de surface co-sismique verticale d'amplitude moyenne 20 cm.

La période de retour dépend du niveau d'activité de la faille. Les failles actives de catégorie 3 sont celles considérées les plus actives. Les études sismotectoniques réalisées en Guadeloupe montrent un potentiel sismogène de :

- M_w 5,5, période de retour : environ 1 000 ans,
- M_w 6,0, période de retour : environ entre 5 000 et 10 000 ans,
- M_w 6,5, période de retour : environ entre 10 000 et 20 000 ans.

Comme indiqué au paragraphe précédent, les destructions généralisées du bâtiment se rapportent généralement à des déplacements de plus d'un mètre, donc bien au-delà des 20 cm en moyenne attendus pour des magnitudes proches de 6.0. De plus les périodes d'occurrence de séismes pouvant occasionner des déplacements en surface sont bien supérieures à la période de référence de 475 ans.

4.3. QUALIFICATION DE L'ALEA POUR LE PPR



Tenant compte de la classification des failles actives du Tableau 4, des ordres de grandeurs de déplacements attendus pour les systèmes de failles les plus actifs (en Guadeloupe) et des périodes de retour des séismes sur ces failles (cf. paragraphe précédent), on considèrera :

- les **failles classifiées en niveau d'activité 3, en aléa moyen** ;
- les **failles classifiées en niveau d'activité 2, en aléa faible**.

Les failles classifiées en niveau d'activité 1 sont considérées peu actives et ne sont pas prises en considération (aléa négligeable).

Le niveau de connaissance de la faille est lui aussi pris en compte. Si ce niveau est faible, (niveau A), la qualification du niveau d'aléa n'est pas fiable et la faille ne sera pas prise en compte pour des dispositions réglementaires.

Pour Le Gosier, la transcription de la cartographie des failles actives du microzonage (Figure 6) en aléa « rupture en surface » pour le PPRS est donnée en Figure 7.

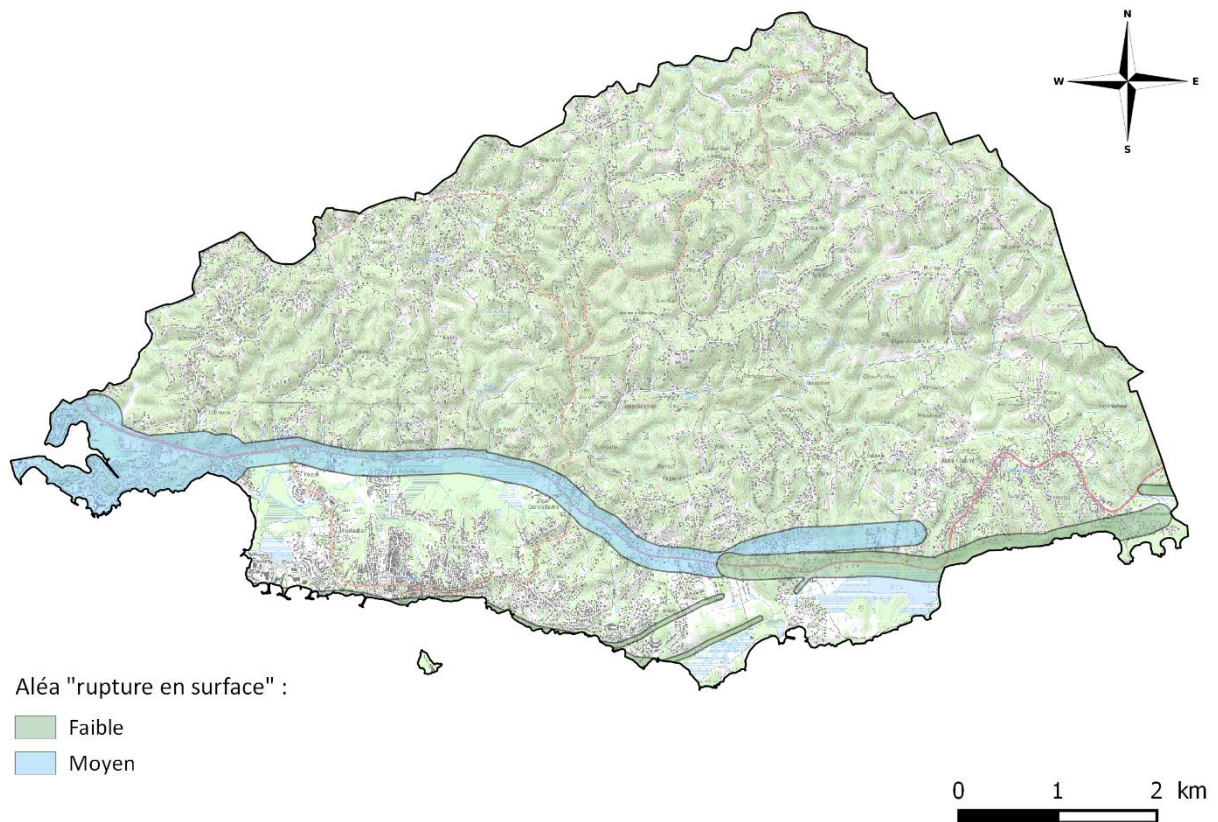
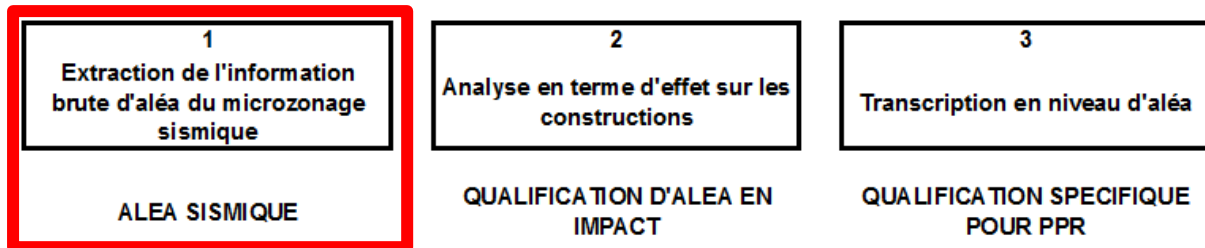


Figure 7 : Aléa « rupture en surface » identifié sur la commune du Gosier (Belvaux et al., 2020a).

Concernant la Martinique, le niveau actuel des connaissances sur les failles à terre n'est pas satisfaisant pour pouvoir effectuer correctement une analyse de leurs ruptures co-sismiques en surface. Aucune de ces failles n'est affectée d'un niveau C (bon niveau de connaissance régionale) et l'interprétation de certaines discontinuités cartographiques reste encore approximative et subjective. Par conséquent, et en tenant également compte des recommandations émises par le CEPPRS en 2010, les failles potentiellement actives ne sont pas traitées dans les règlements PPRS en Martinique.

5. Effets de site lithologiques

5.1. DESCRIPTIONS DU PHENOMENE DANS LE MICROZONAGE SISMIQUE



Le zonage des effets de site lithologiques permet de définir différentes zones de réponse homogène des sols aux sollicitations sismiques. Chaque zone est définie sous forme d'une classe de sols spécifique, différente des classes de sols forfaitaires de la réglementation nationale (soit les classes de sol A, B, C, D et E définies dans les Eurocodes 8).

Le zonage et les classes de sols spécifiques sont définis de plusieurs manières dans le microzonage sismique, qui fournit les éléments suivants (n°1 à n°4 ci-dessous) :

5.1.1. Une description simplifiée des formations lithologiques qui caractérisent les classes de sol

Le Tableau 5 ci-dessous illustre ce type de description pour le zonage sismique de la commune du Gosier en Guadeloupe. Les classes GT1 à GT4 donnent une représentation simplifiée du type de faciès présents sur le territoire de la commune. La description donne, au minimum, le type de dépôt sédimentaire dans les premiers mètres (argiles, sables) ou le mode de dépôt ou une configuration particulière (alluvions, colluvions, mangrove...). Peuvent être indiqués aussi le type de formation à la base du dépôt (laves altérées...) et une indication d'épaisseur du dépôt de surface. Sur cet exemple, il n'y a pas de site rocheux (au sens du substratum sismique affleurant).

Classe de sol	Type de sol
GT1	formations argileuses de dépression et dunaires (dune du Gosier)
GT2	remblais et formations argileuses (remblais à l'est de la Marina)
GT3	remblais Gosier – Abymes (sur formations vaseuses riches en tourbe et/ou limon)
GT4	terrains raides à rocheux (calcaires polypiers, calcaires à nodules algaires)

Tableau 5 : Classification des sols d'un microzonage sismique avec description simplifiée des types de sol (ici pour la commune du Gosier en Guadeloupe)

Cette description qualitative sert à une première identification des types de comportements (sols mous en surface, épaisseur et contrastes des dépôts de surface par rapport aux couches sous-jacentes).

5.1.2. Un zonage des classes de sols

Un zonage spécifique donne la répartition spatiale des différentes classes de sols (ou classes à effets de site lithologiques). La Figure 8 montre le zonage obtenu pour la commune de Gosier en Guadeloupe.

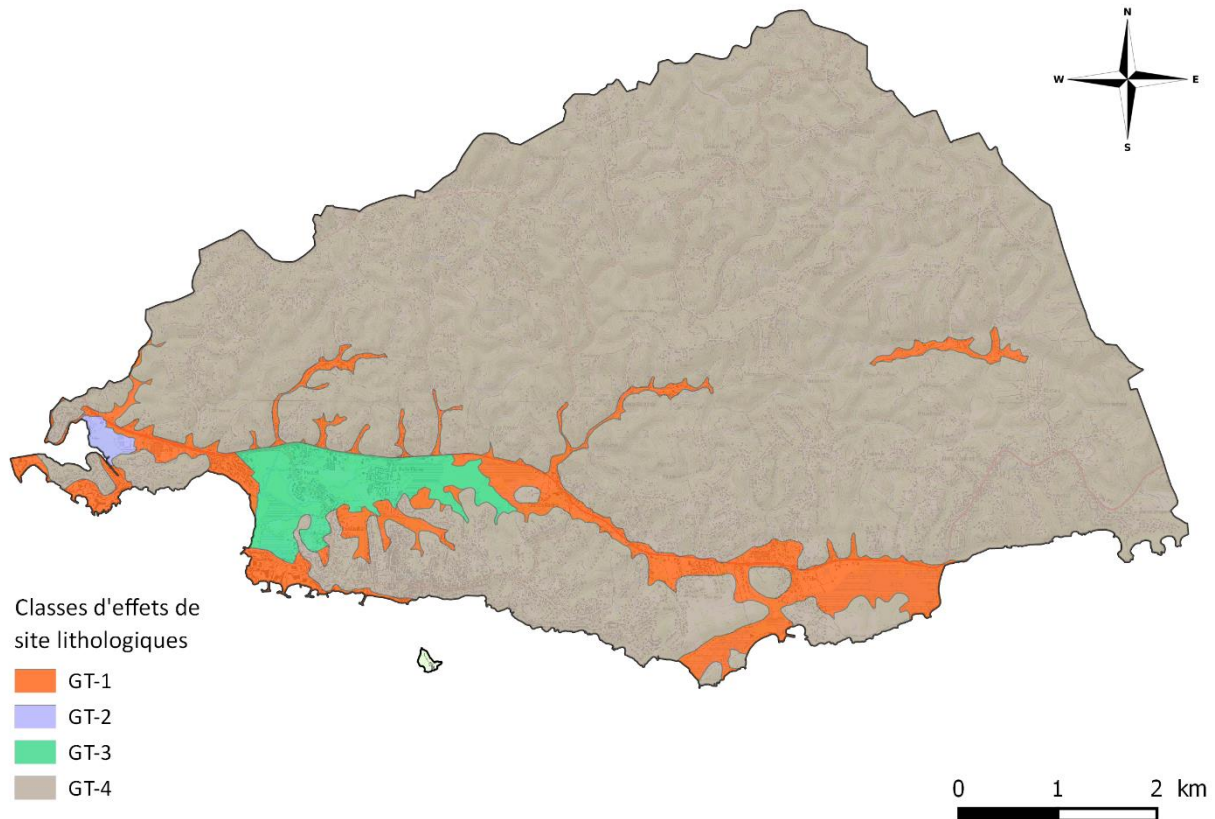


Figure 8 : Zonage spécifique des classes à effets de site lithologiques pour la commune du Gosier, Guadeloupe (Belvaux et al., 2020 modifié d'après Bengoubou-Valerius et al., 2013).

5.1.3. Les caractéristiques des spectres de réponse pour chaque classe de sol

L'effet de site lithologique est représenté sous une forme directement utilisable par les professionnels de la construction : le spectre de réponse élastique en accélération d'après la norme parasismique EC8 référencée NF EN 1998-1.

Celui-ci à une forme particulière illustrée sur la Figure 9 et est défini à l'aide des formules et des paramètres suivants :

$$\begin{aligned} \text{Pour } 0 \leq T \leq T_B, & \quad S_E(T) = RA + (RM - RA) * (T / T_B) ; \\ \text{Pour } T_B \leq T \leq T_C, & \quad S_E(T) = RM ; \\ \text{Pour } T_C \leq T \leq T_D, & \quad S_E(T) = RM * (T_C / T) ; \\ \text{Pour } T_D \leq T & \quad S_E(T) = RM * (T_C / T) * (T_D / T). \end{aligned}$$

- RA représente l'accélération à période nulle (T=0) assimilable à l'accélération maximale du sol PGA.

- RM représente l'accélération spectrale maximale : le « plateau » du spectre, valeur constante entre les périodes T_B et T_C (pour les spectres forfaitaires de la réglementation le rapport RM/RA est fixe et égal à 2.5 ; pour les spectres spécifiques ce rapport peut être différent de 2.5)
- Entre T_C et T_D , le spectre décroît en $1/T$
- Au-delà de T_D , le spectre décroît en $1/T^2$

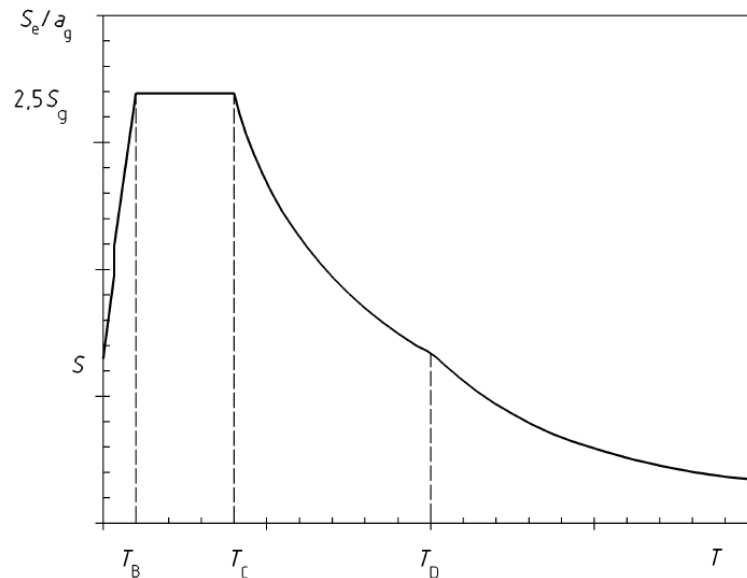


Figure 9 : Forme du spectre de réponse élastique en accélération d'après la norme parasismique EC8 référencée NF EN 1998-1.

Le spectre de réponse est donc totalement défini par les paramètres RA , RM , T_B , T_C et T_D .

Pour la commune du Gosier, les spectres de réponse des classes de sols sont représentés sur la Figure 10 et les paramètres de calcul sur le Tableau 6.

