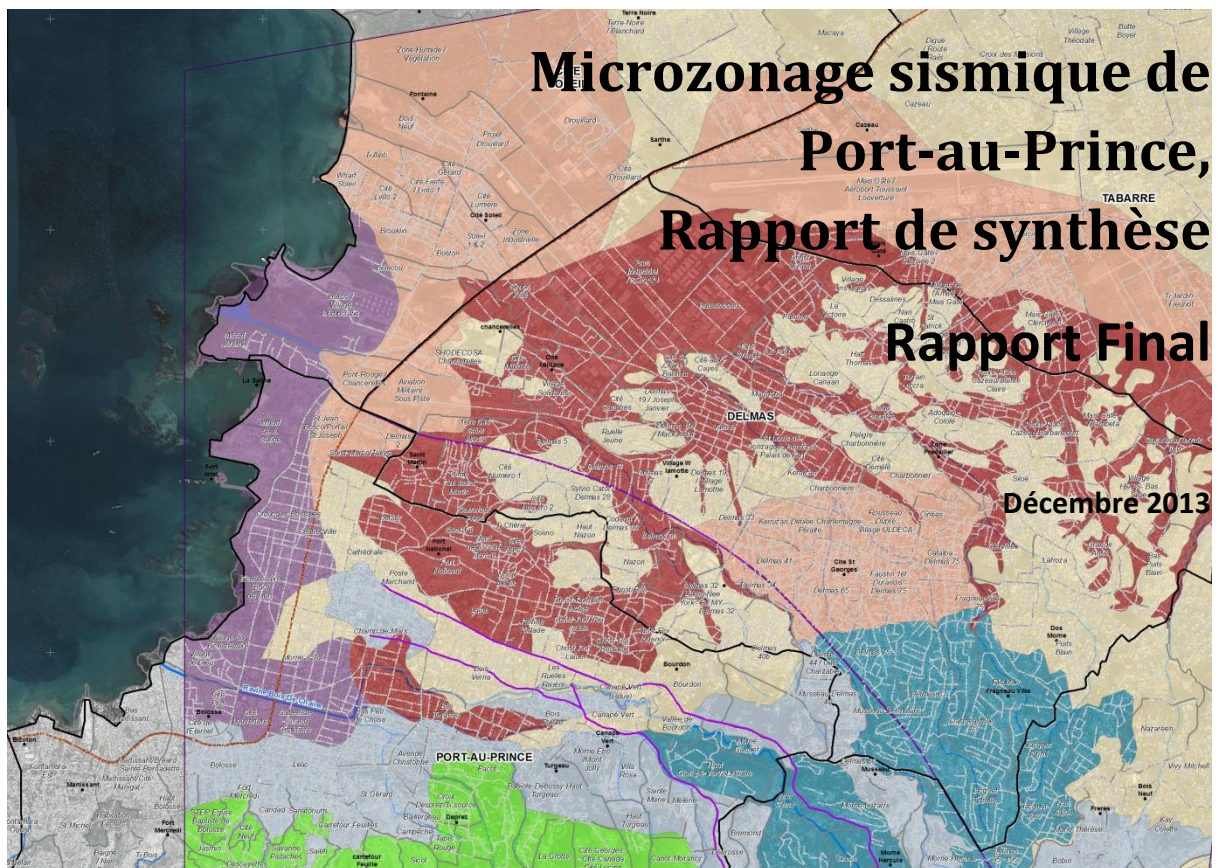




**Ministère des Travaux Publics,  
Transports et Communications (MTPTC)**





**Ministère des Travaux Publics,  
Transports et Communications (MTPTC)**

# **Microzonage sismique de Port-au-Prince, Rapport de synthèse**

**Rapport final**

**Décembre 2013**



# Synthèse

A la suite du séisme du 12 janvier 2010, une coopération renforcée entre le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), le Bureau des Mines et de l'Energie (BME) et le Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) a débouché sur une proposition de programme de microzonage sismique national sur le territoire d'Haïti, décrivant 7 secteurs prioritaires pour la mise en place des premières études de microzonage.

Ce rapport décrit le microzonage sismique réalisé sur le secteur 1, couvrant la zone urbaine de Port-au-Prince sur environ 80 km<sup>2</sup> et réparti sur les communes de Port-au-Prince, Tabarre, Delmas, Pétionville et Cité-Soleil. Il a été réalisé en partenariat entre le BRGM, le LNBTP et le BME dans le cadre du contrat de recherche pour le Ministère des Travaux Publics des Transports et de la Communication (MTPTC) sur des fonds de l'état Haïtien (Ministère de la Planification et de la Coopération Externe, MPCE). Ce travail a bénéficié de la collaboration du Centre National d'Information Géo-Spatiale (CNIGS) et d'informations et données fournies par l'Université d'Etat d'Haïti (UEH).

Le présent rapport est une synthèse qui s'adresse en premier lieu aux utilisateurs des cartes du microzonage sismique. Le chapitre 1 décrit le contexte de l'étude, le contenu du rapport et la composition de l'équipe microzonage. Le chapitre 2 définit ce qu'est un microzonage sismique et quelles utilisations on peut en faire. Les différents aléas concernés y sont décrits. Le chapitre 3 décrit le projet, ses objectifs et la méthodologie générale qui a été utilisée. Le chapitre 4 fait la synthèse des données collectées et des investigations spécifiques qu'il a fallu mener pour cette étude. Le chapitre 5 décrit les résultats et les cartes obtenus pour chaque aléa. Il permet aux utilisateurs des cartes d'avoir les définitions précises de ce qui a été représenté, de connaître les limites de validité et les précautions d'usage, d'avoir des préconisations au niveau de la construction et de l'aménagement. Enfin le chapitre 6 donne des recommandations générales d'utilisation.

L'aléa sismique est un **aléa fort sur toute l'agglomération de Port-au-Prince quel que soit le site**. L'étude de microzonage sismique montre néanmoins que, dans ce contexte d'aléa élevé, les effets attendus ne sont pas les mêmes suivant les secteurs :

- l'aléa régional est plus élevé vers Pétionville que vers Cité Soleil du fait d'une plus grande proximité du système de failles actives Pétionville-Tiburon ;
- les terrains à topographie agitée du sud sont particulièrement impactés par un aléa mouvement de terrain fort sur de larges secteurs, avec, en plus, de l'effet de site topographique sur les crêtes, rebord de talus et fortes pentes. La cartographie géologique a aussi montré sur ces terrains du sud des failles récentes dont l'activité et la cartographie restent encore à préciser ;
- à l'inverse, sur les terrains plus plats du littoral et de la plaine du Cul-de-Sac, les effets les plus sensibles concernent la lithologie des sols : moindre qualité des sols de fondations, aléa liquéfaction élevé, amplifications des secousses liées aux effets de sites lithologiques.

Cette cartographie de microzonage sismique de Port-au-Prince permet :

- la fourniture de paramètres techniques de mouvements du sol pour les bureaux d'étude et maîtres d'ouvrage ;
- une aide à la mise en œuvre des règles parasismiques en vigueur ;

- la fourniture de données de base pour la réalisation de Plans de Prévention des Risques et de Scénarios de Risque sismique ;
- un cadre de réflexion pour l'aménagement urbain ;
- une utilisation en support de communication et de sensibilisation pour l'information préventive.

# Sommaire

|          |                                                             |           |
|----------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction.....</b>                                    | <b>11</b> |
| 1.1      | CONTEXTE DE L'ETUDE .....                                   | 11        |
| 1.2      | RAPPORTS TECHNIQUES .....                                   | 12        |
| 1.3      | CONTENU DU RAPPORT DE SYNTHESE .....                        | 13        |
| 1.4      | COMPOSITION DE L'EQUIPE MICROZONAGE.....                    | 14        |
| <b>2</b> | <b>Généralités sur le microzonage sismique.....</b>         | <b>15</b> |
| 2.1      | PLACE DU MICROZONAGE SISMIQUE DANS LA GESTION DU RISQUE.... | 15        |
| 2.2      | DEFINITIONS ET PHENOMENES ETUDIES .....                     | 16        |
| 2.2.1    | Aléa régional / aléa local .....                            | 16        |
| 2.2.2    | Effets de site lithologiques.....                           | 16        |
| 2.2.3    | Effets de site topographiques.....                          | 16        |
| 2.2.4    | Rupture en surface de faille active .....                   | 17        |
| 2.2.5    | Liquéfaction des sols.....                                  | 17        |
| 2.2.6    | Mouvements de terrain.....                                  | 18        |
| <b>3</b> | <b>Microzonage sismique de Port au Prince.....</b>          | <b>21</b> |
| 3.1      | LA ZONE ETUDIEE.....                                        | 21        |
| 3.2      | METHODOLOGIE GENERALE.....                                  | 23        |
| 3.2.1    | Collecte de données existantes.....                         | 23        |
| 3.2.2    | Investigations complémentaires .....                        | 24        |
| 3.2.3    | Traitements, interprétations et cartographies .....         | 24        |
| 3.3      | TRANSFERT DE COMPETENCE ET DE TECHNOLOGIE .....             | 25        |
| <b>4</b> | <b>Données utilisées .....</b>                              | <b>27</b> |
| 4.1      | DONNEES EXISTANTES ET COLLECTEES POUR LE PROJET .....       | 27        |
| 4.1.1    | Données géologiques.....                                    | 27        |
| 4.1.2    | Données géotechniques.....                                  | 27        |
| 4.1.3    | Données géophysiques.....                                   | 28        |
| 4.1.4    | Autres données .....                                        | 30        |
| 4.2      | DONNEES ACQUISES PENDANT LE PROJET .....                    | 31        |
| 4.2.1    | Géologie et mouvements de terrain .....                     | 31        |
| 4.2.2    | Géotechnique .....                                          | 32        |
| 4.2.3    | Géophysique .....                                           | 32        |