Classes de sol	RA (g)	RM (g)	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)	Classe de sols (EC8)
GT1	0,64	1,8	0,15	0,35	0,6	C
GT2	0,66	1,5	0,12	0,4	0,6	C
GT3	0,47	1,1	0,14	0,5	1,0	C
GT4	0,51	1,25	0,08	0,32	0,6	B

Tableau 6 : Paramètres des spectres de réponse élastiques par classe d'effets de site lithologiques pour la commune du Gosier (d'après Bengoubou-Valerius et al., 2013).

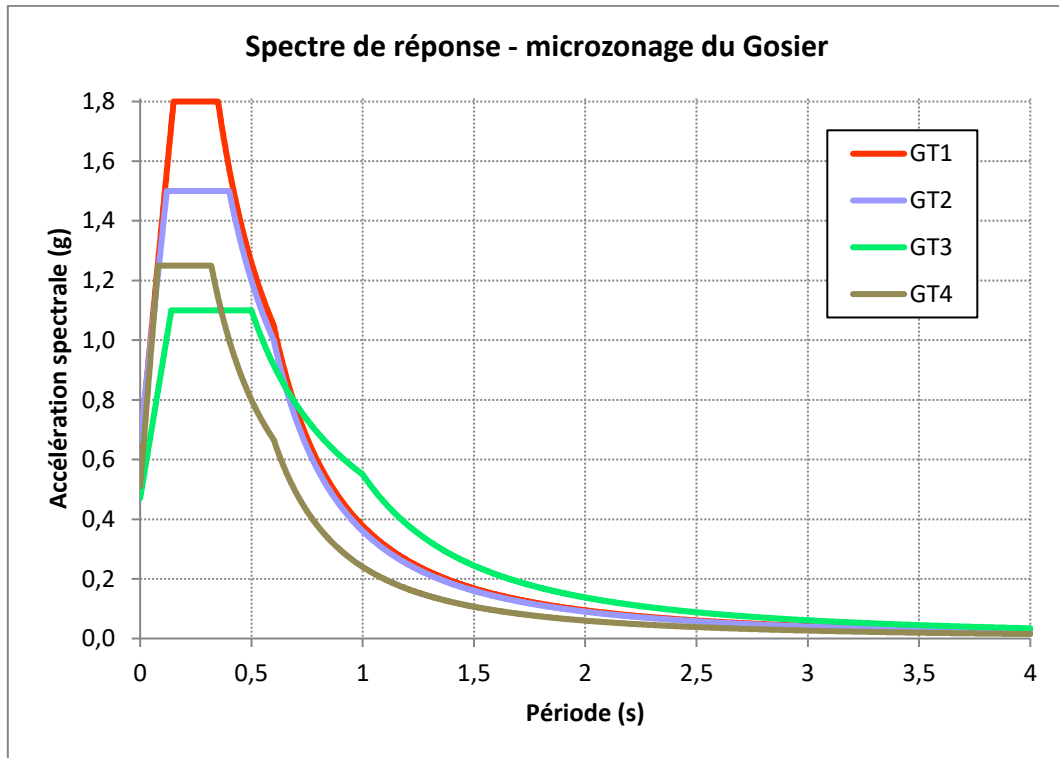


Figure 10 : Spectres de réponse spécifiques proposés pour les différentes classes d'effets de site lithologiques de la commune du Gosier (d'après Bengoubou-Valerius et al., 2013).

5.1.4. Des informations de rapprochement avec les classes de sols forfaitaires de la réglementation nationale

Pour faciliter l'utilisation des résultats obtenus, des correspondances sont données à titre indicatif entre les classes d'effets de site lithologiques définies dans le microzonage et les classes de sol EC8 (AFNOR, 2005),

Classe d'effet lithologique	Zone géotechnique correspondante	Vs30 (m/s)	Classe EC8 correspondante
GT-1	Dune du Gosier, argiles de dépression	343 à 365	C
GT-2	Remblais marina Gosier	300 à 315	C
GT-3	Argile tourbeuse Gosier, remblais sur tourbière Gosier	303	C
GT-4	Calcaires	500	B

Tableau 7 : Correspondance entre classes d'effets de site lithologiques et les classes de sol EC8 (d'après Bengoubou-Valerius et al., 2013).

5.1.5. Bilan

Le microzonage sismique donne une information technique avec :

- La cartographie de zonage en classes de sols ;
- des spectres de réponse en remplacement des spectres de la réglementation nationale ;
- des correspondances avec les classifications de sol de la réglementation nationale.

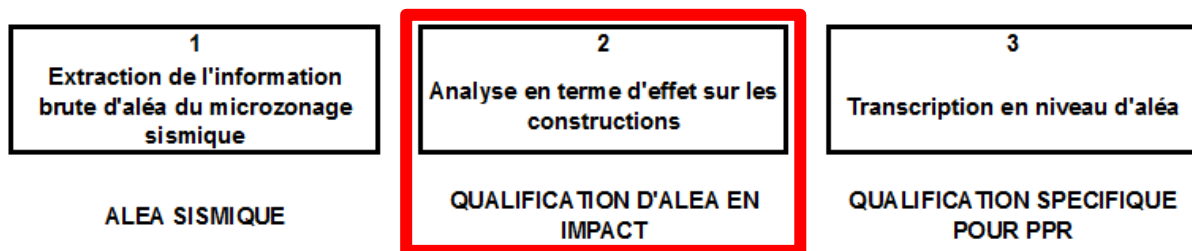
Ce niveau d'information reste encore trop technique, plutôt orienté vers les professionnels de la construction parasismique.

Il manque deux niveaux d'interprétation à ces éléments :

- Une première **appréciation sur l'ampleur des amplifications avec leurs effets attendus sur les bâtiments**, et sur la qualité des sols de fondations. Cette partie doit permettre une meilleure compréhension de cet aléa, à fournir dans le rapport de présentation du PPRS (en § 5.2) ;
- Une **qualification en aléa faible/moyen/fort** qui doit permettre une meilleure comparaison des niveaux de contraintes avec les autres aléas et ainsi mieux définir le plan de zonage réglementaire du PPRS (en § 5.3).

5.2. QUALIFICATION DE L'ALEA EFFET DE SITE LITHOLOGIQUE

Dans la procédure méthodologique, il s'agit ici de l'étape 2.



Ce thème recouvre en fait deux types d'informations :

1. Une qualification **sismologique de l'amplification** de la secousse dans certaines gammes de fréquence. Cette information permet d'orienter la conception du bâtiment pour mieux réagir à cet effet d'amplification.
2. Une qualification **géotechnique des sols** (sols mous, sols raides, sols rocheux...) qui doit permettre une meilleure adaptation des fondations (ou une préparation des sols préalables à la construction).

5.2.1. Quantification de l'effet de site en coefficients d'amplification

Pour le point 1, les données de référence sont les formules de calcul des spectres de réponse.

On cherche à quantifier l'amplification de la secousse par une ou plusieurs variables numériques sous forme de **coefficients d'amplification**. Pour une période d'oscillation fixée, ce coefficient est le rapport entre l'accélération de la classe de sol et l'accélération au rocher.

Dans l'exemple de la Figure 11 pour le microzonage du Gosier en Guadeloupe, le rocher est représenté par la courbe noire. La classe de sol GT4 (formations calcaires) est représentée par

la courbe marron-grise. Si on se réfère à la période 0.2 s, le coefficient d'amplification entre sol GT4 et rocher est plutôt élevé (Rapport $F_a = 1.7$). Mais si on se réfère à la période 1.0 s, le coefficient d'amplification est plus petit (rapport $F_v = 1.3$). Un bâtiment situé sur un sol de classe GT4 et conçu pour avoir une période propre d'oscillation $f_0=1.0$ s sera ainsi peu affecté par cet effet de site. Par contre un bâtiment situé sur un sol de classe GT4 et conçu avec une période propre 0.2 s sera plus sensible aux amplifications fortes du sol à 0.2 seconde. **Un seul coefficient d'amplification est donc insuffisant pour caractériser l'effet de site d'une classe de sol.**

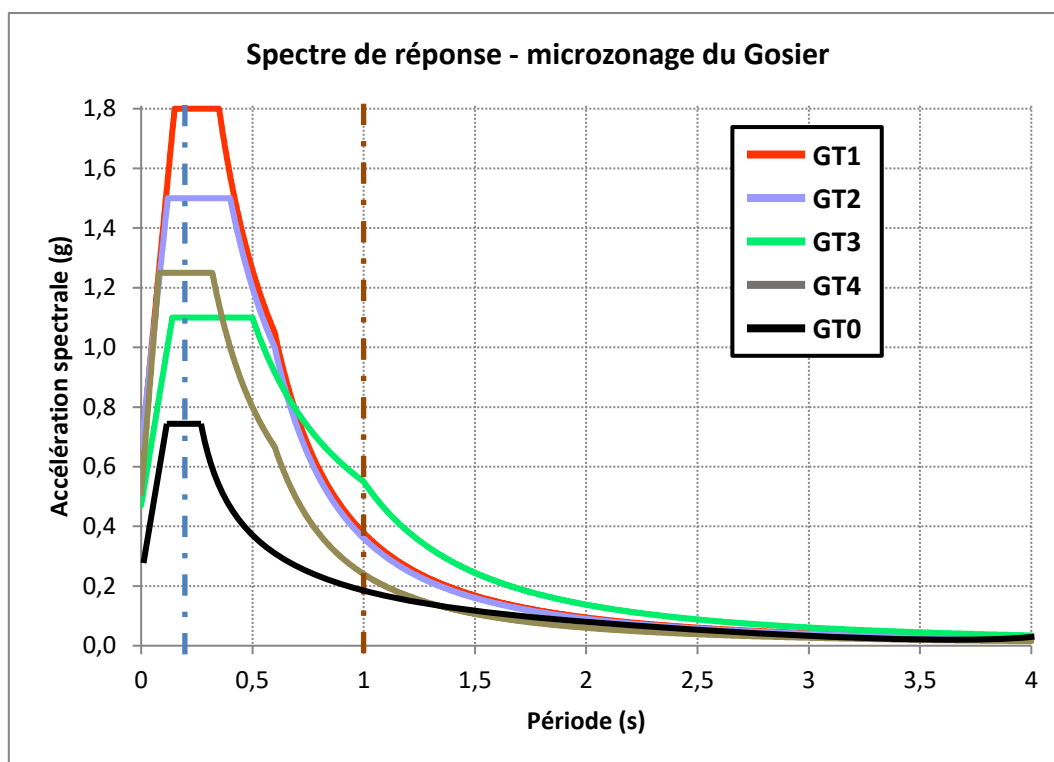


Figure 11 : Amplifications à partir des spectres de réponse spécifiques (Le Gosier). La classe GT0 représente le spectre au rocher, les classes GT1 à GT4 les spectres pour les autres classes de sols. La ligne verticale pointillée bleu permet d'apprécier l'amplification pour la période spectrale de 0.2 seconde et la ligne verticale pointillée marron pour la période spectrale de 1.0 seconde.

Dans le code de construction IBC utilisé notamment aux Etats-Unis, deux coefficients d'amplification sont utilisés pour caractériser l'effet de site d'une classe de sol pour la grande majorité des typologies de bâtiment courant :

- **F_a (rapport des accélérations spectrales à 0.2 s)** jugé représentatif des périodes courtes (0.1-0.4 s) qui affectent particulièrement l'oscillation des bâtiments de conception rigide et/ou avec peu d'étages
- **F_v (rapport des accélérations spectrales à 1.0 s)** jugé représentatif des périodes moyennes (autour de 1.0 s) qui affectent particulièrement l'oscillation des bâtiments de conception souple et/ou avec un nombre d'étages autour de 10.

Cet impact sur les bâtiments est expliqué plus en détail en page 37 et en page 38.

Pour l'exemple de la commune du Gosier pris jusqu'ici, le Tableau 8 donne les coefficients F_a et F_v obtenus pour chaque classe de sols et indiquant les amplifications attendues autour de la période 0.2 et 1.0 seconde respectivement :

- $F_a = SA_{0.2s}(\text{sol}) / SA_{0.2s}(\text{rocher})$
- $F_v = SA_{1.0s}(\text{sol}) / SA_{1.0s}(\text{rocher})$

Les valeurs des accélérations spectrales $SA_{0.2s}$ et $SA_{1.0s}$ pour chaque classe de sols sont obtenues à partir des formules de calcul du paragraphe 5.1 et du Tableau 6.

Pour les quatre communes pilotes concernées par cette étude PPRS, les valeurs de tous ces coefficients sont données en Annexe 2.

Classes de sol	PGA (g)	SA 0.2s (g)	SA 1.0s (g)	Fa 0.2s	Fv 1.0s
Classe GT0	0.30	0.75	0.19	1.0	1.0
Classe GT1	0.64	1.80	0.38	2.4	2.0
Classe GT2	0.66	1.50	0.36	2.0	1.9
Classe GT3	0.47	1.10	0.55	1.5	2.9
Classe GT4	0.51	1.25	0.24	1.7	1.3

Tableau 8 : Coefficients d'amplification F_a et F_v pour les classes de sols spécifiques du Gosier, Guadeloupe

5.2.2. Coefficients d'amplification et caractérisation des classes de sols en termes de résonance

Les zones sujettes aux effets de site sont par définition le siège d'amplifications importantes à des périodes particulières (période de résonance du sol), intéressant une large gamme de constructions. Par ailleurs, chaque bâtiment, de par la nature de ses matériaux, sa structure, son nombre d'étages, possède-lui aussi une période propre, période pour laquelle il vibre de façon privilégiée, encore appelée période de résonance du bâtiment. Si le sol se met à vibrer à cette période, le bâtiment entre en résonance : il va osciller de plus en plus fort et risque de s'effondrer. Les immeubles élevés ou souples oscillent lentement (longues périodes ou basses fréquences), alors que les maisons basses ou raides vibrent plus rapidement (courtes périodes ou hautes fréquences). La coïncidence malheureuse entre la période de résonance du sol et celle de certains bâtiments peut expliquer une partie des destructions lors d'un séisme.

La Figure 12 illustre schématiquement ce phénomène. En première approximation, la période propre de résonance (en secondes) d'un bâtiment est égale au nombre de niveaux (dont le rez-de-chaussée) divisé par 10. Pour des sols meubles, le spectre de réponse a son maximum décalé vers les périodes longues ; les immeubles élevés (plus souples) subissent une agression plus forte que les immeubles peu élevés (plus raides). A l'inverse, pour les sols rigides, le spectre de réponse a son maximum décalé vers les courtes périodes : les constructions de faible hauteur subissent alors une agression plus forte. Ce type de comparaison n'est valable qu'à épaisseur de sol analogue.