|          |                                                                                                                 |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5</b> | <b>Cartographie des aléas .....</b>                                                                             | <b>33</b> |
| 5.1      | ALEA REGIONAL .....                                                                                             | 33        |
| 5.1.1    | Principaux séismes destructeurs.....                                                                            | 33        |
| 5.1.2    | Evaluation de l'aléa régional.....                                                                              | 33        |
| 5.1.3    | Spectres de référence au rocher sur la zone d'étude.....                                                        | 34        |
| 5.2      | EFFETS DE SITE LITHOLOGIQUES.....                                                                               | 35        |
| 5.2.1    | Représentation des spectres de réponse en accélération .....                                                    | 35        |
| 5.2.2    | Zonage en classes de sol.....                                                                                   | 37        |
| 5.2.3    | Préconisations pour l'aménagement .....                                                                         | 43        |
| 5.3      | EFFETS DE SITE TOPOGRAPHIQUES.....                                                                              | 46        |
| 5.3.1    | Phénomène .....                                                                                                 | 46        |
| 5.3.2    | Cartographie de l'aléa .....                                                                                    | 46        |
| 5.3.3    | Limites de validité et précautions d'usage.....                                                                 | 47        |
| 5.3.4    | Préconisations pour l'aménagement .....                                                                         | 48        |
| 5.4      | LIQUEFACTION DES SOLS .....                                                                                     | 49        |
| 5.4.1    | Le phénomène et les effets attendus .....                                                                       | 49        |
| 5.4.2    | Cartographie de l'aléa .....                                                                                    | 50        |
| 5.4.3    | Limites de validité et précautions d'usage.....                                                                 | 51        |
| 5.4.4    | Préconisations pour l'aménagement .....                                                                         | 51        |
| 5.5      | RUPTURE DE SURFACE DE FAILLES ACTIVES .....                                                                     | 53        |
| 5.5.1    | Le phénomène et les effets attendus .....                                                                       | 53        |
| 5.5.2    | Cartographie.....                                                                                               | 53        |
| 5.5.3    | Poursuite des études.....                                                                                       | 53        |
| 5.5.4    | Recommandations pour la prise en compte des failles actives dans le cadre du microzonage de Port-au-Prince..... | 54        |
| 5.6      | MOUVEMENTS DE TERRAIN .....                                                                                     | 56        |
| 5.6.1    | Typologie .....                                                                                                 | 56        |
| 5.6.2    | Cartographie de l'aléa .....                                                                                    | 57        |
| 5.6.3    | Limites de validité et précaution d'usage.....                                                                  | 59        |
| 5.6.4    | Préconisations pour l'aménagement .....                                                                         | 60        |
| <b>6</b> | <b>Recommandations d'utilisation .....</b>                                                                      | <b>63</b> |
| 6.1      | AVERTISSEMENTS .....                                                                                            | 63        |
| 6.2      | RECOMMANDATIONS POUR LA CONSTRUCTION ET L'AMENAGEMENT .....                                                     | 63        |
| 6.3      | RECOMMANDATIONS SUR L'ETAT DE CONNAISSANCE DE L'ALEA .....                                                      | 64        |
| 6.4      | DE L'ALEA AU RISQUE .....                                                                                       | 65        |
| <b>7</b> | <b>Bibliographie.....</b>                                                                                       | <b>67</b> |

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 7.1 RAPPORTS ANNEXES.....                   | 67 |
| 7.2 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CITEES..... | 67 |

## Liste des Figures

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Relations entre risques naturels, aléa et enjeux .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 15 |
| Figure 2: Différence entre aléa régional (en haut) et local (en bas).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 17 |
| Figure 3 : Déplacements latéraux liés à la liquéfaction du sol dans la zone portuaire de Port-au-Prince lors du séisme du 12 janvier 2010 (source : Rathje et al., 2010) .....                                                                                                                                                                                                      | 18 |
| Figure 4 : Glissement de terrain à Bourdon Port-au-Prince en 2004 (source PNUD) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 19 |
| Figure 5 : Limites de la zone d'étude (ligne rouge), limites de communes (ligne continue noir) et de sections communales (tiretés noirs) .....                                                                                                                                                                                                                                      | 22 |
| Figure 6 : Méthodologie de réalisation de microzonage sismique .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 23 |
| Figure 7 : Matériel acquis sur projet : en haut coffret d'acquisition MASW Geode et PC d'acquisition avec logiciel SeiSimage. En bas à gauche, flute de capteurs MASW ; en bas à droite, appareil de mesure H/V Tromino et en arrière plan un des véhicules du projet. ....                                                                                                         | 26 |
| Figure 8 : Emplacement des forages géotechniques utilisés. En fond, le zonage d'effets de site en classes de sol (voir paragraphe 5.2.2) .....                                                                                                                                                                                                                                      | 28 |
| Figure 9 : Emplacement des profils géophysiques MASW utilisés. En fond, le zonage d'effets de site en classes de sol (voir paragraphe 5.2.2) .....                                                                                                                                                                                                                                  | 29 |
| Figure 10 : Emplacement des points de mesure H/V utilisés. En fond, le zonage d'effets de site en classes de sol (voir paragraphe 5.2.2) .....                                                                                                                                                                                                                                      | 30 |
| Figure 11 : Emplacement des affleurements géologiques visités (étoiles jaunes) et des sites répertoriés de mouvements de terrain (carré bleus), également visités. Fond de carte (géologie et failles, voir paragraphe 5.5.2) .....                                                                                                                                                 | 31 |
| Figure 12 : Aléa régional pour la période spectrale de 0.2s (accélérations en %g) et la période de retour 2475 ans.....                                                                                                                                                                                                                                                             | 34 |
| Figure 13 : Spectres de référence au rocher pour les communes concernées par le microzonage sismique.....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 35 |
| Figure 14 : Représentation de spectre forfaitaire selon le code IBC.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 36 |
| Figure 15 : Spectres de réponse en accélération des 7 classes de sols délimitées sur l'agglomération de Port-au-Prince .....                                                                                                                                                                                                                                                        | 38 |
| Figure 16 : Zonage en classes de sol des effets de site lithologiques.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 39 |
| Figure 17 : Zonage en classes de sol IBC (NEHRP) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 41 |
| Figure 18 : Gammes de VS30 correspondant à chaque classe de sol (droites verticales colorée) et comparaison avec les VS30 associées aux classes de sols NEHRP (délimitées par les droites horizontales noires) .....                                                                                                                                                                | 42 |
| Figure 19 : Relation entre coefficients d'amplification $F_a$ , $F_v$ de chaque classe de sol et les valeurs moyennes de VS30 de chaque classe.....                                                                                                                                                                                                                                 | 42 |
| Figure 20 : Spectre de réponse des sols et période de résonnance de bâtiment. Les immeubles élevés (ou souples) subissent une agression plus forte sur des sols meubles. A l'inverse des effets de site associés à des sols rigides affectent plus particulièrement les immeubles bas. Ce type de comparaison n'est valable qu'à épaisseur de sol comparable dans les deux cas..... | 43 |
| Figure 21 : Principe des effets topographiques.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 46 |
| Figure 22 : Zonage des effets de site topographiques possibles au niveau de l'agglomération de Port-au-Prince. En bleu clair, les zones où l'effet de site topographique est à considérer avec la prise en compte d'un coefficient multiplicatif applicable au spectre de dimensionnement.....                                                                                      | 47 |

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 23 : Schéma d'explication du phénomène de liquéfaction.....                                                                          | 49 |
| Figure 24 : Effet de la liquéfaction – Glissement latéral observé sur le port de Port-au-Prince (Haïti) suite au séisme du 12/01/2010 ..... | 49 |
| Figure 25 : Evaluation de l'aléa - exemple du traitement du sondage SPT-RPàP-6 .....                                                        | 50 |
| Figure 26 : Cartographie de l'aléa liquéfaction.....                                                                                        | 51 |
| Figure 27 : Adaptations constructives, principes des solutions techniques existantes.....                                                   | 52 |
| Figure 28 : Carte géologique préliminaire de l'agglomération de Port-au-Prince .....                                                        | 55 |
| Figure 29 : Glissement Djobel 3 depuis le versant opposée. Source BRGM 2012 .....                                                           | 56 |
| Figure 30 : Chute de blocs sur la chaussée de la route PanAméricaine. ....                                                                  | 57 |
| Figure 31 : Carte d'aléa mouvements de terrain, GI= Glissement de terrain, C= chute de bloc .....                                           | 59 |

## Liste des Tableaux

|                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 : Equipe de l'étude microzonage sismique et domaines d'implications .....                                                                                                                              | 14 |
| Tableau 2 : Principaux séismes ressentis vers Port-au-Prince avec une intensité au moins égale à VI.....                                                                                                         | 33 |
| Tableau 3 : Paramètres associés aux spectres de référence au rocher (voir signification des paramètres au paragraphe 5.2.1).....                                                                                 | 35 |
| Tableau 4 : Paramètres associés aux spectres de réponse spécifiques des classes de sol. Pour la classe 0, 2 valeurs de paramètres sont indiquées pour les sols affleurants à Port-au-Prince et Pétionville ..... | 38 |
| Tableau 5 : Correspondance des 7 classes de sols avec les classes NEHRP correspondantes sur la base des vitesses VS30. Les coefficients d'amplifications Fa et Fv ne sont pas équivalents.....                   | 40 |
| Tableau 6 : Information qualitative sur les effets de site attendus pour chaque classe de sol...                                                                                                                 | 44 |
| Tableau 7 : Influence des sols sur la fondation (d'après CNBH2012) .....                                                                                                                                         | 44 |
| Tableau 8 : Information qualitative sur la portance des 7 classes de sols de l'agglomération de Port-au-Prince.....                                                                                              | 45 |



# 1 Introduction

## 1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE

Le séisme du 12 janvier 2010 est venu rappeler de façon dramatique et brutale la menace trop longtemps sous-estimée de la forte exposition du territoire d'Haïti au risque sismique. Les dégâts considérables observés et le nombre très élevés de victimes sont liés à la conjonction de deux facteurs : la puissance du séisme au niveau du segment de faille qui a rompu et la forte vulnérabilité des bâtiments exposés. Mais, viennent aussi s'ajouter des facteurs aggravants liés à la nature même des sols et du sous-sol qui amplifient le potentiel destructeur du séisme sur certains sites avec localement des concentrations de dommages importants.