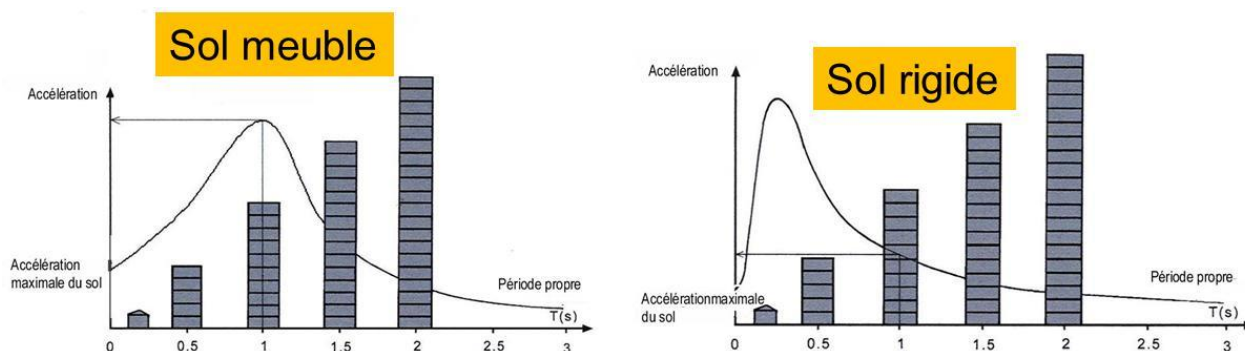


Figure 12 : Spectre de réponse des sols et période de résonance de bâtiment. Les immeubles élevés (ou souples) subissent une agression plus forte sur des sols meubles. A l'inverse, les effets de site associés à des sols rigides agressent plus nettement des constructions de faible hauteur.

En dehors des spectres de dimensionnement qui intègrent ces effets, il est important de donner également une information qualitative sur la résonance des sols, afin d'attirer l'attention des constructeurs pour qu'ils adaptent en conséquence la hauteur des bâtiments. Ainsi, sur des sols très meubles en couches relativement épaisses (au moins 20 m), dont la période de résonance est élevée, on privilégiera des constructions basses, oscillant à des courtes périodes.

Il est donc proposé de qualifier cet impact de résonance sur les bâtiments à partir des coefficients d'amplification F_a et F_v définis dans le paragraphe précédent. On distingue :

- les effets sur les bâtiments de courte période propre ($< 0,2$ s), généralement des bâtiments à structures rigides ou de faible hauteur,
- les effets sur les bâtiments de période propre plus élevée ($> 0,2$ s) généralement des bâtiments à structures plus souples ou de plus grande hauteur.

5.2.3. Qualification de l'amplification

La qualification repose sur des gammes de valeurs des coefficients F_a et F_v données dans le Tableau 9, auxquelles on associe un code de couleur vert, bleu, rouge:

F_a - Effet site Bâtiment de faible hauteur	faible à moyen	$F_a < 1.3$
	moyen à fort	$F_a 1.3 \text{ à } 1.7$
	fort	$F_a > 1.7$
F_v - Effet site Bâtiment de grande hauteur	faible à moyen	$F_v < 1.5$
	moyen à fort	$F_v 1.5 \text{ à } 2.5$
	fort	$F_v > 2.5$

Tableau 9 : Critères de qualification d'impact de l'amplification lié à l'effet de site lithologique

Nous préférons, dans ces appellations, indiquer une gamme (« faible à moyen », « moyen à fort », etc...) qui indique une continuité plutôt qu'un saut aux limites ($F_a=1.3$ est moyen ; $F_a=1.7$ est fort, F_a entre 1.3 et 1.7 est moyen à fort).

Ces critères de qualification d'impact dépendent du niveau d'aléa régional. Ils sont ici adaptés pour un niveau d'accélération p_{ga} de l'ordre de 0.3 g. Les critères de seuils F_a et F_v ne sont pas les mêmes en zone de sismicité faible.

L'application aux classes de sol de la commune du Gosier est illustrée dans le Tableau 10 et en Annexe 2, tout comme pour les communes de Baie-Mahault, du François et de Fort-de-France.

Classe de sol	Type de sol	Effets de site sur bâtiment rigide ou de faible hauteur	Effets de site sur bâtiment souple ou de grande hauteur
Classe GT1	Argiles de dépression et zones dunaires	fort	moyen à fort
Classe GT2	Remblais sur tourbières	fort	moyen à fort
Classe GT3	Argiles tourbeuses et remblais sur tourbières	moyen à fort	fort
Classe GT4	Formations calcaires	moyen à fort	faible à moyen

Tableau 10 : Qualification des formations rencontrées sur le territoire du Gosier, en termes d'influence des effets de site.

5.2.4. Qualification de la portance des sols de fondations

Cette qualification repose sur plusieurs critères :

- La valeur du paramètre $V_{s,30}$ (qui fournit également l'équivalence en classe de sols forfaitaire A, B, C, D, E de la réglementation nationale).
- Le rapprochement avec le niveau d'aléa liquéfaction

Les critères sont donnés sur le Tableau 11:

Portance	$V_{s,30}$ (m/s)	Aléa liquéfaction
faible à moyenne	$V_{s,30} < 250$	Liq. moyen à fort
moyenne à bonne	$V_{s,30} 250-600$	Liq. faible
bonne	$V_{s,30} > 600$	Liq. Négl.

Tableau 11 : Critères de qualification de la portance des sols de fondation

L'application aux classes de sols de la commune du Gosier est illustrée dans le Tableau 12 et en Annexe 2, tout comme pour les communes de Baie-Mahault, du François et de Fort-de-France.

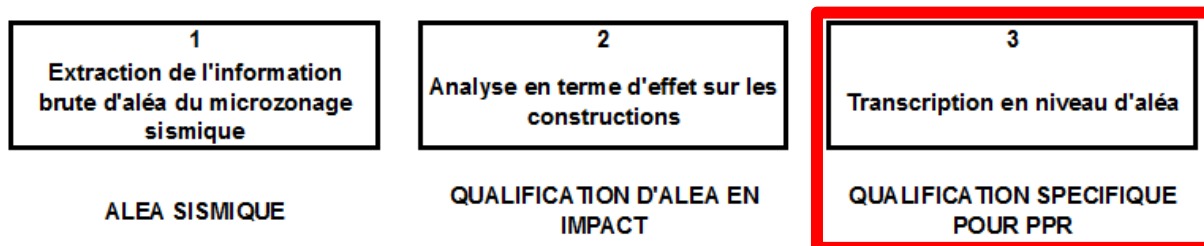
Classe de sol	Type de sol		$V_{s,30}$	EC8	Aléa Liq.	Portance du sol de fondation
Classe GT1	Argiles de dépression et zones dunaires		343-365	C	Moyen à fort	faible à moyenne
Classe GT2	Remblais sur tourbières		300-315	C	moyen	faible à moyenne

Classe GT3	Argiles tourbeuses et remblais sur tourbières		303	C	fort	faible à moyenne
Classe GT4	Formations calcaires		500	B		moyenne à bonne

Tableau 12 : Qualification des formations rencontrées sur le territoire du Gosier, en termes de portance des sols de fondation

5.3. QUALIFICATION DE L'ALEA POUR LE PPRS

Dans la procédure méthodologique, il s'agit ici de l'étape 3.



Le paragraphe précédent permettait de « traduire » l'aléa effet de site en impact attendu sur le bâtiment (amplification) ou sur la fondation du bâtiment (portance). Ces éléments informatifs sont à faire figurer dans le rapport de présentation du PPRS.

Cette information doit encore être simplifiée, pour permettre une meilleure appréciation du niveau de contrainte réglementaire et faire un parallèle avec les niveaux d'aléa faible/moyen/fort défini pour les autres aléas.

Pour ce phénomène on ne définit pas d'aléa Fort. L'effet de site lithologique est une aggravation d'un autre aléa, l'aléa sismique régional, qui est déjà défini comme fort par la réglementation nationale sur toutes les Antilles françaises.

Une classe de sols est classée en aléa moyen en présence d'une amplification qualifiée comme étant forte **ou** d'une portance qualifiée de faible à moyenne. L'aléa est considéré comme faible dans tous les autres cas, sauf dans le cas d'aléa nul (pas de prise en compte de cet aléa) pour un terrain de nature rocheuse.

Ces critères sont résumés dans le Tableau 13 :

Niveau d'aléa	Fa - Effets de site sur bâtiment rigide ou de faible hauteur	Fv - Effets de site sur bâtiment souple ou de grande hauteur	Portance du sol de fondation
Nul (rocher)	Nul	Nul	Bonne
Faible	Faible à Moyen, ou Moyen à Fort	Faible à Moyen, ou Moyen à Fort	Moyenne à Bonne

Moyen	Fort	Fort	Faible à Moyenne
-------	------	------	------------------

Tableau 13 : Critères de transcription de la qualification d'effets de site lithologiques en niveaux d'aléa pour le PPRS

L'application aux classes de sols de la commune du Gosier est illustrée dans le Tableau 14 et en Annexe 2, tout comme pour les communes de Baie-Mahault, du François et de Fort-de-France..

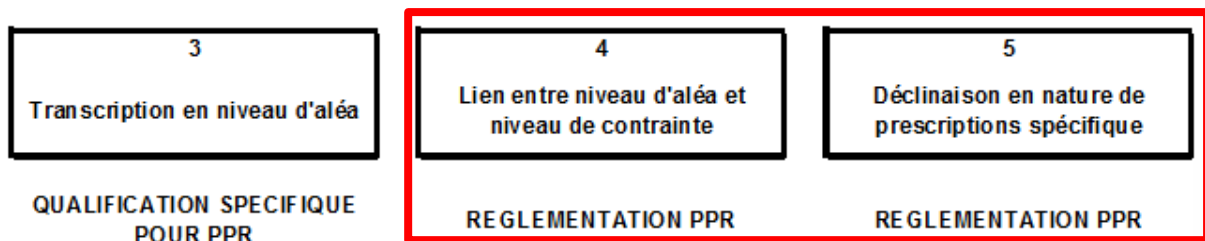
Classe de sol	Type de sol	Fa – Effets de site sur bâtiment rigide ou de faible hauteur	Fv – Effets de site sur bâtiment souple ou de grande hauteur	Portance du sol de fondation	Niveau d'aléa
Classe GT1	Argiles de dépression et zones dunaires	fort	moyen à fort	faible à moyenne	moyen
Classe GT2	Remblais sur tourbières	fort	moyen à fort	faible à moyenne	moyen
Classe GT3	Argiles tourbeuses et remblais sur tourbières	moyen à fort	fort	faible à moyenne	moyen
Classe GT4	Formations calcaires	moyen à fort	faible à moyen	moyenne à bonne	faible

Tableau 14 : Niveau d'aléa des classes de sols d'effets de site lithologiques de la commune du Gosier, Guadeloupe

Cette qualification est effectuée uniquement sur des critères techniques (ampleur de l'amplification ou faiblesse de la portance du sol).

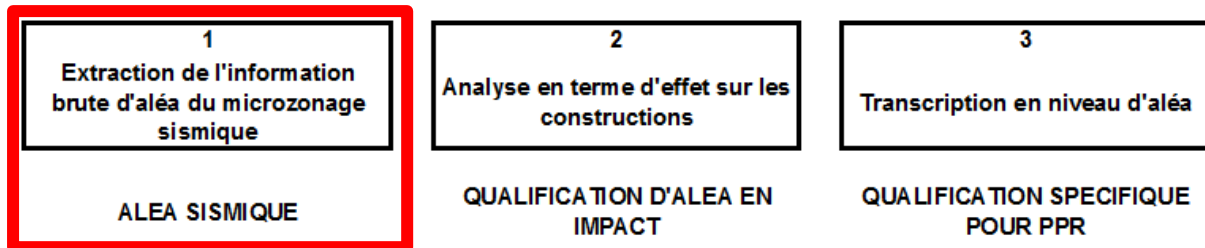
Deux niveaux sont donc définis : niveau d'aléa faible ou moyen. En termes de prescription, il n'y a pas d'obligation à distinguer ces deux niveaux. On peut avoir des prescriptions identiques pour l'aléa faible et moyen ou définir des prescriptions supplémentaires pour l'aléa moyen.

C'est aux autorités qui instruisent les PPR de définir le type de prescriptions dans le cadre des étapes 4 et 5 du processus méthodologique énoncé au paragraphe 2.3.



6. Effets de site topographiques

6.1. DESCRIPTIONS DU PHENOMENE DANS LE MICROZONAGE SISMIQUE



On observe pour certaines configurations topographiques des amplifications notoires d'un signal sismique, entraînant une augmentation locale de l'intensité du tremblement de terre. Ce phénomène d'effet de site topographique est lié au piégeage des ondes sismiques au niveau de zones de rupture de pente, de crête, de bordure de plateau, de sommet (Figure 13).

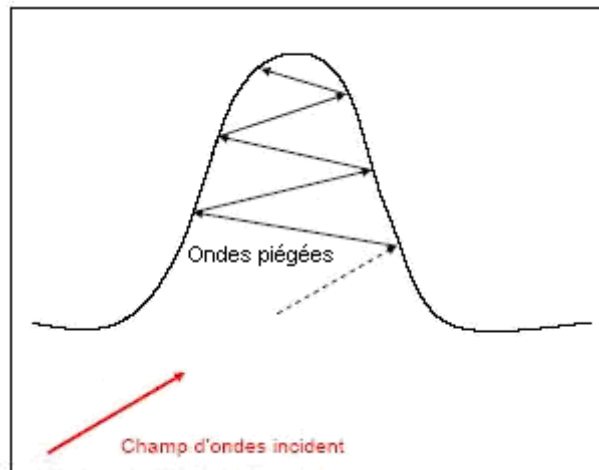


Figure 13 : Principe des effets topographiques

Bien que l'amplification puisse dans certains cas être très importante, elle est difficile à quantifier du fait de la complexité physique du phénomène. En effet, celle-ci dépend à la fois de la nature des ondes sismiques considérées, de leur incidence, de la géométrie 3D du relief, mais également des formations géologiques en place.

La quantification effective du phénomène est donc encore du domaine de la recherche.

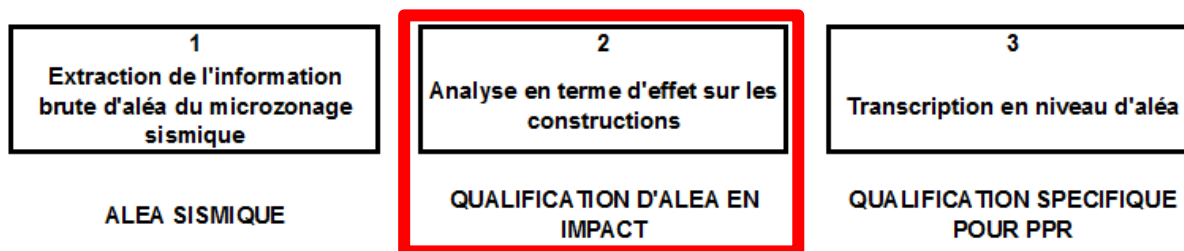
Dans les études de microzonage sismique, le BRGM procède par l'application d'une approche forfaitaire empirique inspirée de la réglementation parasismique française, reprise récemment au niveau européen. En effet, les précédentes règles parasismiques françaises PS-92 ainsi que les règles parasismiques européennes Eurocode 8 (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.

Cette approche forfaitaire repose sur le **calcul d'un coefficient τ** qui varie de 1 (pas d'effets de site topographiques) à 1.4 (effet maximal). Il est obtenu à l'aide de formules empiriques basées sur l'analyse de profils topographiques bidimensionnels.

La graduation de 1 à 1.4 dépend du profil topographique et de l'algorithme du calcul. La résolution du MNT utilisé pour les calculs conditionne aussi très fortement les résultats de l'analyse, tant en termes d'ampleur du phénomène que d'étendue des zones de susceptibilité.

τ est assimilable à un coefficient d'amplification : rapport entre l'accélération au niveau d'une topographie et l'accélération sur un terrain plat. Il ne dépend pas de la période d'oscillation et s'applique à tout le spectre de réponse de la classe de sols.

6.2. QUALIFICATION DE L'ALEA EFFET DE SITE TOPOGRAPHIQUE



La cartographie des zones exposées à un effet de site topographique indique de manière qualitative les zones où le coefficient τ serait susceptible d'être supérieur à 1, c'est-à-dire les zones où ce phénomène devra être pris en compte pour le dimensionnement d'ouvrage.