La mise en place en Haïti d'un programme national et régional de réduction des pertes et dommages pouvant résulter de tremblements de terre futurs vise à (i) reconstruire les zones détruites, (ii) réduire la vulnérabilité sismique des zones urbaines fortement exposées aux séismes futurs, (iii) aménager de nouvelles zones urbaines en périphérie de Port-au-Prince et d'autres métropoles régionales. Pour cela, la connaissance des terrains et de leur comportement en cas de séisme est un préalable indispensable.

Le **microzonage sismique** répond à ce besoin en déterminant une catégorisation des sites en fonction de leur niveau de danger et en identifiant les zones où des effets de site importants sont susceptibles de survenir. Destiné aux décideurs, aux aménageurs, aux constructeurs, aux ingénieurs structure, aux architectes mais aussi au public, le microzonage sismique a un caractère opérationnel, très appliqué, utilisable aussi bien pour la reconstruction des zones détruites du territoire haïtien que pour la mise en place d'une politique préventive d'aménagement du territoire, prenant en compte les risques naturels.

A la suite du séisme du 12 janvier 2010, une coopération renforcée entre le BRGM, le Bureau des Mines et de l'Energie (BME) et le Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) a été actée par un mémorandum de coopération signé le 25 mai 2010. En application un Programme de Microzonage National pour la République d'Haïti a été proposé. Il est partagé en sept (7) secteurs d'étude qui peuvent être traités séparément et qui correspondent chacun à une phase de ce Programme :

- 1er secteur : la zone urbaine de Port-au-Prince (sur environ 80 km<sup>2</sup>) intégrant le centre-ville, Pétion ville, le Nord de l'aéroport ;
- 2ème secteur : la ville de Cap Haïtien (zone urbaine et péri-urbaine sur environ 40 km<sup>2</sup>).
- 3ème secteur : la ville de Port-de-Paix (20 km<sup>2</sup> environ) ;
- 4ème secteur : les villes de Fort Liberté et de Ouanaminthe (30 km<sup>2</sup> environ) ;
- 5ème secteur : les extensions du secteur 1 vers le nord (de Bon Repos à Lafiteau), vers l'est (de Croix des Bouquets à Ganthier) et vers l'ouest (Martissant et Carrefour jusqu'à sa limite avec Gressier) ;
- 6ème secteur : les villes de Petit Goâve, Grand Goâve, Léogane et Gressier (36 km<sup>2</sup> environ) ;
- 7ème secteur : les villes de Jacmel, Cayes-Jacmel et Marigot (environ 20 km<sup>2</sup>).

Le présent rapport concerne la réalisation du microzonage sismique du secteur 1, couvrant la zone urbaine de Port-au-Prince sur environ 80 km<sup>2</sup> répartis sur les communes de Port-au-Prince, Tabarre, Delmas, Pétionville et Cité-Soleil.

Ce projet a été réalisé en partenariat entre le BRGM, le LNBTP et le BME dans le cadre du contrat de recherche pour le Ministère des Travaux Publics des Transports et de la Communication (MTPTC) sur des fonds de l'état Haïtien (Ministère de la Planification et de la Coopération Externe, MPCE). Il a bénéficié de la collaboration du Centre National d'Information Géo-Spatiale (CNIGS) et d'informations et données fournies par l'Université d'Etat d'Haïti (UEH).

## 1.2 RAPPORTS TECHNIQUES

Ce rapport de synthèse accompagne les cartes suivantes :

- Planche 1 : Carte des faciès lithologiques et des failles
- Planche 2A : Carte des zones de réponse sismique homogène - Classes de sols spécifiques
- Planche 2B : Carte des zones de réponse sismique homogène - Classes de sols du code de construction IBC
- Planche 3 : Carte de zonage des effets de site topographiques
- Planche 4 : Carte d'aléa mouvement de terrain
- Planche 5 : Carte d'aléa liquéfaction

Les cartes sont représentées à l'échelle 1/25000<sup>e</sup> pour l'ensemble de la zone d'étude et au 1/10000<sup>e</sup> pour deux zooms sur les centres villes de Port-au-Prince et de Pétionville.

Pour présenter les méthodologies employées et les études spécifiques effectuées dans le cadre de ce travail, le présent rapport est complété par plusieurs travaux techniques thématiques :

- Terrier M. & Bialkowski A. (2013) – Microzonage sismique de Port-au-Prince (Haïti) : étude géologique. Rapport final. BRGM/RP-61243-FR, p.91, fig.49, ann.1.
- Terrier M. et Nachbaur A. (2013) - Microzonage sismique de Port-au-Prince (Haïti) : Carte de l'aléa mouvements de terrain. Rapport BRGM/ BRGM/RC-62440-FR, 91 p., 32 fig., 1 ann.
- Belvaux M., G. Noury,, S Auclair, E. Vanhoudeusden, D. Bertil et équipe microzonage sismique (2013) – Microzonage sismique de Port-au-Prince (Haïti) : Effets de site et Liquéfaction. Rapport final BRGM/RC-63102-FR.

Et des annexes suivantes concernant les mesures géophysiques et géotechniques effectuées pour le projet :

- Belvaux M., G. Noury,S Auclair, E. Vanhoudeusden, D. Bertil et équipe microzonage sismique (2013) – Microzonage sismique de Port-au-Prince (Haïti) : Effets de site et Liquéfaction. Annexe du rapport BRGM/RC-63102-FR.

- LNBTP (2012) – Etude complémentaire du microzonage de la ville de Port-au-Prince. Rapport définitif d'étude géotechnique. Rapport B-12/420. 83p.
- LNBTP (2013a) – Etude complémentaire du microzonage de la ville de Port-au-Prince. Rapport définitif d'étude géotechnique (Phase II). Rapport B-13/226. 77 p.
- LNBTP (2013b) – Etude complémentaire du microzonage de la ville de Port-au-Prince. Rapport définitif d'étude géotechnique (Phase III). Rapport B-13/299-34. 84 p.

**Ces rapports et cartes sont restitués au MTPTC qui décidera et mettra en œuvre les modalités de diffusion publique de ces résultats.**

### **1.3 CONTENU DU RAPPORT DE SYNTHÈSE**

Ce rapport est une synthèse qui s'adresse en premier lieu aux utilisateurs des cartes du microzonage sismique. Le chapitre 2 définit le contenu d'un microzonage sismique et quelles utilisations on peut en faire. Les différents aléas concernés y sont décrits. Le chapitre 3 décrit le projet, ses objectifs et la méthodologie générale qui a été utilisée. Le chapitre 4 fait la synthèse des données collectées et des investigations spécifiques qu'il a fallu mener pour cette étude.

Le chapitre 5 décrit les résultats et les cartes obtenus pour chaque aléa. Il permet aux utilisateurs des cartes :

- d'avoir les définitions précises de ce qui a été représenté,
- de connaître les limites de validité et les précautions d'usage,
- d'avoir des préconisations au niveau de la construction et de l'aménagement.

Enfin le chapitre 6 donne des recommandations générales d'utilisation, notamment pour le croisement des différents aléas.

## 1.4 COMPOSITION DE L'EQUIPE MICROZONAGE

L'étude a nécessité l'intervention d'une équipe pluridisciplinaire dans les domaines de la géologie, géophysique, géotechnique, sismologie et systèmes d'informations cartographiques (Tableau 1 **Error! Reference source not found.**). Côté haïtien, l'étude a impliqué des équipes du LNBTP, BME et CNIGS. L'équipe du BRGM a assuré des formations/compagnonnages tout le long de l'étude.

Tableau 1 : Equipe de l'étude microzonage sismique et domaines d'implications

| Nom           | prénom           | Organisme | gestion -<br>coordination | Géologie/Faïlles | Mouvements de<br>terrain | Effet de site<br>topographique | mesures<br>géophys./ géotech. | Spectres et zonage<br>en classes de sol | zonage de<br>Liquéfaction | SIG/Cartes |
|---------------|------------------|-----------|---------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------|------------|
| Auclair       | Samuel           | BRGM      |                           |                  |                          | X                              |                               |                                         |                           |            |
| Bastone       | Virginie         | BRGM      |                           |                  |                          |                                |                               |                                         |                           | X          |
| Belvaux       | Myriam           | BRGM      |                           |                  |                          |                                | X                             | X                                       |                           |            |
| Bertil        | Didier           | BRGM      | X                         |                  |                          |                                | X                             | X                                       |                           |            |
| Bialkowski    | Anne             | BRGM      |                           | X                |                          |                                |                               |                                         |                           |            |
| Bitri         | Adnan            | BRGM      |                           |                  |                          |                                | X                             |                                         |                           |            |
| Cochery       | Romain           | BRGM      |                           |                  |                          |                                |                               |                                         |                           | X          |
| Généa         | Samuel           | CNIGS     |                           |                  |                          |                                |                               |                                         |                           | X          |
| Gilles        | Ronaldine        | LNBTP     |                           |                  |                          |                                | X                             | X                                       | X                         |            |
| Jean          | Berthoumieux     | LNBTP     |                           |                  |                          |                                | X                             |                                         |                           |            |
| Jean          | Phédy            | BME       |                           | X                | X                        |                                |                               |                                         |                           |            |
| Jean-Baptiste | Marceau          | BME       |                           | X                | X                        |                                |                               |                                         |                           |            |
| Jean-Philippe | Julio            | LNBTP     |                           |                  |                          |                                | X                             |                                         |                           |            |
| Jean-Poix     | Claude           | LNBTP     | X                         |                  |                          |                                |                               |                                         |                           |            |
| Nachbaur      | Aude             | BRGM      |                           |                  | X                        |                                |                               |                                         |                           |            |
| Noury         | Gildas           | BRGM      |                           |                  |                          |                                | X                             | X                                       | X                         |            |
| Prépetit      | Claude           | BME       | X                         |                  | X                        |                                |                               |                                         |                           |            |
| Roullé        | Agathe           | BRGM      | X                         |                  |                          |                                | X                             |                                         |                           |            |
| Samyn         | Kevin            | BRGM      |                           |                  |                          |                                | X                             |                                         |                           |            |
| Sylvain       | RocheneI         | LNBTP     |                           |                  |                          |                                | X                             |                                         |                           |            |
| Terrier       | Monique          | BRGM      |                           | X                | X                        |                                |                               |                                         |                           |            |
| Vanhoudesden  | Emilie           | BRGM      |                           |                  |                          |                                |                               | X                                       |                           |            |
| Versailles    | Pierre Alexilien | CNIGS     |                           |                  |                          |                                |                               |                                         |                           | X          |

## 2 Généralités sur le microzonage sismique

### 2.1 PLACE DU MICROZONAGE SISMIQUE DANS LA GESTION DU RISQUE

Le risque naturel désigne les conséquences d'un phénomène naturel (défini par son intensité et sa fréquence d'occurrence) sur le plan humain, matériel, économique et environnemental. Le risque résulte du croisement entre l'aléa (le niveau de danger) et les enjeux (Figure 1).

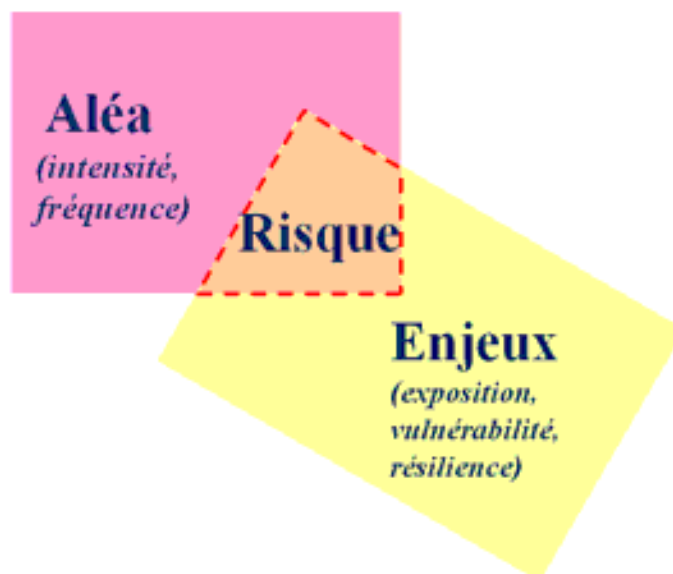


Figure 1 : Relations entre risques naturels, aléa et enjeux

Pour réduire le risque, on peut donc généralement soit réduire la **probabilité** d'occurrence d'un événement soit réduire sa **gravité**. Dans le cas du risque sismique, on ne peut pas diminuer la probabilité de l'événement. Réduire le risque sismique consistera donc à :

- **réduire l'exposition** en évitant de se mettre à proximité de la source de danger ;
- **réduire la vulnérabilité**, en adaptant la construction pour qu'elle résiste mieux ;
- enfin **préparer la résilience**, pour que le retour à un fonctionnement normal après le séisme soit le plus efficace possible.

Les effets d'un séisme ne varient pas seulement avec la distance et la magnitude du séisme. Les conditions géologiques et topographiques locales peuvent modifier fortement les effets. Les actions de réduction du risque sur les enjeux exposés impliquent de bien connaître ces conditions locales pour adapter les actions à mener sur les enjeux. C'est en cela que le microzonage sismique a un rôle important à jouer dans les politiques de gestion du risque.

Le microzonage sismique est outil de **connaissance de l'aléa à l'échelle d'une commune ou d'une agglomération urbaine**. Dans les actions de réduction du risque, le microzonage sismique est à la fois :

- un outil de **prévention** pour orienter l'urbanisation et réduire la vulnérabilité ;
- un outil de **prévision** dans la mesure où il cible les zones les plus dangereuses ; c'est en cela un outil utile pour la planification des secours ;
- un outil d'**information** et de sensibilisation des populations sur les risques.

Plus particulièrement, le microzonage sismique permet :

- la fourniture de paramètres techniques de mouvements du sol pour les bureaux d'étude et maîtres d'ouvrage ;
- une aide à la mise en œuvre des règles parasismiques ;
- la fourniture de données de base pour la réalisation de Plans de Prévention des Risques et de Scénarios de Risque sismique ;
- de définir un cadre de réflexion pour l'aménagement urbain ;
- une utilisation en support de communication et de sensibilisation pour l'information préventive.

## 2.2 DEFINITIONS ET PHENOMENES ETUDIES

### 2.2.1 Aléa régional / aléa local

L'aléa sismique indique la probabilité d'une action sismique prenant en compte la contribution des tremblements de terre possibles (de magnitude ou intensité différentes) susceptibles d'affecter un site ou une zone donnée pour une période de temps donnée. L'**aléa régional** considère un sol rocheux homogène. L'**aléa local** prend en compte les effets liés aux configurations géologiques et topographiques locales qui peuvent perturber l'aléa régional (Figure 2).

### 2.2.2 Effets de site lithologiques

Lorsqu'une onde sismique arrive à la surface du sol, ses caractéristiques, notamment l'amplitude et la durée du mouvement du sol, sont contrôlées par les paramètres géomécaniques des couches de surface. Les ondes peuvent alors être amplifiées ou atténuées à des fréquences préférentielles. Ce phénomène, appelé effet de site lithologique, peut conduire à des amplifications du mouvement sismique. Les paramètres géomécaniques contrôlant le mouvement du sol en surface sont alors les épaisseurs des différentes couches de sol présentes au-dessus du substratum sismique et la vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans ces différentes couches. Il est donc important de caractériser ces paramètres dans la région étudiée. (cf. paragraphe 5.2).

### 2.2.3 Effets de site topographiques

Lors de séismes, il a été constaté que certaines configurations topographiques sont le siège d'une amplification du signal sismique, entraînant une augmentation locale de l'intensité du tremblement de terre. Il s'agit de zones de rupture de pente marquée, de crêtes, de bordures de plateau et de sommets isolés. (cf. paragraphe 5.3).

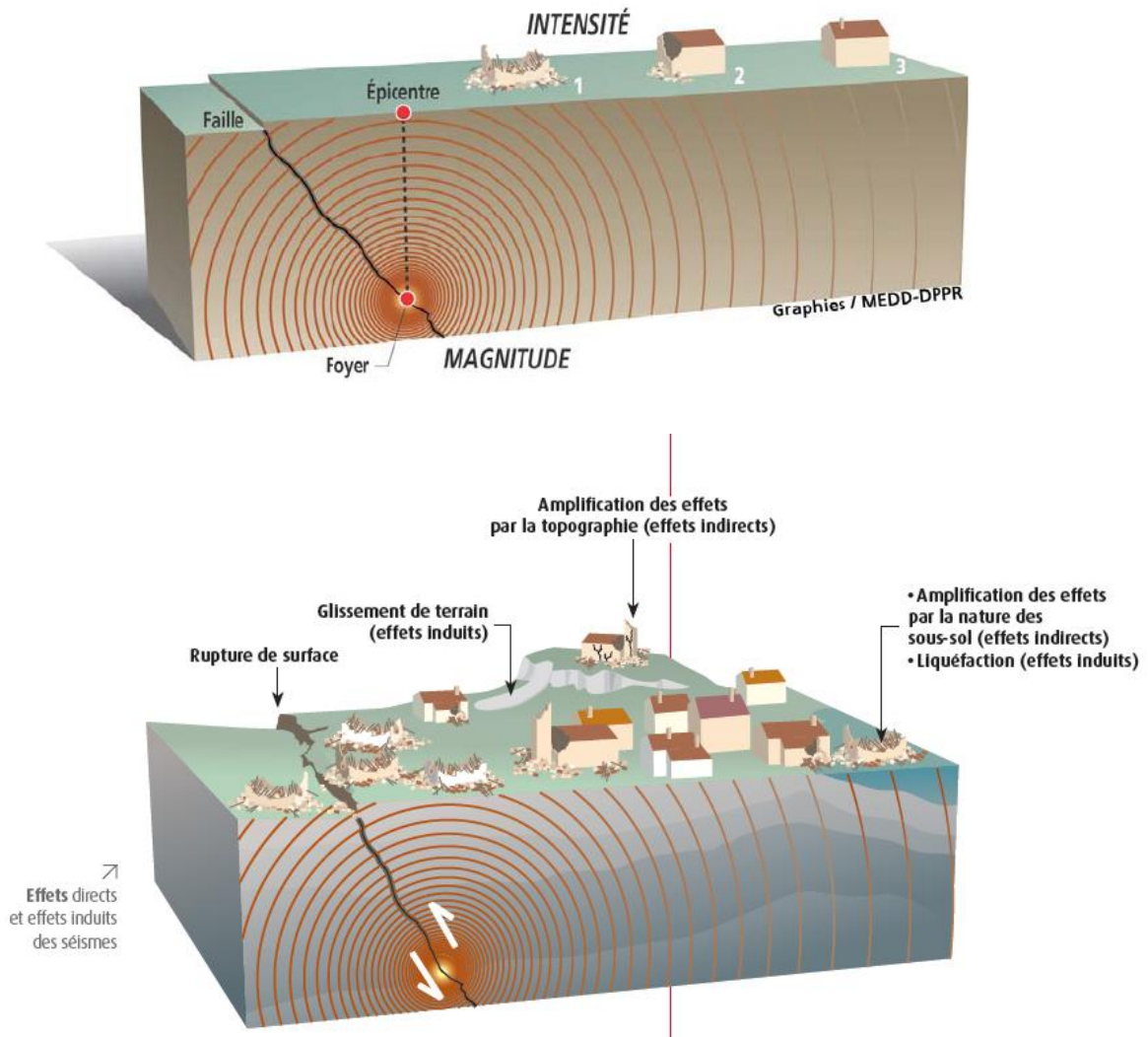


Figure 2: Différence entre aléa régional (en haut) et local (en bas)

## 2.2.4 Rupture en surface de faille active

Une faille peut être considérée comme active si elle a subi au moins une réactivation sismique au cours du Quaternaire, ou si elle montre des évidences de déplacement actuel. Lorsqu'une faille active à l'origine d'un séisme débouche en surface, elle peut induire des déplacements le long de la ligne de rupture (rupture des terrains à la surface du sol). Les bâtiments et infrastructures construites sur la faille, en plus de subir de fortes accélérations du sol, seront fortement affectés par ces déplacements en surface. (cf. paragraphe 5.5).