Pour les études de microzonage, l'idéal est d'avoir une cartographie d'iso-valeurs de τ entre 1 et 1.4. On estime cependant dans la plupart des cas ne pas avoir le niveau de finesse suffisant pour donner cette graduation. On applique alors un zonage binaire :

$\tau = 1$ pas de phénomène d'effet de site topographique

$\tau > 1$ un effet de site topographique est possible.

Pour $\tau > 1$, le profil topographique peut induire un effet de site. Mais le microzonage n'indique pas la valeur que ce coefficient peut prendre. Par défaut et faute d'informations supplémentaires la valeur maximale 1.4 devrait être appliquée.

Un exemple de ce zonage binaire est illustré sur la Figure 14 pour le Gosier.

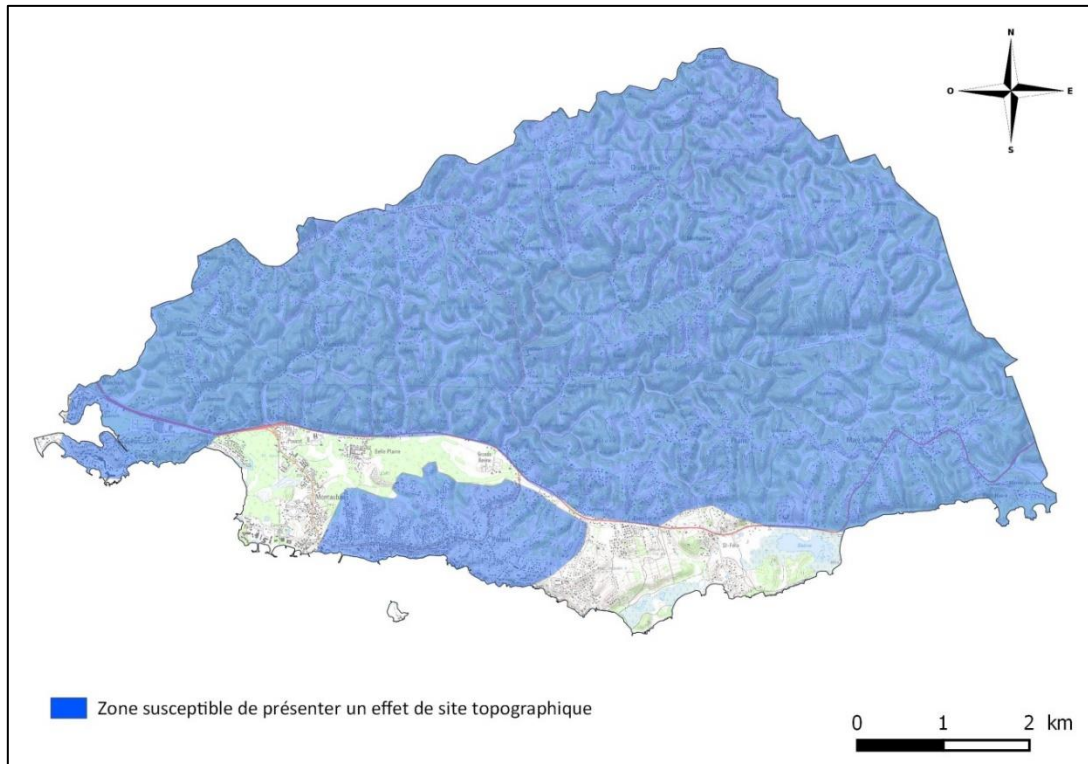
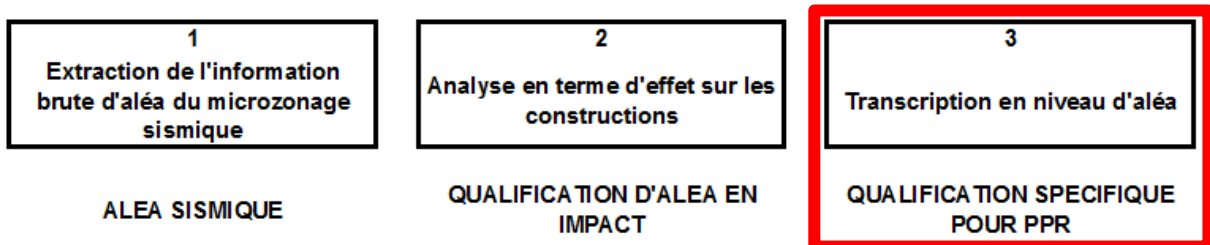


Figure 14 : Zones susceptibles de présenter un effet de site topographique sur la commune du Gosier (Belvaux et al., 2020a modifié d'après Bengoubou-Valerius et al., 2013).

6.3. QUALIFICATION DE L'ALEA POUR LE PPRS



S'il faut qualifier cet aléa en nul/faible/moyen/fort en termes d'impact sur un ouvrage :

- Pour $\tau = 1$, le profil topographique ne présente pas les configurations nécessaires à un effet de site topographique : l'aléa est donc qualifié de **nul**.
- Pour $\tau > 1$, l'amplification maximale envisagée est 1.4. On peut comparer cette valeur à celle des coefficients d'amplification des effets de site lithologiques selon les mêmes critères que sur le Tableau 9. La qualification en termes d'amplification de la secousse est « **faible à moyenne** ».

Comme pour l'effet de site lithologique, C'est aux autorités qui instruisent les PPR de définir le type de prescriptions dans le cadre des étapes 4 et 5 du processus méthodologique énoncé au paragraphe 2.3.

Par exemple pour la commune de Gosier, en Guadeloupe, les prescriptions sont dites « courantes » ; ce qui signifie qu'aucune prescription particulière n'est associée à ce phénomène ; juste un affichage pour information avec toujours l'obligation de se conformer à la réglementation nationale.

7. Liquéfaction des sols

7.1. DESCRIPTIONS DE L'ALEA DANS LE MICROZONAGE SISMIQUE

7.1.1. Le phénomène et ses effets

Le phénomène de liquéfaction induit une **perte momentanée de portance de certains types de sols** (horizons sableux ou limoneux, saturés...). La secousse sismique provoque une augmentation de la pression de l'eau dans le sol, ce qui diminue sa résistance au cisaillement, et donc sa portance. Selon l'importance du séisme et l'épaisseur du sol liquéfié, ces terrains peuvent subir des déformations permanentes (tassements, poinçonnements, glissements latéraux) dont l'amplitude peut être limitée (quelques centimètres) à quasi illimitée (quelques mètres), qui se révèlent particulièrement dommageables pour les constructions reposant sur ces formations. On peut aussi observer des phénomènes de remontée de nappes causant des inondations localisées, de remontée des gaines techniques des réseaux urbains, rendues flottantes sous la poussée d'Archimède...

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

- Premièrement, qu'il y ait **susceptibilité du sol à la liquéfaction**, c'est-à-dire être en présence d'un terrain granulaire, dans un état peu compact, peu contraint et situé sous la nappe. 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 ».
- Deuxièmement, qu'il y ait **opportunité à la liquéfaction**, c'est-à-dire subir des secousses sismiques suffisamment énergiques par rapport à la résistance mécanique du sol.

7.1.2. Documents de référence et niveaux d'étude

En France, les documents de référence et les normes pour l'évaluation du risque de liquéfaction, et plus particulièrement pour la réalisation de microzonages sismiques, sont les suivants :

- Association Française du Génie Parasismique (AFPS), 1993 – Guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique.
- Arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal ».
- Norme NF P06-013 (DTU) : règles PS 92. Ces règles pouvaient être utilisées jusqu'au 01/01/2014 (avec des accélérations majorées définies par l'arrêté du 22 octobre 2010).
- Norme NF EN 1998-5 septembre 2005 : Eurocode 8, partie 5. En vigueur depuis le 1^{er} mai 2011.

Le Guide de construction parasismique des maisons individuelles – DHUP CPMI-EC8 zone 5 édition 2020 adapte les règles de constructions générales de l'Eurocode 8 pour les projets de « petite » taille tels que les maisons individuelles.

Les études de liquéfaction de microzonage sismique s'appuient principalement sur ces textes avec des évolutions dans les méthodes d'évaluations depuis les années 1990 jusqu'à présent. Le guide microzonage de l'AFPS de 1993 reste la référence de base. Il hiérarchise les études en

4 niveaux : études des paramètres d'identification des sols (essais en laboratoire) et études de niveaux A, B et C :

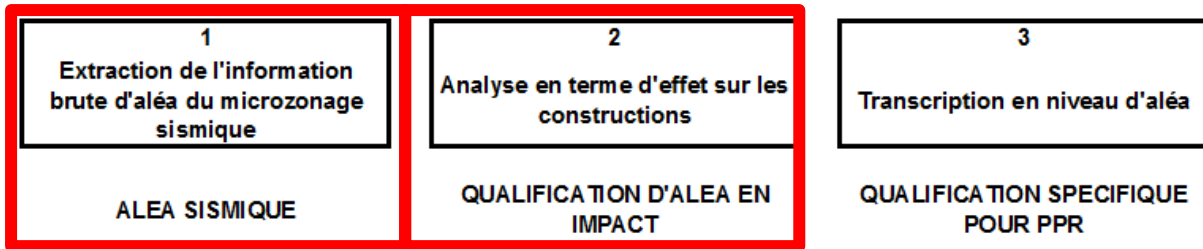
- L'étude des paramètres d'identification des sols (essais en laboratoire) donne des critères précis déterminant les sols « *a priori suspects de liquéfaction* » et ceux « *considérés comme exempts de risque* ». Ces termes correspondent à une **susceptibilité**.
- L'étude de niveau A est de type « **qualitatif** » 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* ». Comme on le voit, le terme « aléa » est ici employé de manière « abusive » ; l'aléa est en effet classiquement le croisement entre une probabilité et une intensité, alors qu'il s'agit, ici, uniquement d'une probabilité.
- La différence entre l'étude de niveau B et celle de niveau C se fait entre autre sur la nature du calcul réalisé. 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 un **indice de liquéfaction** (**I_L**). C'est cette valeur de I_L qui est ensuite traduite en niveau de sévérité et en niveau d'aléa. L'étude de niveau C nécessite la réalisation de sondages complémentaires et d'essais en laboratoire dont des essais triaxiaux cycliques.

En fonction de la méthodologie utilisée et du niveau A, B ou C, les études de microzonages sismiques menées aux Antilles françaises n'expriment pas l'aléa liquéfaction de la même façon. Sa qualification en aléa faible/moyen/fort n'est pas forcément équivalente d'une étude à l'autre.

Outre les différences méthodologiques, il convient également de prendre en compte les différences dans les données utilisées pour chaque étude :

- Des archives ont été exploitées. La quantité et la qualité des archives utilisées diffèrent selon les communes et les dates de réalisation.
- Des investigations complémentaires ont été réalisées. Le programme, la nature, les résultats de ces investigations diffèrent en fonction du contexte normatif, des budgets disponibles à l'époque, du bureau d'étude prestataire, etc.
- Certaines contraintes urbanistiques ont été prises en compte de manière différente selon les études. Pour certaines communes, des zones présentant un aléa submersion n'ont pas été étudiées vis-à-vis de l'aléa liquéfaction, en considérant qu'elles étaient de toute manière « inconstructibles ». Pour d'autres communes, ces zones « submersibles » ont été intégrées à l'étude d'aléa liquéfaction.
- Les calculs « précis » d'évaluation de la liquéfaction (approche quantitative) prennent entre autre en compte les caractéristiques du séisme de référence et de l'accélération maximale au sol. Ces paramètres n'ont actuellement pas été homogénéisés entre les communes.

7.1.3. L'évaluation de l'aléa



Les études les plus anciennes (telles que le microzonage de Fort-de-France en 1996 ou de l'agglomération de Pointe-à-Pitre et la partie Est de Baie-Mahault en 1998) reposent presque exclusivement sur des considérations géologiques. Elles sont donc similaires à une étude qualitative de niveau A selon le guide AFPS (1993) et définissent des niveaux de susceptibilité.

Par rapport à la méthodologie générale du chapitre 2.3, il n'y a pas de passage par l'étape 1 avec une évaluation quantitative de l'aléa, mais directement une qualification d'aléa en impact de l'étape 2.

Pour l'agglomération de Pointe-à-Pitre (dont la partie Est de Baie-Mahault), la qualification en aléa est en 3 niveaux :

- Aléa nul à faible
- Aléa moyen
- Aléa fort

Rappelons que ces études anciennes utilisaient abusivement le terme « aléa » plutôt que susceptibilité qui eût été plus adapté.

Le rapprochement de ces niveaux d'aléa liquéfaction avec le niveau de susceptibilité défini par le guide AFPS (1993) est le suivant :

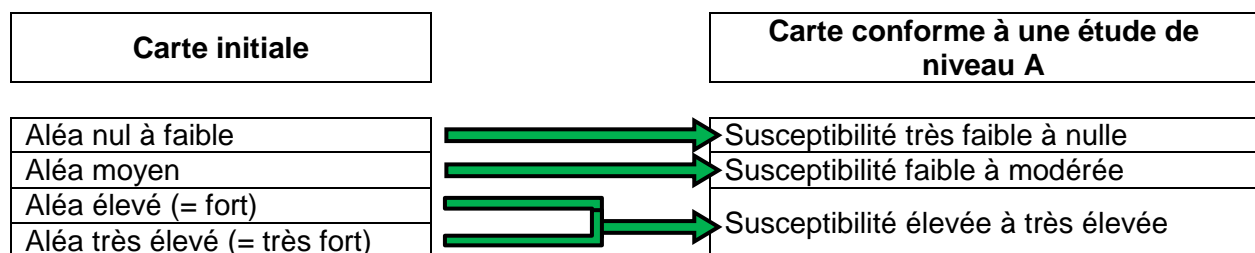


Tableau 15 : Correspondance de qualification d'aléa liquéfaction dans les études anciennes de microzonage avec une qualification de susceptibilité de liquéfaction

Les études les plus récentes (telles que les microzonages du François, du Gosier, de Baie-Mahault Ouest, ainsi que l'étude de risque liquéfaction sur Fort-de-France) sont des études de niveau C beaucoup plus complexes qui examinent successivement :

- le contexte hydrogéologique, notamment la présence de sols dans un état proche de la saturation ;
- la susceptibilité qualitative (critères d'identification des règles PS 92, norme NF P 06-013, et Guide de Microzonage Sismique – AFPS novembre 1993) ;

- la susceptibilité quantitative (méthodes basées sur des essais mécaniques in situ ou au laboratoire) ;
- l'opportunité ou la sollicitation (contexte sismique) ;
- le coefficient de sécurité à la liquéfaction (FS), directement issu des deux points précédents ;
- les potentialités de liquéfaction, conjonction du contexte hydrogéologique, de la susceptibilité qualitative et de la valeur du coefficient de sécurité à la liquéfaction ;
- **l'intensité de liquéfaction**, à partir de l'indice global de liquéfaction I_L , permet d'évaluer l'impact de la profondeur et de l'épaisseur des horizons liquéfiables pour une colonne de sol. Les valeurs de l'indice I_L varient de 0 à 100. Il leur est associé les niveaux de probabilités, d'intensité et d'aléa suivants :

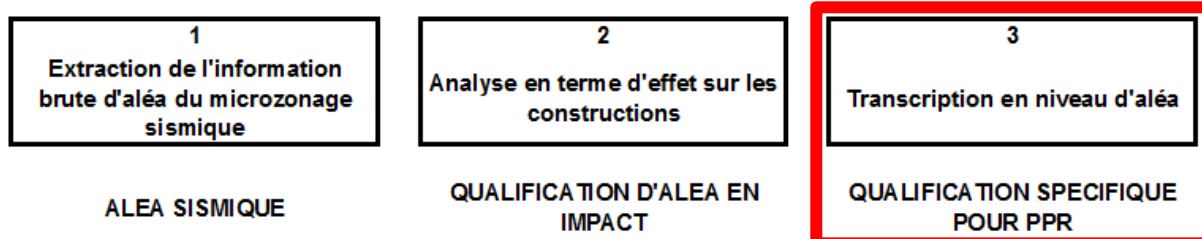
Valeurs de I_L	Probabilité	Intensité	Aléa
$I_L = 0$	Pas de liquéfaction	Pas de désordre	Nul
$0 < I_L \leq 5$	Liquéfaction peu probable	Désordres peu dommageables	Faible
$5 < I_L \leq 15$	Liquéfaction probable	Désordres dommageables	Moyen
$I_L > 15$	Liquéfaction quasi-certaine	Désordres très dommageables (entraînant la ruine)	Fort

Tableau 16 : Association des valeurs d'indice de liquéfaction aux niveaux de probabilité, d'intensité et d'aléa liquéfaction (d'après AFPS, 1993)

Ici l'aléa est bien représenté par une intensité quantitative, l'indice I_L (étape 1 de notre méthodologie d'analyse). Le Tableau 16 représente la qualification en termes d'impact de l'étape 2 de la méthodologie générale.