## 2.2.5 Liquéfaction des sols

Le phénomène de liquéfaction d'un sol est un processus qui conduit à la perte totale de résistance au cisaillement du sol par augmentation de la pression interstitielle. Elle est accompagnée de déformations dont l'amplitude peut être limitée (quelques centimètres) à quasi illimitée (quelques mètres), rendant particulièrement instables les constructions reposant sur ces formations (exemple en Figure 3).



*Figure 3 : Déplacements latéraux liés à la liquéfaction du sol dans la zone portuaire de Port-au-Prince lors du séisme du 12 janvier 2010 (source : Rathje et al., 2010)*

La liquéfaction est un phénomène qui peut se produire sous sollicitation sismique et concerne certaines formations lithologiques, sables, limons ou sables vaseux, quelquefois des vases, saturés d'eau et peu compacts. La granulométrie doit être homogène et le diamètre moyen des grains osciller entre 0,05 et 1,5 mm. (cf. paragraphe 5.4).

### **2.2.6 Mouvements de terrain**

Les séismes peuvent induire des phénomènes de mouvements de terrain (glissements, éboulements, ...). Ces mouvements de terrain peuvent être à l'origine de dégâts bien plus importants que ceux provoqués directement par les vibrations du sol. Ce fut par exemple le cas lors du séisme du Salvador de janvier 2001. Les mouvements de terrain ne sont cependant pas exclusivement provoqués par les séismes. Ils peuvent également être engendrés par les fortes pluies et/ou l'action de l'homme (exemple Figure 4).

Cet aléa est étudié indépendamment du facteur déclenchant (pluie, séisme...). (cf. paragraphe 5.6)



Figure 4 : Glissement de terrain à Bourdon Port-au-Prince en 2004 (source PNUD)



## 3 Microzonage sismique de Port au Prince

### 3.1 LA ZONE ETUDIEE

Le microzonage sismique de Port-au-Prince fait partie d'un programme de microzonage sismique national qui comporte 7 secteurs prioritaires pour la mise en place des premières études de microzonage.

Le microzonage sismique de Port-au-Prince porte sur le secteur 1 du programme national couvrant la zone urbaine de Port-au-Prince sur environ 80 km<sup>2</sup> (Figure 5).

La zone d'étude concerne 5 communes :

- Port-au-Prince (sections communales 6<sup>ème</sup> Turgeau, 7<sup>ème</sup> Morne l'Hôpital, 8<sup>ème</sup> Martissant) entre :
  - o au sud, Carrefour feuille et Campêche
  - o à l'ouest, Bolosse, Cité l'Eternel
  - o au nord et à l'est, les limites des communes de Cité Soleil, Delmas, Pétionville
- Delmas (section communale 1<sup>ère</sup> Saint Martin) sur la quasi-totalité de la commune
- Pétionville (sections communales 7<sup>ème</sup> Bellevue Chardonnière, 4<sup>ème</sup> Bellevue la Montagne, 3<sup>ème</sup> Etang du Jong) entre
  - o au sud, Tête de l'Eau, Montagne Noire
  - o à l'ouest, Gros Morne
  - o à l'est, Meyotte
  - o au nord, Puit Blain, Vivy Mitchell
- Cité-Soleil (sections communales 1<sup>ère</sup> Vareux, 2<sup>ème</sup> Vareux) entre
  - o A l'ouest, la Saline
  - o A l'est, Damien
- Tabarre (section communale 3<sup>ème</sup> Bellevue) entre
  - o A l'Ouest, Maïs Gaté et l'aéroport
  - o A l'Est, Fleuriot

La zone d'étude ne couvre pas la totalité de la zone urbaine de l'agglomération.

L'extension du microzonage sismique au reste de l'agglomération est prévue dans le secteur 5 du programme national : vers le nord, zones non couvertes des communes de Cité-Soleil et Tabarre, et totalité de la commune de Croix des Bouquets) vers l'ouest : Martissant et Carrefour jusqu'à sa limite avec Gressier pour une superficie totale de 260 km<sup>2</sup>.

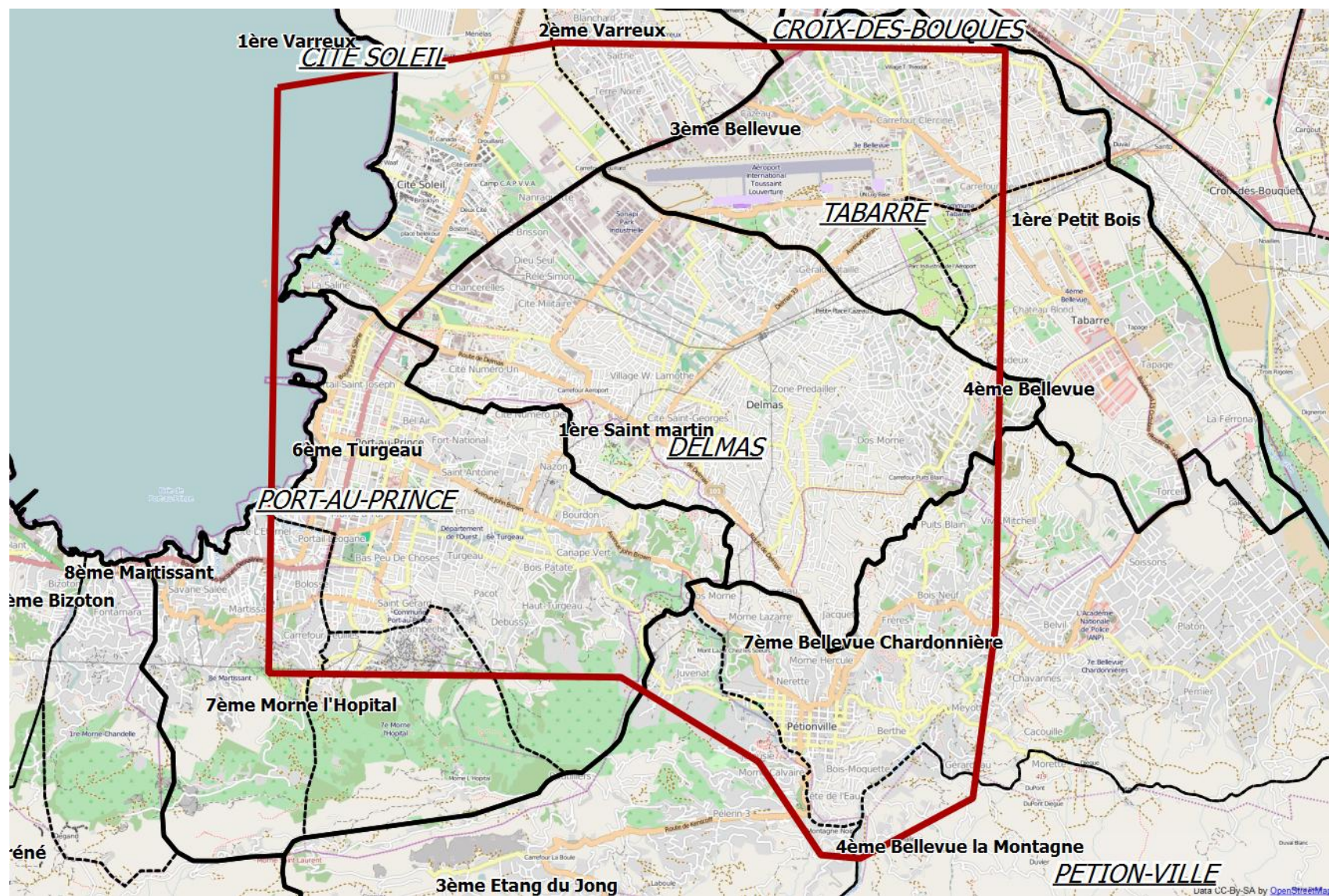


Figure 5 : Limites de la zone d'étude (ligne rouge), limites de communes (ligne continue noir) et de sections communales (tiretés noirs)

### 3.2 METHODOLOGIE GENERALE

Un microzonage sismique nécessite le croisement d'un grand nombre d'informations complémentaires (Figure 6) afin de produire des cartes de zones où les effets évalués sont homogènes. Une traduction opérationnelle du microzonage sismique peut se faire dans le cadre d'un Plan de Prévention du Risque (PPR). Celui-ci donne les prescriptions (ou recommandations) en matières d'occupation des sols, de pratique constructive et de secours s'appuyant sur la cartographie des aléas produites par le microzonage.

L'étude de microzonage sismique s'arrête à l'élaboration technique des cartes et à des recommandations d'usage. Il n'a aucun caractère réglementaire.