L'aléa liquéfaction est évalué de façon différente d'une étude à l'autre. Les qualifications en aléa faible/moyen/fort présentent des variantes (les zones d'aléa nul à faible sont parfois regroupées, la distinction entre aléa fort et très fort est parfois délicate, etc). Et surtout cette qualification repose sur des niveaux d'appréciations différents : forte prédominance des informations de susceptibilité dans les études anciennes, intensité de liquéfaction avec indice I_L pour les études récentes. Pour ce dernier cas, l'aléa liquéfaction est évalué selon des critères plus complets répondant mieux à la définition d'un aléa (intensité d'un phénomène et période d'occurrence).

7.2. QUALIFICATION DE L'ALEA POUR LE PPRS



L'application des principes de réglementation fournis dans le guide PPR Sismique (Fabriol et Garry, 2002) nécessite une qualification de l'aléa liquéfaction en trois niveaux, telle qu'illustrée dans le Tableau 17 et s'appuyant sur la qualification définie pour une étude de niveau B ou C du guide de l'AFPS 1993 :

Aléa	Mesures de prévention et dispositions constructives	Espaces non urbanisés	Espaces urbanisés
Très élevé à élevé : Liquéfaction quasi certaine	Traitement des sols, fondations sur pieux ou radiers	Inconstructible (aléa glissement subhorizontal)	Constructible sous conditions pour les bâtiments A, déconseillé pour les bâtiments B en raison du coût, étude de sol préconisée pour les bâtiments C et D, si l'implantation ne peut être évitée
Moyen : Liquéfaction probable	Traitement des sols, fondations sur pieux ou radiers	Constructible sous conditions	Constructible sous conditions pour A et B, étude préconisée pour certains bâtiments de classe C (ERP et bâtiments stratégiques) et pour tous ceux de classe D
Faible : Liquéfaction peu probable	Application de la réglementation, prise en compte d'un spectre de réponse propre au site	Constructible	Constructible

Les zones exposées à un aléa moyen à élevé sont constructibles dans le cas des bâtiments C et D, si une étude est réalisée pour préciser la profondeur du « bon » sol et décrire les dispositions constructives à mettre en œuvre.

Tableau 17 : Qualification d'aléa de liquéfaction avec les mesures de prévention et dispositions constructives correspondantes d'après le guide PPR sismique (Fabriol et Garry, 2002).

Pour les études récentes aux Antilles françaises, la qualification de l'aléa repose sur des critères de valeurs de l'indice I_L (Tableau 16). **Cette qualification peut être reprise sans modification pour l'instruction d'un PPR sismique.** Par exemple, pour Fort-de-France, l'étude sur la liquéfaction de Vanoudheusden *et al.* (2011) est d'une grande utilité dans la mesure où la cartographie et la qualification d'aléa reposent sur l'intensité de liquéfaction I_L .

Pour les études plus anciennes, la qualification d'aléa repose sur des études de niveau A. Il serait souhaitable de disposer d'informations plus récentes et plus précises que celles des microzonages et reposant sur une méthodologie de niveau B ou C selon la définition du guide AFPS 1993.

La cartographie de l'aléa liquéfaction sur la commune du Gosier est présentée sur la Figure 15. Reposant sur des critères de valeurs de l'indice I_L , la qualification de l'aléa liquéfaction peut être reprise sans modification pour l'instruction d'un PPR sismique.

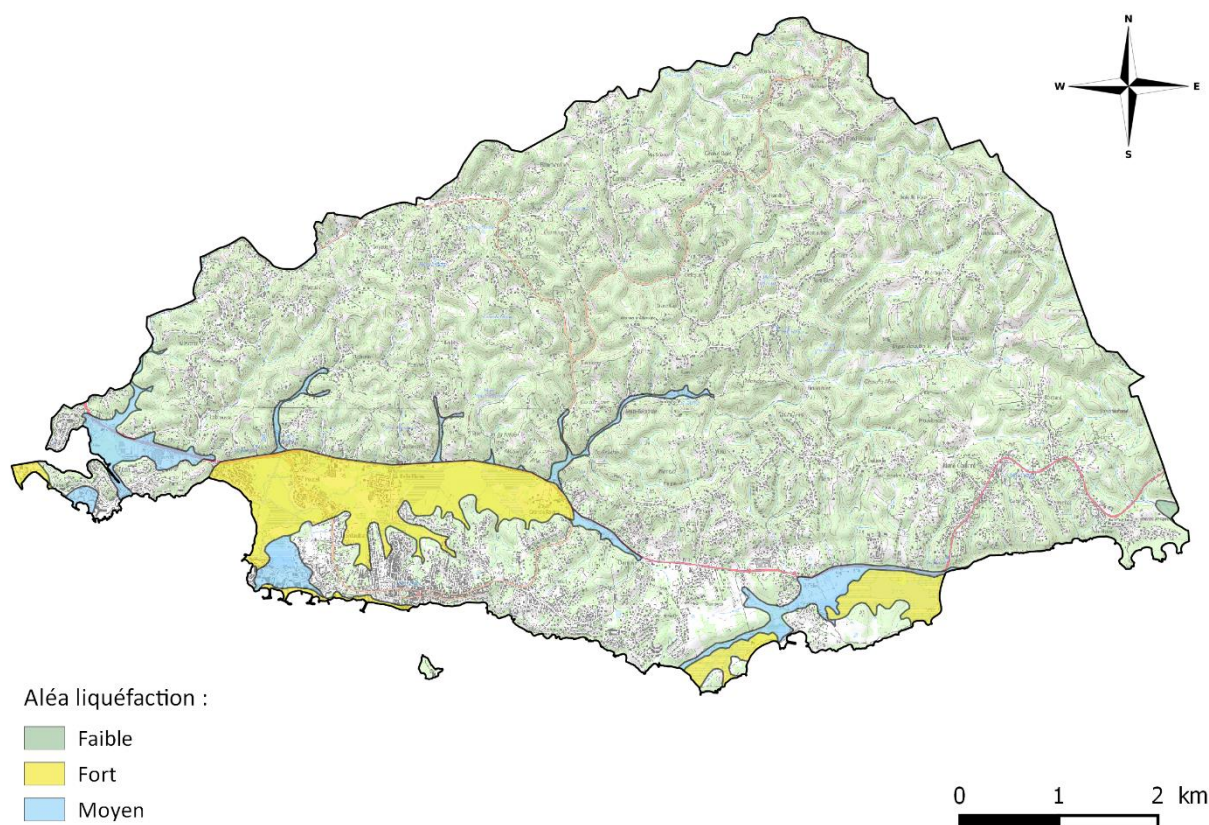
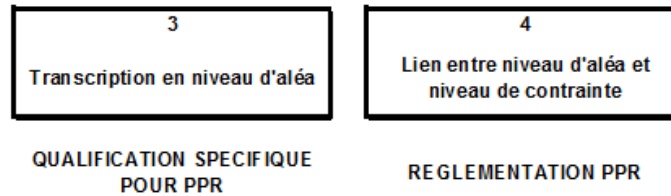


Figure 15 : Cartographie de l'aléa liquéfaction sur la commune de Gosier. (Belvaux et la., 2020a modifié d'après Bengoubou-Valerius et al., 2013)

8. Croisement des aléas sismiques pour l'établissement de la carte réglementaire



Jusqu'à la fin de l'étape 3 de la méthodologie, chaque aléa (effets de site lithologiques et topographiques, rupture en surface de faille active et liquéfaction) a été examiné **séparément et indépendamment du type d'enjeu** (catégorie de bâtiment ou type d'occupation de sol).

Le plan de zonage réglementaire doit permettre de savoir en tout point de la commune quel niveau de contrainte et quel type de prescription spécifique sont applicables. A cette étape deux niveaux de croisements d'informations sont nécessaires :

- le croisement entre niveau d'aléa et contraintes de prescriptions ;
- le croisement des aléas en chaque point du territoire

Le plan de zonage réglementaire est une carte unifiée qui illustre ce double croisement. Se rajoutent ensuite des natures de prescriptions qui peuvent éventuellement différer en fonction du type d'enjeu.

8.1. CROISEMENT ENTRE NIVEAU D'ALEA ET CONTRAINTES DE PRESCRIPTIONS

Ce premier croisement consiste à établir un principe général de règlement pour chaque aléa. Chaque aléa possible est passé en revue. On regarde tout d'abord si ce phénomène est présent ou non sur le territoire de la commune. S'il est présent, on identifie quels sont les niveaux d'aléa possibles sur le territoire. Pour chaque niveau d'aléa on évalue s'il y a des prescriptions courantes à rappeler, des niveaux de contraintes spécifiques et quel code de couleur associer dans le PPRS.

Le

Enjeux	Phénomène naturel	Type d'aléa	Niveau de contrainte	Zone
tous	rupture de faille	aléa faible	courante	non coloré
		aléa moyen	moyenne	bleu
	effets de site lithologique	aléa nul	non présent	non présent
		aléa faible (GT4)	faible	beige
		aléa moyen (GT1, GT2, GT3)	moyenne	bleu

	effets de site topographique	zones susceptibles	courante	non coloré
	liquéfaction	aléa faible	modérée	bleu clair
		aléa moyen	moyenne	bleu
		aléa fort	moyenne	bleu

Tableau 18 montre le principe de règlement proposé pour la commune du Gosier. La première colonne (Phénomène naturel) liste tous les aléas, présents ou non sur la commune. La seconde colonne indique les niveaux d'aléa possibles sur la commune. Les troisième et quatrième colonnes indiquent les niveaux de contraintes et codes de couleurs associés.

Pour l'aléa faible « rupture de faille » et les effets de site topographiques, les contraintes sont dites « courantes ». Il n'y a pas de prescription spécifique associée à ce niveau d'aléa : juste un affichage pour information et un rappel, si elles existent, des recommandations courantes et des dispositions de la réglementation nationale pour ce phénomène. Sur le plan de zonage, la zone correspondante ne sera pas colorée (mention « non coloré » dans les tableaux).

Enjeux	Phénomène naturel	Type d'aléa	Niveau de contrainte	Zone
tous	rupture de faille	aléa faible	courante	non coloré
		aléa moyen	moyenne	bleu
	effets de site lithologique	aléa nul	non présent	non présent
		aléa faible (GT4)	faible	beige
		aléa moyen (GT1, GT2, GT3)	moyenne	bleu
	effets de site topographique	zones susceptibles	courante	non coloré
	liquéfaction	aléa faible	modérée	bleu clair
		aléa moyen	moyenne	bleu
		aléa fort	moyenne	bleu

Tableau 18 : Principe proposé pour la détermination des zones du plan de zonage de la commune de Gosier, Guadeloupe (Belvaux et al., 2020a)

Les prescriptions des PPRS ne sont pas forcément identiques entre la Guadeloupe et la Martinique (par exemple un aléa moyen « effet de site lithologique » peut être en prescription modérée dans un cas, en prescription limitée dans l'autre).

Il en est d'ailleurs de même pour les codes de couleurs qui restent en cohérence avec le PPR multi-aléas d'une même commune (et donc pas forcément identiques entre les PPR sismiques de Guadeloupe et de Martinique).

8.2. CROISEMENT DES ALEAS POUR LA CARTE REGLEMENTAIRE

Le croisement des aléas ne concerne que ceux présentant un niveau de contrainte faible moyen ou fort. Les zones ne faisant l'objet d'aucune prescription spécifique autre que le rappel des prescriptions courantes (comme par exemple l'effet de site topographique sur le

Enjeux	Phénomène naturel	Type d'aléa	Niveau de contrainte	Zone
tous	rupture de faille	aléa faible	courante	non coloré
		aléa moyen	moyenne	bleu
	effets de site lithologique	aléa nul	non présent	non présent
		aléa faible (GT4)	faible	beige
		aléa moyen (GT1, GT2, GT3)	moyenne	bleu
	effets de site topographique	zones susceptibles	courante	non coloré
	liquéfaction	aléa faible	modérée	bleu clair
		aléa moyen	moyenne	bleu
		aléa fort	moyenne	bleu

Tableau 18) ne sont pas prises en compte (« non coloré »).

Lorsque plusieurs aléas sont présents sur un même périmètre, c'est le niveau de contrainte le plus élevé qui est pris en compte dans le plan de zonage.

Pour la commune de Gosier, le croisement concerne les aléas effets de site lithologiques, liquéfaction et rupture en surface (Figure 16).

Le principe de règlement peut aussi être présenté de façon plus complexe en effectuant un croisement supplémentaire en fonction des enjeux exposés. Le mode de croisement retenu en vue de la définition du règlement PPRS sur chacun des territoires est issu d'échanges entre le prestataire et les DEAL ; les DEAL ayant le souci d'assurer une cohérence entre ces nouveaux PPRS et les PPR multi-aléas récemment révisés, le prestataire pouvant proposer une démarche homogène entre la Guadeloupe et la Martinique. La représentation finale des règlements dans les documents de PPRS constitue donc un compromis entre ces deux tendances.

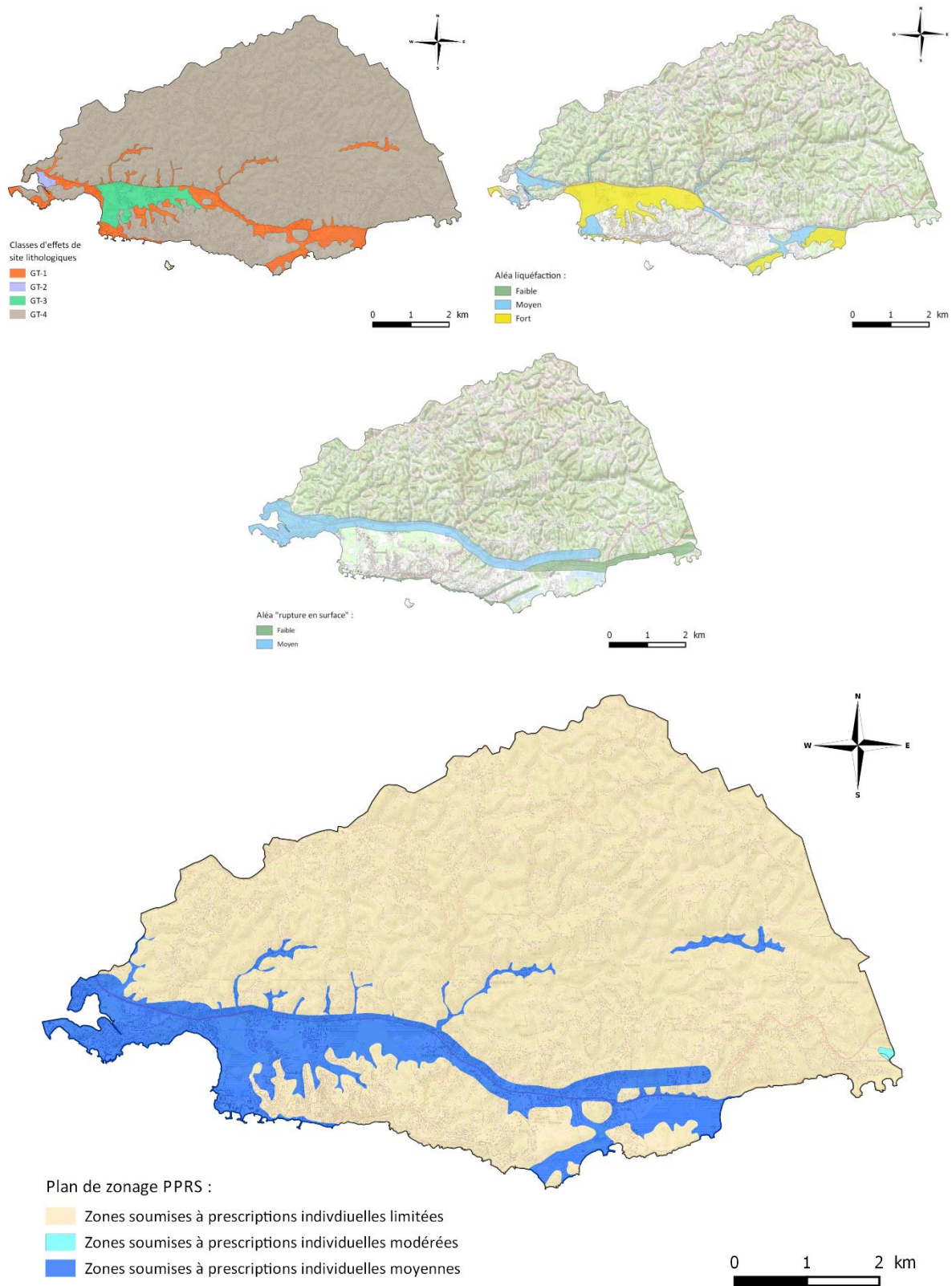


Figure 16 : Croisement des aléas et plan de zonage PPRS pour la commune du Gosier (Belvaux et al., 2020a - rapport de présentation du PPRS de la commune de Gosier).

8.3. HARMONISATION DES LIMITES DE POLYGONES

Dans tous les cas, le croisement cartographique des différentes composantes de l'aléa sismique (effets de site lithologiques, rupture de faille en surface et liquéfaction) nécessite une harmonisation des limites de polygones associés à chaque aléa. Cela permet d'éviter la présence sur la carte finale d'une multitude de polygones isolés de petite dimension. Ces harmonisations de limites sont à examiner au cas par cas.

Ce travail d'harmonisation de limites cartographiques est plus ou moins complexe en fonction de l'ancienneté des études de microzonages sismiques. En effet :

- dans les microzonages récents (à partir des années 2005-2008), une attention particulière est portée sur l'adéquation entre les polygones délimitant les zones susceptibles à la liquéfaction et les polygones délimitant les zones susceptibles de subir un effet de site lithologique. Avec des moyens de reconnaissance plus performants et surtout mutualisés entre les parties d'analyses géophysique et géotechnique dans les dernières études de microzonage, il est devenu possible de réaliser des « zonages géotechniques » des terrains qui gouvernent les phénomènes locaux causés par les séismes.
- *a contrario*, les méthodes employées dans les microzonages plus anciens, jusqu'au milieu des années 2000, n'ont pas forcément suivi cette logique. Très souvent, la succession d'études distinctes s'intéressant à différents effets du séisme n'a pas permis d'obtenir une cohérence suffisante entre les cartographies des différentes composantes de l'aléa.

Parmi les quatre communes concernées par les projets de PPRS, seule la commune du François bénéficiait d'éléments cartographiques SIG parfaitement harmonisés.

Pour les trois autres communes, le croisement des couches SIG entre elles, notamment la couche « effets de site » avec la couche « liquéfaction », faisait apparaître des zones très morcelées en de multiples polygones de petites dimensions, sur lesquelles un important travail de retraçage était à effectuer.

De plus, notons la particularité de la commune de Baie-Mahault pour laquelle la moitié Est du territoire avait fait l'objet d'un des premiers microzonages sismiques de la Guadeloupe (Monge *et al.*, 1998), tandis que la moitié Ouest a été traitée en 2009 avec la commune voisine du Lamentin (Bertil *et al.*, 2009). La Figure 17 présente la source et le contenu des études techniques à l'origine des cartographies exploitées dans le PPRN et le projet de PPRS pour Baie-Mahault.

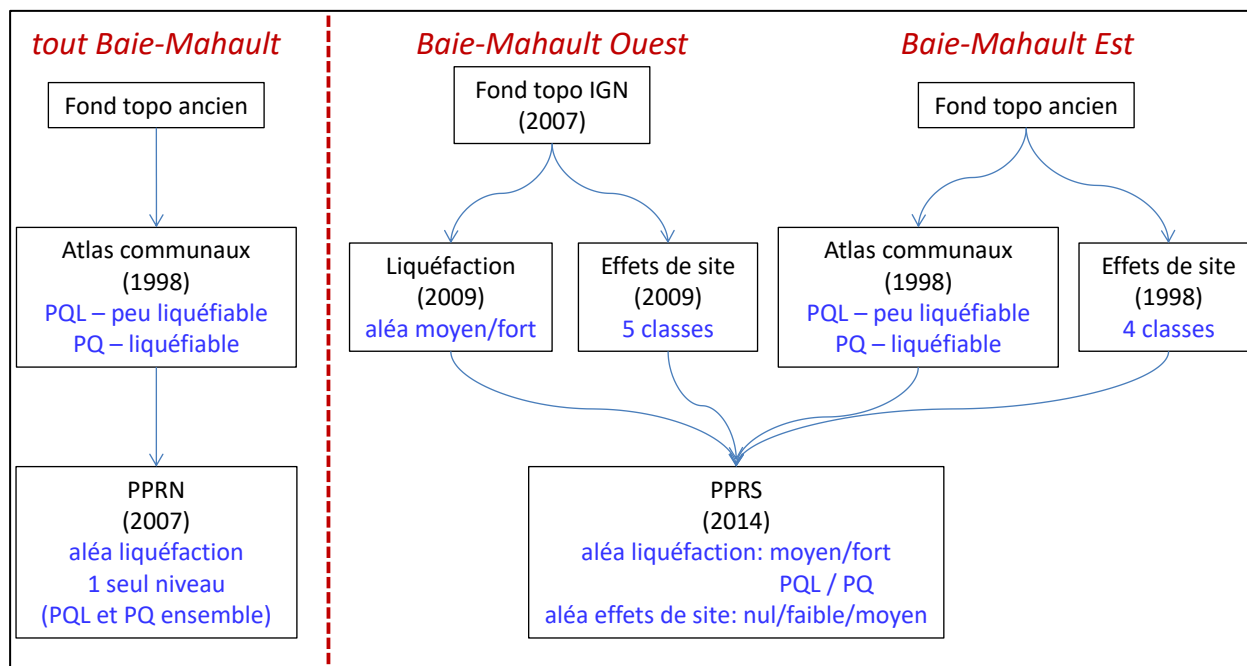


Figure 17 : Nature des fonds topographiques et des études techniques à la base des cartographies réglementaires proposées dans les PPR pour la commune de Baie-Mahault.

Le travail qui consiste à modifier les tracés des polygones définissant les aléas « effets de site » ou « liquéfaction », pour obtenir par la suite une couche SIG exploitable en tant que zonage réglementaire, doit être réalisé à deux niveaux :

- un niveau purement de tracé, qui consiste à s'affranchir des polygones de petite dimension qui n'ont pas de signification physique (Figure 18).
- un niveau de caractérisation physique, lorsqu'on est en présence d'incohérences physiques. Par exemple, un même polygone peut afficher d'une part un aléa liquéfaction, qu'il soit faible, moyen ou fort, et d'autre part, un aléa effet de site nul ou faible, correspondant à des terrains plutôt raides voire de nature rocheuse. C'est un cas qui a été rencontré très souvent, en particulier sur Fort-de-France et sur Le Gosier. Dans l'exemple de la Figure 19, les 3 polygones signalés par un cercle bleu ne peuvent manifestement pas être classés à la fois en FdF7 (rocher) et en aléa liquéfaction fort, moyen ou faible. Considérant une meilleure fiabilité dans l'étude de liquéfaction de 2011 (Vanoudheusden *et al.*, 2011) que dans le microzonage sismique de 1996 (Chassagneux *et al.*, 1996), les modifications ont été effectuées en privilégiant l'information la plus récente, à savoir :
 - o polygone jaune-gris : reclassement en FdF6,
 - o polygone orange : reclassement en FdF4,
 - o polygone rouge : reclassement en FdF4,
 - o polygone gris : aucune modification.

Par la même occasion, les polygones voisins sont dans cet exemple également vérifiés afin d'assurer la cohérence entre les caractéristiques d'aléa liquéfaction et d'aléa effets de site. En général, les modifications effectuées dans la couche « plan de zonage » n'ont pas été reportées dans la couche « effets de site lithologiques ».

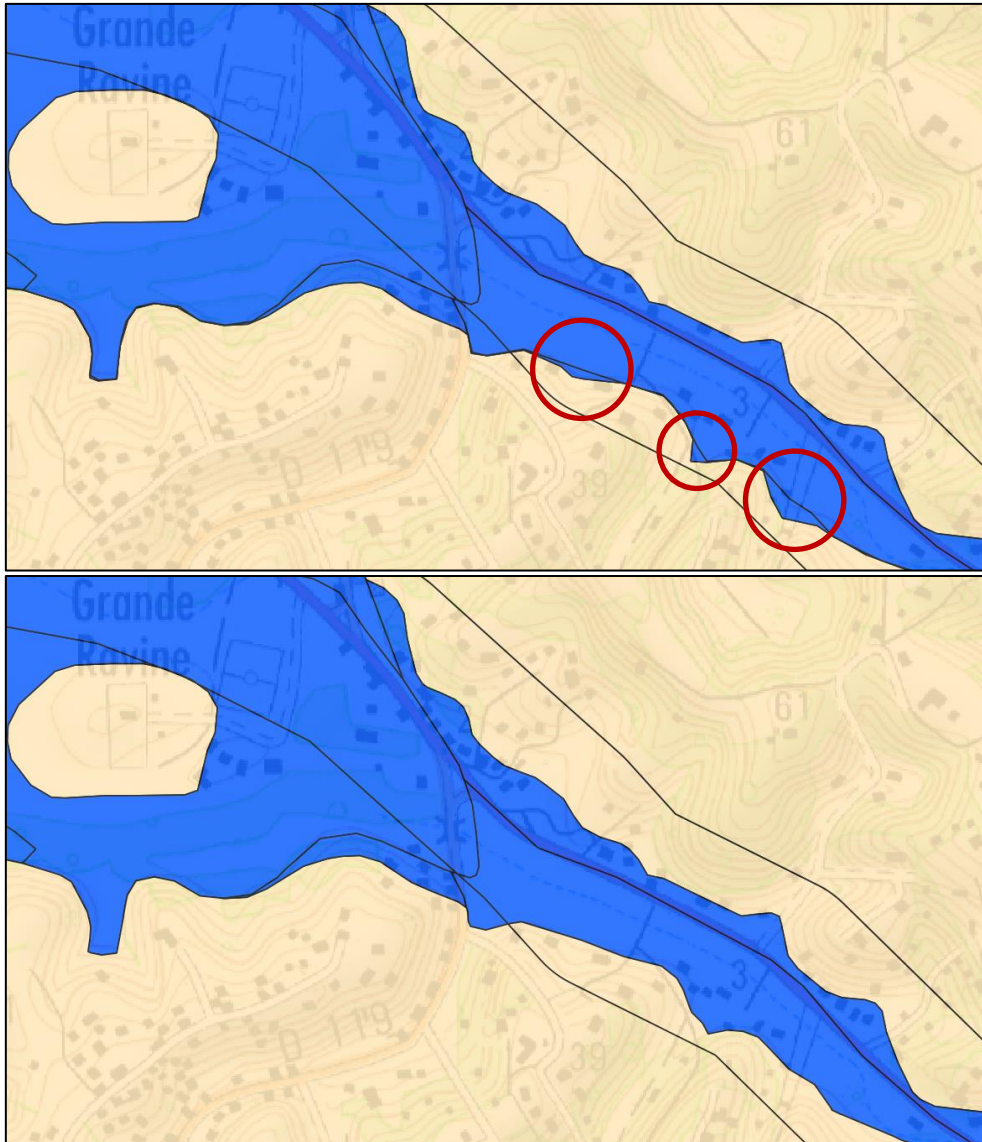


Figure 18 : Résultat du croisement des aléas « rupture en surface », « effet de site lithologique » et « liquéfaction » sur une portion de la commune du Gosier. Un nettoyage des polygones de petite surface est nécessaire.

A cela s'ajoutent d'autres améliorations de tracés de limites de polygones comme par exemple, le fait de mieux adapter certains contours à la topographie du terrain ou d'arrondir des contours trop anguleux (par exemple, cela mériterait d'être fait sur la limite Nord du polygone jaune de la Figure 19).