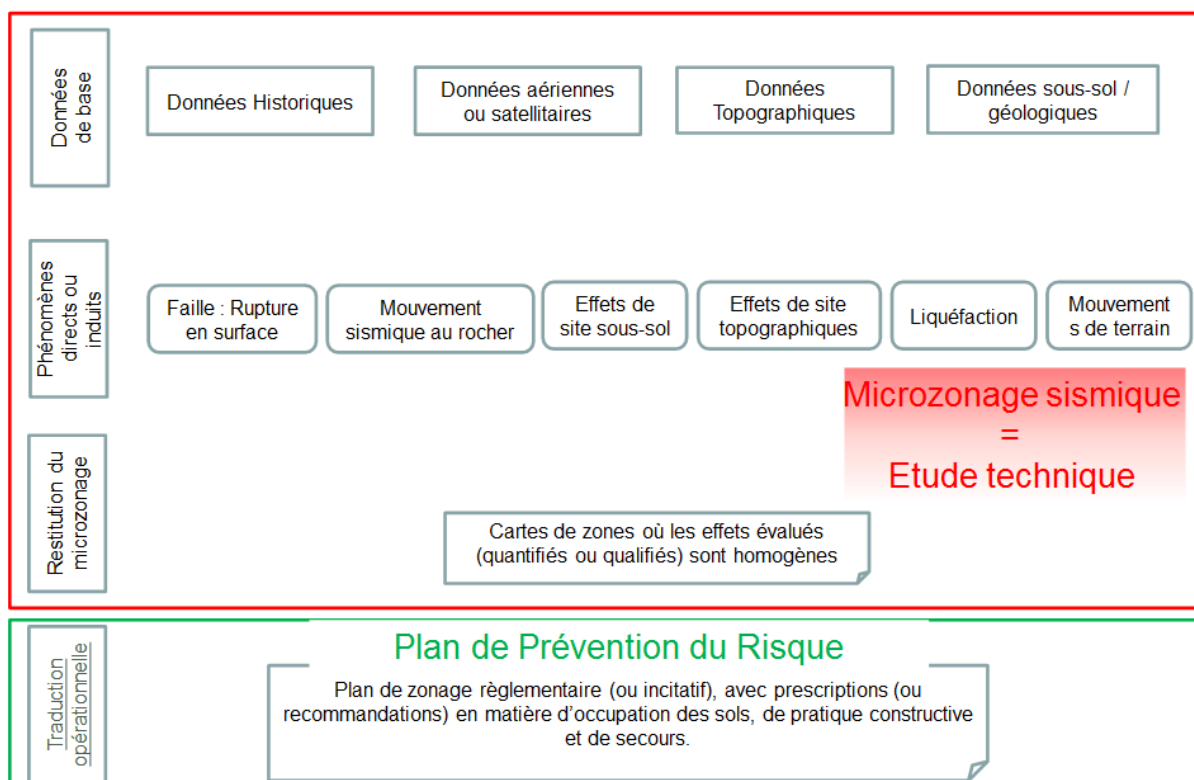


Figure 6 : Méthodologie de réalisation de microzonage sismique

La méthodologie comprend principalement trois phases :

- la collecte et l'analyse des données existantes ;
- les investigations complémentaires nécessaires à l'étude ;
- l'analyse finale et la cartographie

#### 3.2.1 Collecte de données existantes

La première étape du microzonage sismique consiste à collecter toutes les données existantes et les ressources bibliographiques nécessaires pour l'étude des phénomènes

étudiées. Elle s'accompagne d'un travail préliminaire de traitement et d'uniformisation des informations au sein d'une base de données géoréférencées.

Cette première phase se termine par une analyse de l'état de connaissance au niveau de la zone d'étude et une identification des lacunes d'informations.

### **3.2.2 Investigations complémentaires**

La deuxième phase met en œuvre l'ensemble des investigations complémentaires nécessaires à la cartographie des différents aléas, c'est à dire:

- des reconnaissances de terrains (pour la géologie de surface, les failles, les mouvements de terrain) ;
- des campagnes de mesures géophysiques ;
- des campagnes de mesures géotechniques.

L'établissement d'une cartographie géologique préliminaire exploitable à l'échelle de la zone étudiée est réalisé en premier lieu. C'est l'outil de base de travail sur lequel s'appuie toute l'analyse du microzonage sismique.

Les campagnes géophysiques et géotechniques sont réalisées dans un second temps, de façon couplée ou indépendante. Les mesures géophysiques principalement effectuées pour les microzonages sismiques sont des profils MASW<sup>1</sup> et des mesures de bruit de fond H/V. Les investigations géotechniques sont des sondages SPT, des sondages CPT sur des sols les plus meubles, des puits manuels à faible profondeur dans certains cas et des essais de laboratoire sur des échantillons prélevés.

Les mesures géophysiques, plus faciles à mettre en œuvre sont utilisées pour une première évaluation des caractéristiques en profondeur des sols. D'autres campagnes sont réalisées au fur et à mesure de l'avancement de l'analyse pour affiner localement certaines informations.

Les mesures géotechniques, plus lourdes à mettre en œuvre, sont effectuées sur les sites les plus représentatifs des colonnes de sol qu'on cherche à modéliser.

### **3.2.3 Traitements, interprétations et cartographies**

L'étape finale de l'étude, concerne l'analyse croisée de toutes les informations collectées en phase 1 ou acquises en phase 2, conduisant à une évaluation qualitative ou quantitative du niveau d'aléa et à une délimitation en zone de réponse homogène aux sollicitations sismiques :

Les cartes produites sont :

- la carte des failles actives et la cartographie préliminaire des formations géologiques superficielles ;
- le zonage en classes de sols pour les effets de site et la qualité des sols de fondations ;
- le zonage des secteurs pouvant être concernés par des effets de site topographiques ;

---

<sup>1</sup> Multichannel Analysis of Surface Waves

- le zonage de l'aléa mouvements de terrain ;
- le zonage de l'aléa liquéfaction.

L'échelle des cartes produites est globalement à 1/ 25 000 sur toute la zone d'étude (80 km<sup>2</sup>). Dans les zones à enjeux où la densité des informations disponibles est plus forte, une cartographie à 1 / 10 000 est réalisée (essentiellement pour les centres-villes de Port-au-Prince et Pétionville).

### 3.3 TRANSFERT DE COMPETENCE ET DE TECHNOLOGIE

Dans le cadre de la collaboration renforcée entre BRGM, LNBTP et BME, une équipe haïtienne pluridisciplinaire (géologues, géophysiciens, géotechniciens, ingénieur de Système d'Information Géographique) a été mise en place et formée à la réalisation d'études de microzonage sismique. Après une formation générale dans les locaux du BRGM à Orléans, cette formation s'est poursuivie par un compagnonnage pour les investigations de terrain, et une participation active aux traitements analytiques.

Ce compagnonnage a concerné principalement :

- les investigations de terrain et analyses pour la géologie de surface, les failles et les mouvements de terrains ;
- les techniques de mesures géophysiques H/V, MASW et leurs interprétations ;
- l'analyse croisée des données géophysiques et géotechniques, l'établissement des colonnes de sols, l'évaluation de l'aléa liquéfaction ;
- la constitution des bases de données géoréférencées au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG).

Le bilan global de ce transfert de compétence est le suivant :

- l'équipe a une connaissance de la méthodologie générale et des différentes phases du processus ;
- les campagnes de mesures géophysiques et géotechniques sont réalisées et traitées de façon autonome par l'équipe haïtienne ;
- les observations géologiques de terrain et la cartographie des mouvements de terrain sont pris en charge progressivement par l'équipe haïtienne ;
- la démarche méthodologique, les analyses du zonage et la mise en place des programmes d'études sur le terrain sont encore supervisées par le BRGM.

Les calculs pour l'effet de site topographique, le calcul de réponse sismique des colonnes de sol, l'élaboration des spectres de réponses, le regroupement des zones à effets de sites et l'élaboration finale des cartes ne sont encore que partiellement abordés.

Ce compagnonnage se poursuit sur les autres microzonages sismiques du programme national.

Le projet comprenait aussi l'acquisition de matériels géophysiques pour les mesures H/V et MASW, l'acquisition de véhicules de terrain, de matériels d'instrumentation (Figure 7).

Pour le matériel géophysique MASW, le choix s'est porté sur une centrale d'acquisition Sismographe Geode 24 avec le logiciel SeisImage, une flûte de 24 traces et un PC de terrain. Pour les mesures géophysiques H/V, le matériel Tromino a été choisi car simple d'utilisation et peu encombrant sur le terrain.



*Figure 7 : Matériel acquis sur projet : en haut coffret d'acquisition MASW Geode et PC d'acquisition avec logiciel SeiSimage. En bas à gauche, flute de capteurs MASW ; en bas à droite, appareil de mesure H/V Tromino et en arrière plan un des véhicules du projet.*

## 4 Données utilisées

L'ensemble des données existantes collectées au cours du projet ou acquises lors du projet a été regroupé au sein d'une base de données géo-référencée. Elles sont conservées au LNBTP.

### 4.1 DONNEES EXISTANTES ET COLLECTEES POUR LE PROJET

#### 4.1.1 Données géologiques

Les données géologiques principalement consultées proviennent de :

- la carte géologique à l'échelle de 1/250 000 de Momplaisir et Boisson (1987) ;
- la carte préliminaire de Bachhuber et al (2010) et Cox et al. (2011) effectuée par l'équipe GEER (Geotechnical Extreme Event Reconnaissance) en 2010 ;
- les inventaires de mouvements de terrain existants réalisés par le BME (C. Prépetit) couvrant la période de 1986 à nos jours ;
- les instabilités recensées suite au séisme du 12 janvier 2010 (Harp et al., 2011 et compte-rendu de mission post séisme de 2010 du BRGM, Mompelat, 2010).

Pour le contexte géologique et géodynamique régional et la tectonique une bibliographie complète est donnée dans le rapport de Terrier et Bialkowski (2013).

#### 4.1.2 Données géotechniques

Les données géotechniques consultées proviennent principalement de :

- 155 rapports d'études géotechniques du LNBTP entre 1976-2013 ;
- 42 rapports du bureau d'étude GEOTECHSOL en 2011-2012 ;
- 15 rapports du laboratoire URGeo de l'Université d'Etat d'Haïti entre 2011 et 2013 et l'Atlas géotechnique de la zone Pétionville/frères de Boisson et Thimus (2010) ;
- les études géotechniques effectuées après le séisme de 2010 par Rahtje et al. (2010), Green et al (2011), Cox et al. (2011) ;
- quelques informations de forages d'eau obtenues auprès du Ministère de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et du Développement rural (MARNDP).