La majeure partie de ces corrections ont été réalisées sur les différentes couches SIG fournies dans le cadre du projet. Cependant le travail n'est pas complet dans la mesure où ces aspects très techniques n'avaient pas été envisagés au début du projet et qu'ils ne figuraient donc pas dans le cahier des charges initial. Le jour où les plans de zonage réglementaires seront rendus officiels dans un document définitif de PPRS, il sera indispensable de faire vérifier la qualité des couches SIG par un Service dédié à la géomatique. **Pour la Guadeloupe, ce travail d'actualisation des bases de données cartographiques associées au PPRS des communes pilotes de Gosier et de Baie Mahault a été fait en 2020.**

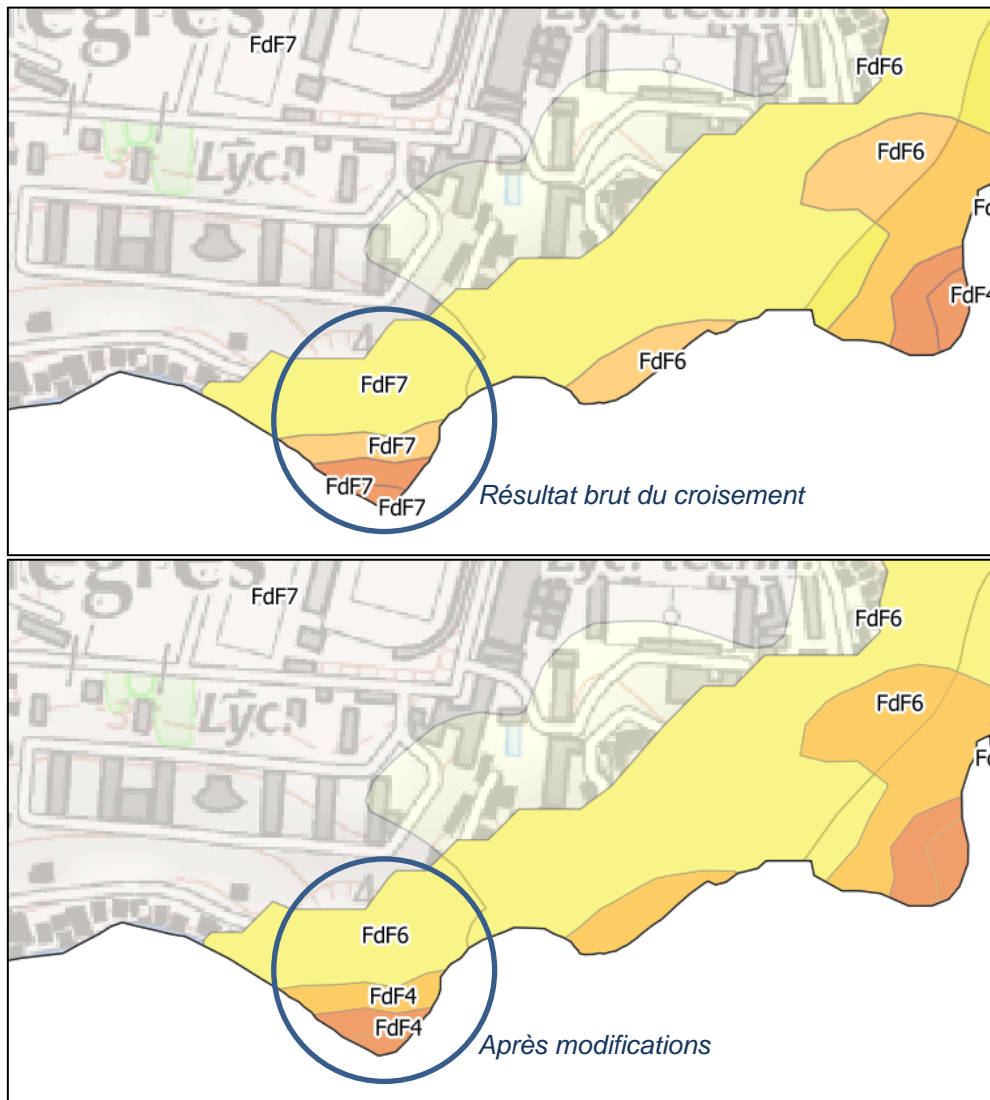


Figure 19 : Exemple de modifications des champs de la couche SIG de la carte réglementaire de Fort-de-France.

9. Conclusions

Afin de faciliter l'exploitation des documents de microzonages sismiques en vue de la mise en place de PPR sismiques aux Antilles françaises, un support technique est fourni aux DEAL de Guadeloupe et de Martinique, sous forme de guide méthodologique, en 2015.

En 2020 la DEAL Guadeloupe a sollicité le BRGM pour actualiser et consolider les différents rapports et jeux de données associés à l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Sismiques en Guadeloupe (Baie-Mahault et Gosier).

Ce travail a aussi nécessité d'actualiser et de consolider ce guide méthodologique d'exploitation des microzonages sismiques pour la transcription dans les PPR sismiques aux Antilles françaises.

La méthodologie générale de transcriptions des microzonages sismiques en PPRS comporte cinq étapes :

L'étape 1 consiste à rechercher comment est défini le phénomène pour chaque aléa dans le document de microzonage sismique.

L'étape 2 analyse les effets possibles de chaque phénomène sur la construction. En fonction du type de phénomène, cette qualification d'impact peut être directement indiquée dans le document d'étude : par exemple l'aléa liquéfaction lorsque l'évaluation en aléa faible/moyen/fort provient de critères quantitatifs sur l'indice de liquéfaction I_L . Dans d'autres cas, comme l'effet de site lithologique, cette qualification d'impact n'est pas clairement mentionnée. Dans ce cas une étape de transcription (étape 3) est nécessaire.

L'étape 3 consiste à transcrire l'impact évalué en étape 2 en définition de niveau d'aléa selon les spécifications demandées pour un PPR : niveau d'aléa faible, moyen, fort correspondant à un risque de dommage limité à important.

L'étape 4 croise les aléas et indique les principes généraux de prise en compte des niveaux d'aléa dans le plan de zonage réglementaire. Elle définit le niveau des prescriptions que l'on souhaite appliquer.

L'étape 5 décline pour chaque phénomène et en fonction des enjeux la nature des prescriptions, en veillant à ce qu'elles soient cohérentes d'un phénomène à l'autre.

L'analyse du microzonage en vue d'un PPR se termine à l'étape 3. La mise en œuvre du PPR, les concertations et discussions sur les mesures à appliquer ne débutent qu'à l'étape 4.

Les étapes 1 à 4 sont décrites pour les aléas concernés : rupture en surface de faille active, effets de site lithologiques, effets de site topographiques et aléa liquéfaction.

L'objectif de ce guide est d'explicitier le contenu technique des études de microzonage sismique et d'aider à l'analyse pour définir les niveaux d'aléa selon des critères qui sont propres aux PPRS comme par exemple les niveaux d'impact sur les bâtiments pour une période de retour de référence de 475 ans sur laquelle repose la réglementation nationale. Le croisement avec les enjeux exposés et la nature des prescriptions à appliquer (étape 5) forment l'étape finale du PPR mais sortent du cadre de ce guide méthodologique.

10. Bibliographie

AFNOR (1995) - Règles de construction parasismique : règles PS applicables aux bâtiments, dites règles PS92. AFNOR, Paris, norme française NF P 06-013 décembre 1995 amendée A1 février 2001 et A2 novembre 2004.

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

AFNOR (2005b) - Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 5 : fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques (P 06-035-1), AFNOR, Paris, norme française NF En 1998-5 septembre 2005.

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

AFPS (2004) - Guide de construction parasismique des maisons individuelles aux Antilles dit « Guide CP-MI Antilles » (2004), Recommandations AFPS Tome IV, 144 p.

Auclair S., Abad J., Barras A.V., Belvaux M., Bertil D., Le Moigne B., Monfort-Clement D., Vanoudheusden E. (2011) – Microzonage sismique de la commune du François (Martinique). Rapport BRGM/RP-60016-FR, 148 p.

Belvaux M., Bertil D., Nachbaur A. (2020a) – Plan de Prévention des Risques Sismiques – commune du Gosier (Guadeloupe). Rapport de présentation et Règlement. BRGM/RP-64193-FR.

Belvaux M., Bertil D., Nachbaur A. (2020b) – Plan de Prévention des Risques Sismiques – commune de Baie-Mahault (Guadeloupe). Rapport de présentation et Règlement. BRGM/RP-64192-FR.

Belvaux M., Nachbaur A., Bertil D. (2014a) – Plan de Prévention des Risques Sismiques – commune de Fort-de-France (Martinique). Rapport de présentation et Règlement. BRGM/RP-64190-FR.

Belvaux M., Nachbaur A., Bertil D. (2014b) – Plan de Prévention des Risques Sismiques – commune du François (Martinique). Rapport de présentation et Règlement. BRGM/RP-64191-FR.

Bengoubou-Valérius M., Roullé A., M., Agastin, Bourdon E., Monfort-Clement D., Bertil D., Noury G., Terrier M., 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.

Bengoubou-Valérius M., Roullé A., M., Agastin, Bourdon E., Noury G., Monfort-Clement D., Terrier M., Bertil D., Auclair S., Ducreux L., Abad J., Bayle E., Samyn K. (2013) – Microzonage sismique de la commune du Gosier (Guadeloupe). Rapport final. BRGM/RP-61986-FR, 109 p., 42 fig., 15 tab., 4 ann.

Bertil D., Roullé A., Mompelat J.M., Auclair S., Bengoubou-Valérius M., Bitri A., Chauvet M., Gehl P., Imbault M., Negulescu C., Samyn K., Vanoudheusden E., Vermeersch F. (2009) – Microzonage sismique des communes de Baie-Mahault et Lamentin (Guadeloupe). Rapport BRGM/RP-57487-FR, 174 p.

Chassagneux D., Martin C., Monge O., Samarcq F., Sedan O. (1996) - Microzonage sismique des communes de Schoelcher, Fort-de-France et Le Lamentin : effets de site et liquéfaction. Rapport BRGM R39186, 93p.

CEPPRS (2010) - Comité d'Évaluation des Plans de Prévention du Risque Sismique. Fiches thématiques. http://www.planseisme.fr/IMG/pdf/fiches_ceprs_novembre2010.pdf

DHUP (2020) - Guide de construction parasismique des maisons individuelles – DHUP CPMI-EC8 zone 5 édition 2020.

Fabriol H., Garry G. (2002) - Plan de prévention des risques naturels (PPR) : Risques sismiques - Guide méthodologique, La Documentation Française, 112 p., ISBN 2-11-005156-6.

Feuillet N., Beauducel F., Tapponnier P. (2011) - Tectonic context of moderate to large historical earthquakes in the Lesser Antilles and mechanical coupling with volcanoes, *J. of Geophys. Res.*, 116, B10308, doi:10.1029/2011JB008443.

IBC (2009) - International Building Code. International Code Council, ICC, 4051 West Flossmoor Road, Country Club Hills, Il. 60478, USA, 1ST printing, 650p.

Monge O., Vermeersch F., Martin C. (1998) – Microzonage sismique de l'agglomération pointoise : extension aux communes des Abymes et du Gosier et homogénéisation. Rapport BRGM/RP-39213-FR, 78 p.

SISFRANCE (2009) - Base de données SisFrance des séismes historiques (www.sisfrance.net). BRGM, EDF, IRSN.

Terrier M., Combes Ph., coll. 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 p.

Terrier M., Belvaux M., de Michele M., Monfort-Climent D., Sedan O. (2010) – Failles actives et PPR sismique : analyse en retour, calcul des sur-dommages. Rapport final BRGM/RP -59269-FR, 128p.

Vanoudheusden E., Abad J. et Noury G. (2011) - Évaluation et prévention des risques de liquéfaction sur la commune de Fort-de-France (Martinique) – Rapport des phases 2, 3 et 4. Rapport BRGM RP-60143-FR, 141 p.

Wells, D.L. and Coppersmith, K.J. (1994) - New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 84: 974-1002.

Annexe 1

Paragraphe pour l'aléa régional

Les lignes surlignées en jaune sont à adapter en fonction de la commune.

Paragraphe « Principaux Séismes connus » pour la Guadeloupe

La Guadeloupe appartient à l'arc des Petites Antilles, qui correspond à une situation géodynamique particulière résultant de l'affrontement de la plaque Amérique et de la plaque Caraïbes, la première plongeant sous la deuxième à une vitesse moyenne d'environ 2 cm/an. Cette confrontation (subduction) est responsable d'une forte activité sismique, dont les exemples historiques sont nombreux.

La sismicité 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 interfaces (à l'interface des plaques Caraïbes et Amérique à une profondeur ne dépassant pas 40-50 km) des séismes intraplaques (dans la plaque Amérique, pour des profondeurs entre 50 et 200 km) ;
- Les séismes superficiels crustaux intraplaques Caraïbe (profondeur inférieure à 20 km).

L'activité sismique y est particulièrement intense, et de nombreux séismes destructeurs ont affecté les îles des Antilles françaises. La base de données nationale des séismes historiques, Sisfrance/Antilles (BRGM, 2009), recense 21 séismes ayant été ressentis en Guadeloupe avec une intensité supérieure ou égale à VI MSK (Tableau 19).

Elaborée à partir de la base Sisfrance/Antilles (BRGM, 2009), la carte de la Figure 20 indique les épicentres des séismes connus ayant produit des intensités épicentrales estimées à VI ou plus sur les Antilles françaises.

La commune du Gosier a été particulièrement affectée par les séismes de 1843 (Intensité VIII), 1897 (Intensité VII) et 1974 (Intensité VI). Les intensités données sont les intensités ressenties à Gosier.

L'ensemble du territoire communal est concerné par les effets directs potentiellement destructeurs d'un séisme majeur.

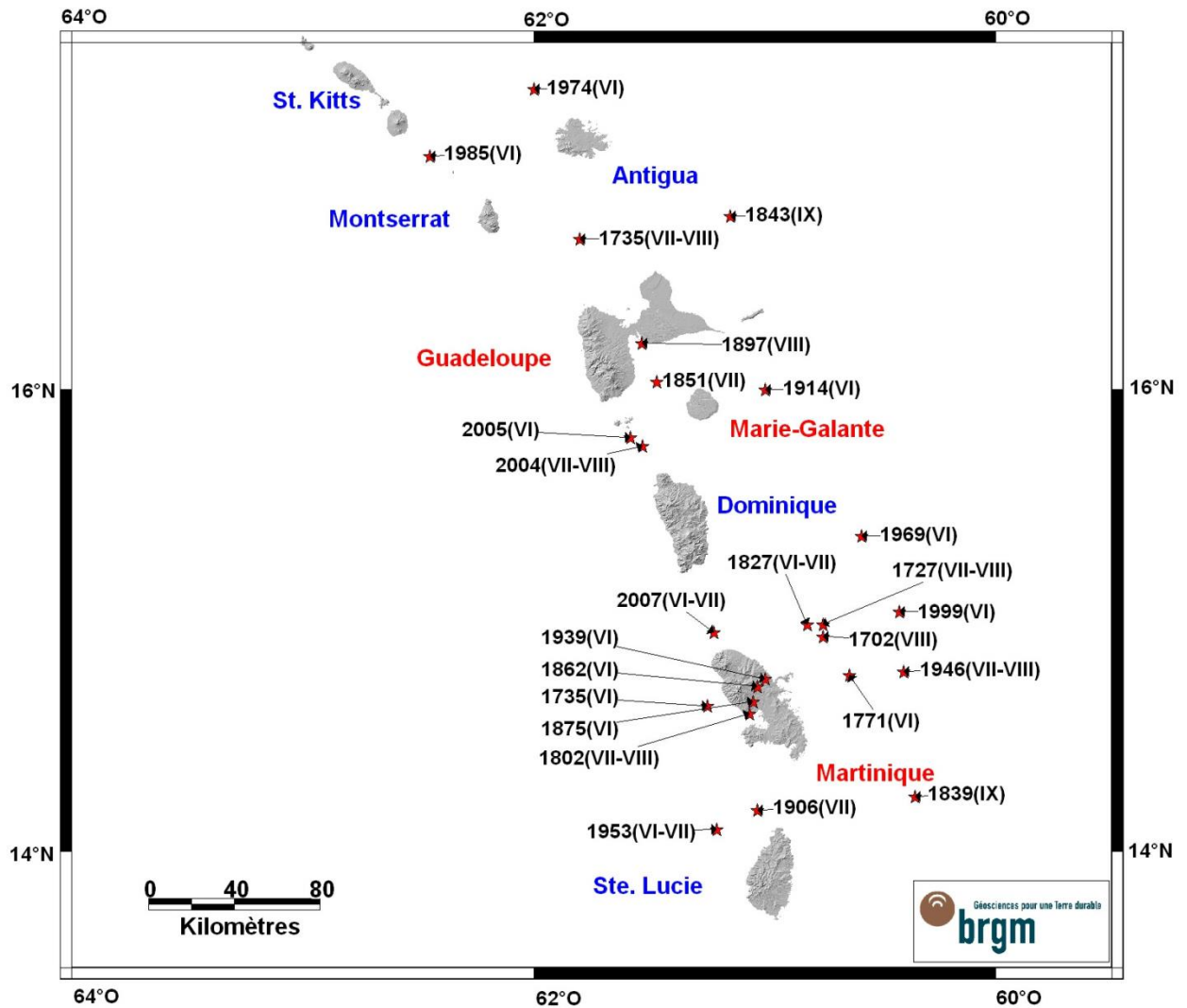


Figure 20 : Principaux séismes ayant produit des intensités VI ou plus sur la Guadeloupe ou sur la Martinique. L'intensité indiquée entre parenthèse est l'intensité maximale ressentie sur une des deux îles (d'après SisFrance/Antilles, BRGM, 2009).

Date	Région épicentrale	Intensité maximale en Guadeloupe	Commune
27 Juillet 1735	Nord de la Guadeloupe	VII-VIII	Petit-Bourg, Pointe-Noire
11 Janvier 1839	Subduction à l'Est de la Martinique	VI	Pointe -à-Pitre
8 février 1843	Subduction au Nord-Est de la Guadeloupe	IX	en Grande Terre et Petit Bourg
5 avril 1843	réplique du 8 février 1843	VI	Pointe -à-Pitre
11 mai 1843 06 h	réplique du 8 février 1843	VI	Pointe -à-Pitre
11 mai 1843 23 h	réplique du 8 février 1843	VI	Pointe -à-Pitre
27 mai 1843	réplique du 8 février 1843	VI	Pointe -à-Pitre
24 juin 1843	réplique du 8 février 1843	VI	Pointe -à-Pitre
17 décembre 1845	Guadeloupe ? (épicentre indéterminé)	VI-VII	Pointe -à-Pitre
16 mai 1851	Guadeloupe (Capesterre-Belle-Eau)	VII	Capesterre-Belle-Eau
9 juin 1870	Dominique ? (épicentre indéterminée)	VI-VII	Basse-Terre, Capesterre-Belle-Eau
29 avril 1897	Guadeloupe (Petit-Cul-de-Sac-Marin)	VIII	Pointe-à-Pitre
20 mai 1897	Réplique du 29 avril 1897	VI	Pointe-à-Pitre
3 octobre 1914	Subduction à l'Est de Marie Galante	VI	Pointe-à-Pitre
13 novembre 1966	Au Nord de la Guadeloupe (Subduction ?)	VI	Abymes, Pointe-à-Pitre, Le-Moule, Anse-Bertrand
24 décembre 1967	A l'Est d'Antigua	VI	Abymes, Pointe-à-Pitre
25 décembre 1969	Subduction à l'Est de la Dominique	VI	Capesterre-Marie-Galante, Pointe-à-Pitre, Lamentin, Morne-à-l'Eau, Petit-Bourg
8 octobre 1974	Nord-Ouest d'Antigua	VI	de Basse-Terre à Anse-Bertrand
16 mars 1985	Nord de Montserrat	VI	Pointe-à-Pitre
21 novembre 2004	Sud-Est des Saintes	VII-VIII	Terre-de-Haut
14 février 2005	Sud-Est des Saintes	VI	Terre-de-Bas

Tableau 19 : Principaux séismes destructeurs en Guadeloupe (d'après SisFrance/Antilles, BRGM, 2009).

Paragraphe « Principaux Séismes connus » pour la Martinique

La Martinique appartient à l'arc des Petites Antilles, qui correspond à une situation géodynamique particulière résultant de l'affrontement de la plaque Amérique et de la plaque Caraïbes, la première plongeant sous la deuxième à une vitesse moyenne d'environ 2 cm/an. Cette confrontation (subduction) est responsable d'une forte activité sismique, dont les exemples historiques sont nombreux.

La sismicité 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 interfaces (à l'interface des plaques Caraïbes et Amérique à une profondeur ne dépassant pas 40-50 km) des séismes intraplaques (dans la plaque Amérique, pour des profondeurs entre 50 et 200 km) ;
- Les séismes superficiels crustaux intraplaques Caraïbe (profondeur inférieure à 20 km).

L'activité sismique y est particulièrement intense, et de nombreux séismes destructeurs ont affecté les îles des Antilles françaises. La base de données nationale des séismes historiques, Sisfrance/Antilles (BRGM, 2009), recense 28 séismes ayant été ressentis en Martinique avec une intensité supérieure ou égale à VI MSK (Tableau 20).

Les séismes majeurs connus ayant fortement affecté la Martinique avec une intensité estimée à au moins VIII (source Sisfrance/Antilles) sont ceux de Septembre 1702 et du 11 Janvier 1839. Celui de 1839 est le plus fort séisme connu en Martinique (Intensité épiscopale VIII à IX, au moins 300 morts). Sa magnitude est estimée à 7,5 ; une étude récente de Feuillet *et al.* (2011) réévalue les magnitudes des plus forts séismes antillais, à 8,0 pour celui de 1839.

Les séismes des 7 novembre 1727, 16 Juin 1802, 30 novembre 1827 et 21 Mai 1946 ont également été particulièrement destructeurs avec des intensités jusqu'à VII-VIII en Martinique. Parmi les autres séismes plus récents, citons celui du 29 novembre 2007 (M=7,4, intensité VI-VII en Martinique), séisme de subduction à 150 km de profondeur.

Elaborée à partir de la base Sisfrance/Antilles (BRGM, 2009), la carte de la Figure 20 indique les épicentres des séismes connus ayant produit des intensités épiscopales estimées à VI ou plus sur les Antilles françaises.

La commune du François a été particulièrement affectée par les séismes de 1839 (Intensité IX), 1906 (intensité VII), 1999 (intensité VI) et 2007 (intensité VI-VII). Les intensités données sont les intensités ressenties au François. L'ensemble du territoire communal est concerné par les effets directs potentiellement destructeurs d'un séisme majeur.

Date	Région épiscopale	Intensité maximale en Martinique	Commune
septembre 1702	Nord-Est de la Martinique	VIII	Fort de France
7 novembre 1727	Nord Est de la Martinique	VII-VIII	Saint-Pierre - Fort de France
30 mars 1735	Crise martiniquaise	VI	Fort de France
14 mai 1762	Martinique	VI	Saint Pierre
16 février 1771	Est de la Martinique	VI	Fort de France
20 juillet 1787	Martinique (Epicentre indéterminé)	VII	Saint Pierre
16 juin 1802	Martinique (Epicentre indéterminé)	VII-VIII	Fort de France
12 août 1826	Nord Martinique	VI	Saint Pierre
30 novembre 1827	Nord Est de la Martinique	VI-VII	Fort de France
11 Janvier 1839	Subduction à l'Est de la Martinique	IX	Fort de France
8 février 1843	Subduction Nord Est Guadeloupe	VII	Fort de France
24 février 1858	Nord Martinique	VI	Fort de France, Saint Pierre
19 décembre 1862	Centre Martinique	VI	Fort de France, Sainte Marie
8 juin 1870	Sud-Ouest de Sainte Lucie	VI	Saint Pierre
9 juin 1870	Dominique ? (épiscetre indéterminé)	VI	Le Prêcheur, Le Robert, Le Lorrain*
17 septembre 1875	Martinique	VI	Fort de France, Saint-Pierre
16 février 1906	Nord de Sainte Lucie	VII	Le François, Rivière-Salée
17 avril 1914	Martinique	VI	Fort de France
21 juin 1935	Sud Martinique	VI	Rivière Pilote
17 mars 1939	Centre Martinique	VI	Gros Morne, Sainte Marie
21 mai 1946	Martinique	VII-VIII	Le Lorrain, Basse Pointe
19 mars 1953	Ouest de Sainte Lucie	VI-VII	Fort de France
19 mars 1968	Nord Est Martinique	VI	Fort de France
25 décembre 1969	Subduction à l'Est de la Dominique	VI	Fort de France
7 septembre 1974	Est de la Martinique	VI	Fort de France, Trinité
20 janvier 1982	Sud Martinique	VI-VII	Fort de France
8 juin 1999	Nord-Est de la Martinique	VI	Basse Pointe, Le François, Le Lorrain
29 novembre 2007	Nord de la Martinique (Subduction)	VI-VII	Fort de France

Tableau 20 : Principaux séismes destructeurs en Martinique (d'après SisFrance/Antilles, BRGM, 2009).

Annexe 2

Qualification des sols à effets de site

Critères de qualification d'impact de l'effet de site lithologique sur les bâtiments

Portance	faible à moyenne	CPMI F1,F2 ou F3	VS30 <250	Liq. moyen à fort
	moyenne à bonne	CPMI F4,F5,F6,F7	VS30 250-600	Liq. faible
	bonne	CPMI F8,F9	Vs30>600	Liq. négligeable

Effet de site bâtiment de faible hauteur	faible à moyen	Fa < 1.3
	moyen à fort	Fa 1.3 à 1.7
	fort	Fa > 1.7

Effet de site bâtiment de grande hauteur	faible à moyen	Fv < 1.5
	moyen à fort	Fv 1.5 à 2.5
	fort	Fv > 2.5

Critère de qualification de niveau d'aléa pour une transposition en PPRS

Niveau d'aléa	Fa - Effets de site sur bâtiment rigide ou de faible hauteur	Fv - Effets de site sur bâtiment souple ou de grande hauteur	Portance du sol de fondation
Nul (rocher)	Nul	Nul	Bonne
Faible	Faible à moyen ou moyen à fort	Faible à moyen ou moyen à fort	Moyenne à bonne
moyen	Fort	Fort	Faible à moyenne

Application des critères sur Le François et Fort-de-France

Le-François	Type de sol	sol CPMI	sol EC8	Vs30	Liq.	Portance	rm (0.2s)	tc (s)	td (s)	r (1.0 s.)	Ampli. Fa	Ampli. Fv	Niveau d'aléa
F0	Rocher	F8	A	760-800		bonne	0.65	0.30	2.00	0.20	1.0	1.0	nul
F1	mangroves	F2	C	220	moyen	faible à moyenne	0.90	0.62	0.67	0.37	1.4	1.9	moyen
F2	mangroves peu épaisses	F2	C	340	moyen	faible à moyenne	1.70	0.34	0.37	0.21	2.6	1.1	moyen
F3	argiles d'altération épaisseur variable sur laves altérées	F5	B-C	300-430		moyenne à bonne	1.40	0.37	0.40	0.21	2.2	1.1	moyen
F4	argiles indurées sur laves altérées	F5	B	540		moyenne à bonne	1.00	0.27	0.42	0.11	1.5	0.6	faible
F5	argiles et sables argileux sur laves altérées	F3,F4,F5	C	250		faible à moyenne	1.30	0.52	0.55	0.37	2.0	1.9	moyen
F6	faible couverture d'argile d'altération sur laves altérées	F5	B	480		moyenne à bonne	0.85	0.35	0.70	0.21	1.31	1.1	faible
Fort-de-France	Type de sol	sol CPMI	sol EC8	Vs30	Liq.	Portance	rm (0.2s)	tc (s)	td (s)	r (1.0 s.)	Ampli. Fa	Ampli. Fv	Niveau d'aléa
F1	Mangroves et sables côtiers de grande épaisseur (>20m)	F2, F3	D		tres fort	faible à moyenne	0.90	1.00	2.50	0.90	1.7	3.7	moyen
F2	F1 entre 10-20m et formations volcaniques altérés > 20m	F1, F2, F3, F5	C		fort	faible à moyenne	1.00	0.70	2.50	0.70	1.9	2.9	moyen
F3	sols mous à laches (5 à 10 m) sur formations moyennes à raides (>40m)	F1, F2, F3	C		fort	faible à moyenne	1.05	0.55	2.50	0.58	1.9	2.4	moyen
F4	sols mous à laches (5 à 10 m) sur formations moyennes à raides (>40m)	F1, F2, F3	C		fort	faible à moyenne	1.10	0.45	2.50	0.50	2.0	2.0	moyen
F5	sols mous à laches de faible épaisseur sur des alluvions compactés (<15m)	F1, F2, F3	C			faible à moyenne	0.80	0.45	2.50	0.36	1.5	1.5	faible
F6	Formations volcaniques altérées (<20 m) sur des formations raides à rocheuses	F5, F6, F7, F8	B-E	310-620		moyenne à bonne	0.65	0.45	2.50	0.29	1.2	1.2	faible
F7	rocher	F8, F9	A			bonne	0.54	0.45	2.50	0.24	1.0	1.0	nul

Application des critères sur Le Gosier et Baie-Mahault

Gosier	Type de sol	sol CPMI	sol EC8	Vs30	Liq.	Portance	rm (0.2s)	tc (s)	td (s)	r (1.0 s.)	Ampli. Fa	Ampli. Fv	Niveau d'aléa
classe 0	Rocher sain (<i>non présent à l'affleurement</i>)	F8	A	760-800		bonne	0.75	0.25	2.00	0.19	1.0	1.0	nul
Classe 1	Formations argileuses de dépression et zones dunaires	F1, F2, F3	C	343-366	moyen à fort	faible à moyenne	1.80	0.35	0.60	0.38	2.4	2.0	moyen
Classe 2	Remblais et formations argileuses	F1, F2	C	300-315	moyen	faible à moyenne	1.50	0.40	0.60	0.36	2.0	1.9	moyen
Classe 3	remblais Gosier-Abymes	F1, F2, F3	C	303	fort	faible à moyenne	1.10	0.50	1.00	0.55	1.5	2.9	moyen
Classe 4	Terrains raides à rocheux	F6, F8	B	500		moyenne à bonne	1.25	0.32	0.60	0.24	1.7	1.3	faible
Baie-Mahault Est	Type de sol	sol CPMI	sol EC8	Vs30	Liq.	Portance	rm (0.2s)	tc (s)	td (s)	r (1.0 s.)	Ampli. Fa	Ampli. Fv	Niveau d'aléa
Site 1	Terrains raides à rocheux	F6,F7,F8,F9	S0			bonne	0.81	0.45	2.50	0.36	1.0	1.0	nul
Site 2	Altérites	F5	S1			moyenne à bonne	1.00	0.25	2.50	0.25	1.2	0.7	faible
Site 3	Alluvions	F5	S2		moyen	faible à moyenne	1.35	0.30	2.50	0.41	1.7	1.1	moyen
Site 4	Mangroves	F1,F2,F3	S3		moyen	faible à moyenne	0.95	0.65	2.50	0.61	1.2	1.7	moyen
Baie-Mahault Ouest	Type de sol	sol CPMI	sol EC8	Vs30	Liq.	Portance	rm (0.2s)	tc (s)	td (s)	r (1.0 s.)	Ampli. Fa	Ampli. Fv	Niveau d'aléa
0	Rocher sain (<i>non présent à l'affleurement</i>)	F8	A	760-800		bonne	0.80	0.25	4.00	0.20	1.0	1.0	nul
1	Mangroves	F2	D	120	fort	faible à moyenne	1.30	0.65	0.90	0.76	1.6	3.8	moyen
2	alluvions + terrasses fluviatiles	F1,F4	C	200-300	moyen	faible à moyenne	1.40	0.38	0.90	0.48	1.8	2.4	moyen
3	complexe volcanique Centre et Est	F5	C	260-280		moyenne à bonne	1.05	0.40	1.43	0.42	1.3	2.1	faible
4	complexe volcanique Ouest	F5	C	270-300		moyenne à bonne	1.25	0.45	0.70	0.39	1.6	2.0	faible



Direction régionale de Guadeloupe
Parc d'activités de Colin
La Lézarde
97170 – Petit-Bourg - France
Tél. : 05 90 41 35 48

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale de Martinique
4 lotissement Miramar
Route Pointe des Nègres
97200 – Fort de France - France
Tél. : 05 96 71 17 70