Un travail préliminaire de géo-référencement et d'uniformisation des informations a été nécessaire. La répartition spatiale de ces données est reportée sur la Figure 8 (en jaune). Ces informations sont inégalement réparties avec une concentration sur les centres villes de Port-au-Prince et de Pétionville. Il y a beaucoup moins d'informations existantes sur la partie Nord de la zone d'étude

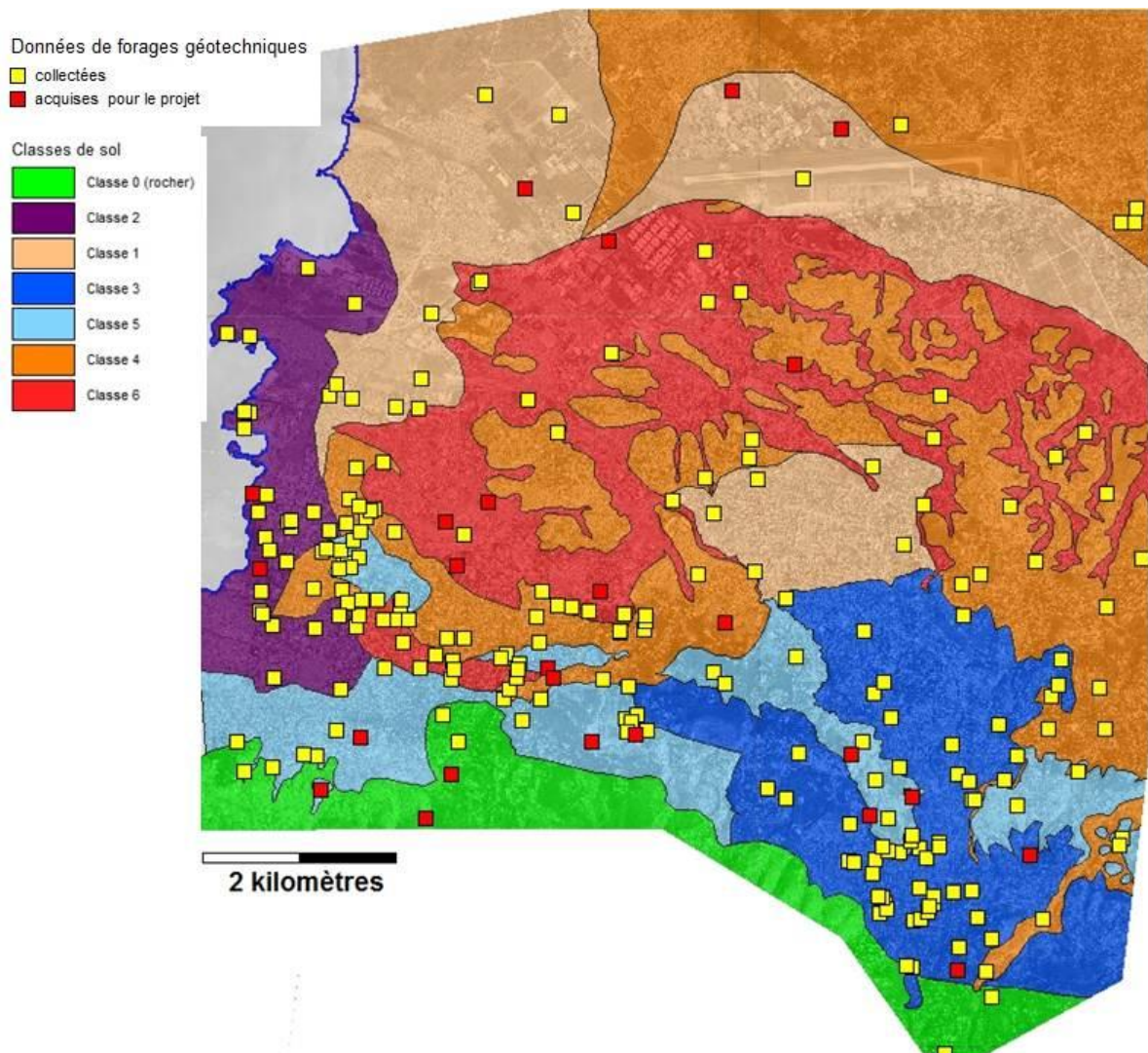


Figure 8 : Emplacement des forages géotechniques utilisés. En fond, le zonage d'effets de site en classes de sol (voir paragraphe 5.2.2)

#### 4.1.3 Données géophysiques

Les données géophysiques utilisées correspondent à deux méthodes de mesures : les profils MASW et les mesures H/V (cf. description de la méthodologie dans le rapport de Belvaux et al., 2013)

Pour les profils MASW, les informations collectées proviennent essentiellement de :

- 36 profils effectuées par l'équipe GEER pour le macrozonage sismique de Port-au-Prince en 2010 (Bahubert et al, 2010, Cox, 2011) ;
- des profils effectués par le bureau d'étude GEOTECHSOL entre 2011 et 2012 sur 31 sites .

La répartition spatiale de ces données est reportée sur la Figure 9 (en jaune). Elles ne couvrent que très partiellement la zone d'étude. De nombreuses mesures complémentaires ont été nécessaires (en rouge).

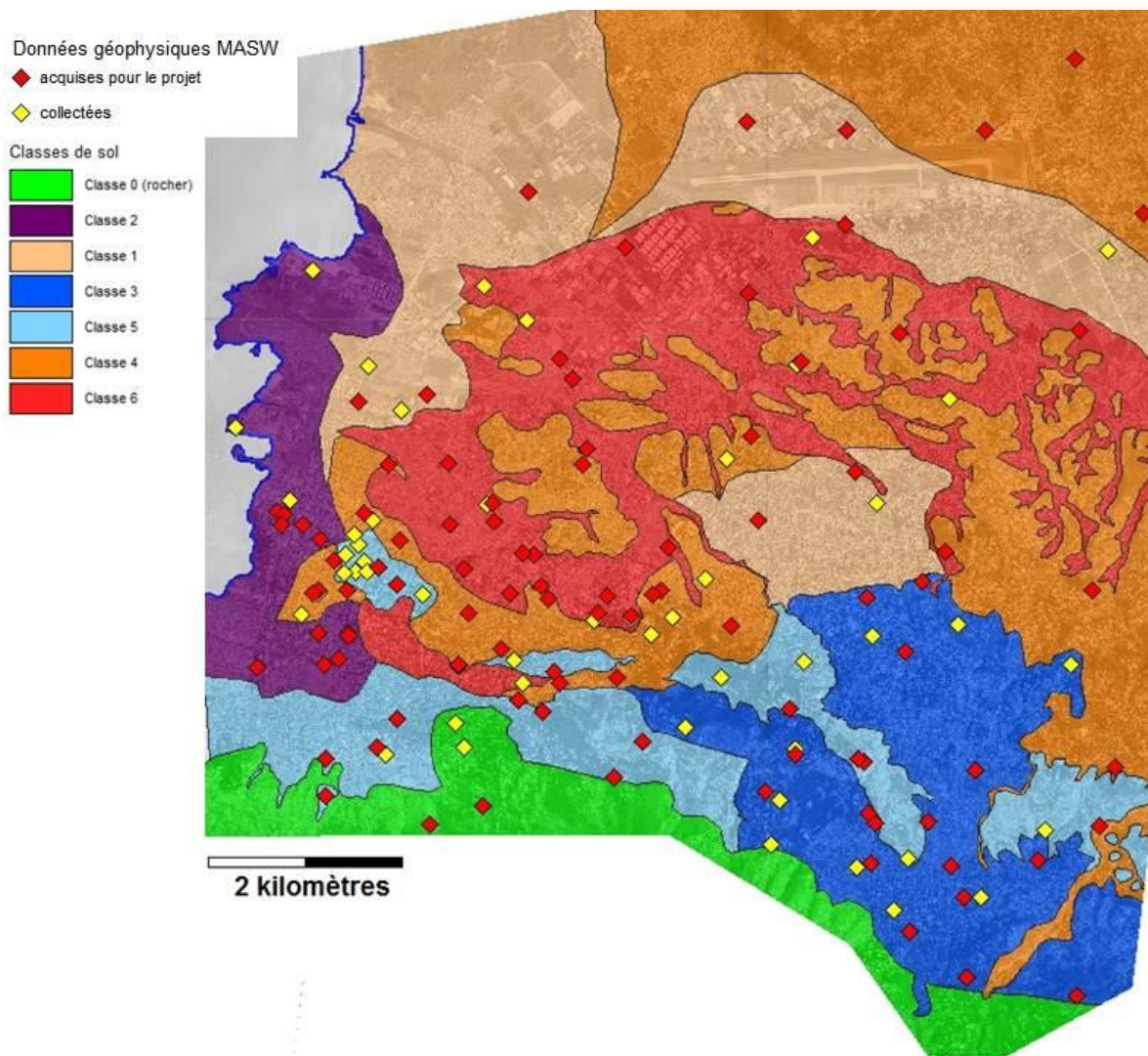


Figure 9 : Emplacement des profils géophysiques MASW utilisés. En fond, le zonage d'effets de site en classes de sol (voir paragraphe 5.2.2)

Pour les mesures H/V, les données collectées proviennent essentiellement de mesures effectuées:

- par la mission post-sismique française de l'AFPS (Hauss et al., 2010) en Juin 2010 ;
- par les bureaux d'étude IMSRN (Etude de Plan de Prévention des Risques sur les quartiers 16/6, 2012), GEOTER (Hôpital de l'université d'Etat, Immeuble Hexagone) ;
- par le laboratoire URGeo sur le site de l'UEH à Damien en 2011.

Au total 76 mesures concernant 17 sites de la zone d'étude ont été récupérées (en jaune sur la Figure 10), n'apportant que des informations très ponctuelles.

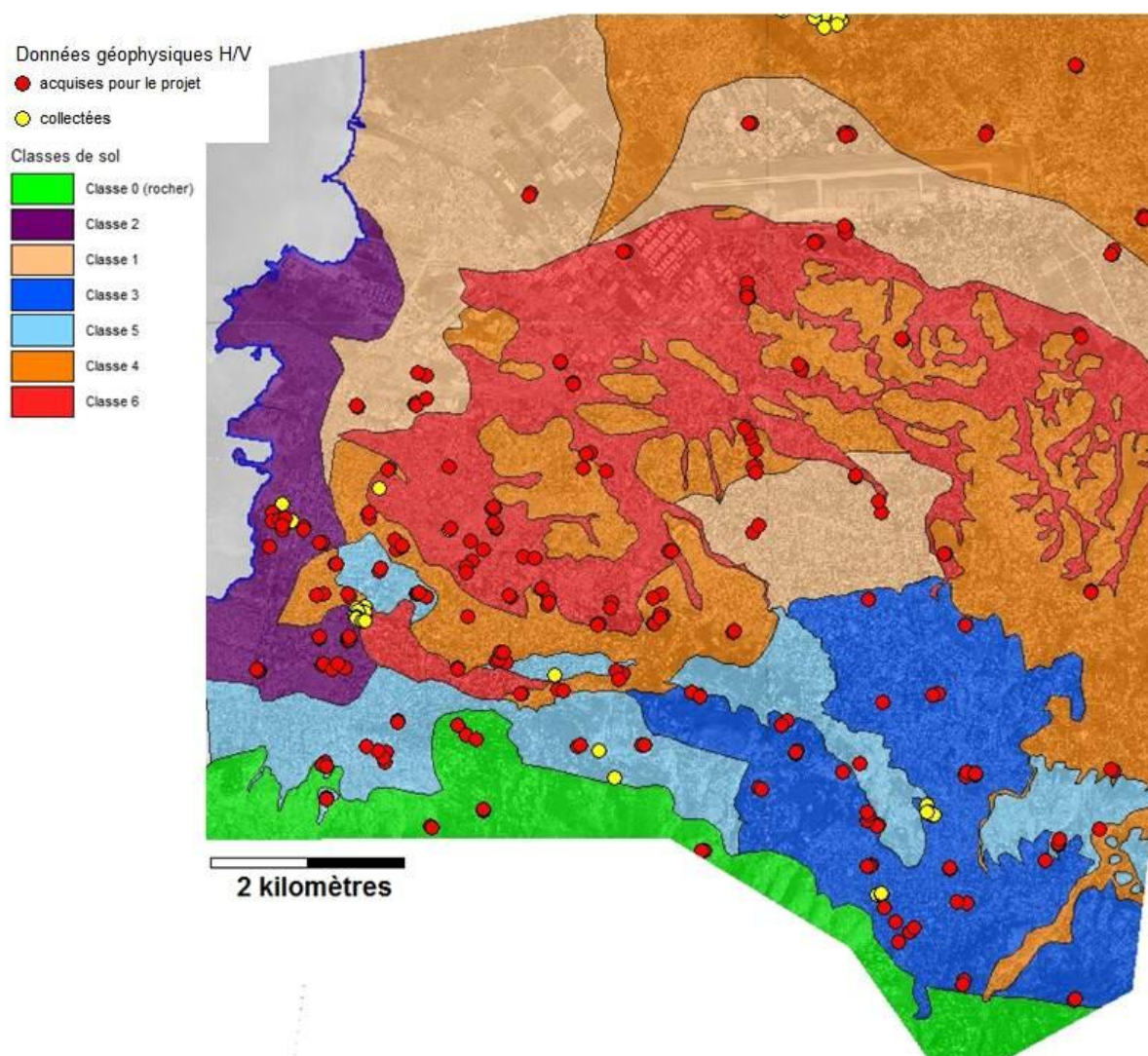


Figure 10 : Emplacement des points de mesure H/V utilisés. En fond, le zonage d'effets de site en classes de sol (voir paragraphe 5.2.2)

#### 4.1.4 Autres données

D'autres données ont été collectées pour le travail d'analyse et l'habillage des cartes de restitution.

Il s'agit principalement :

- de fonds de cartes généraux (limites de communes, secteurs communaux, routes, toponymie, hydrographie, orthophotos, plans de villes) fournis par le CNIGS et complétés par d'autres informations géospatiales disponibles sur le site <http://haitidata.org/>;
- des modèles numériques de terrain (MNT) issus des images LiDAR de la mission RIT Haïti pour la Banque Mondiale (21-27 Janvier, 2010) ;
- du modèle numérique de terrain (MNT) et de ses dérivés (pente, courbes de niveau, exposition, etc.) issus des images Pléiades (calculé par le SERTIT/CNES, dans le cadre du projet KalHaïti) ;
- de la cartographie des dommages du séisme d'Haïti de l'UNOSAT (2010) ;

- des cartes de Port-au-Prince du XVIIIème siècle provenant des archives nationales françaises ([www.archivesnationales.culture.gouv.fr/anom/fr/Recherches/IREL.html](http://www.archivesnationales.culture.gouv.fr/anom/fr/Recherches/IREL.html)) et de la bibliothèque nationale de France (<http://gallica.bnf.fr/>) ;
- des cartes réalisées par l'équipe GEER pour le macrozonage sismique de Port-au-Prince en 2010 (Bachhubert et al, 2010, Cox, 2011).

## 4.2 DONNEES ACQUISES PENDANT LE PROJET

### 4.2.1 Géologie et mouvements de terrain

Pour les informations de lithologie des sols en surface, les cartes géologiques existantes étaient insuffisantes. Plusieurs missions de terrains ont été nécessaires pour aboutir : à la cartographie géologique préliminaire nécessaire au zonage des classes de sols, à la cartographie des failles présentes sur la zone d'étude (cf. Planche 1) et à l'analyse des mouvements de terrains (cf. Planche 4). Les sites visités sont indiqués sur la carte de la Figure 11.

Les visites de terrains ont été effectuées par une équipe BRGM/BME dans le cadre d'un programme de formation et de transfert des compétences à l'équipe du BME. Ce programme de transfert de compétences se poursuit avec les microzonages sismiques des villes du Nord d'Haïti.

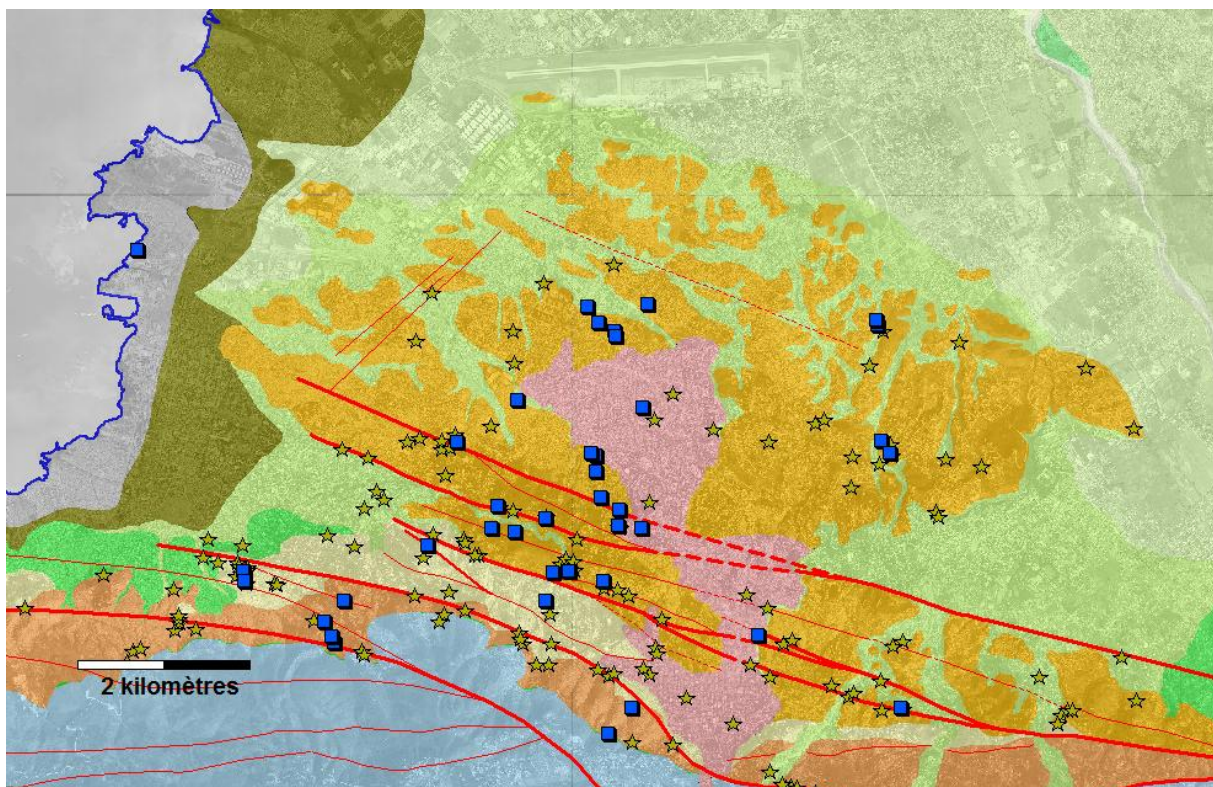


Figure 11 : Emplacement des affleurements géologiques visités (étoiles jaunes) et des sites répertoriés de mouvements de terrain (carré bleus), également visités. Fond de carte (géologie et failles, voir paragraphe 5.5.2)

#### 4.2.2 Géotechnique

Le programme de mesures complémentaires comprenait 21 sondages SPT effectués jusqu'à 30 mètres de profondeur, 2 sondages CPT sur les formations meubles de la zone côtière, 2 puits manuels sur les formations rigides dans les hauteurs de Carrefour-Feuille. Les prélèvements d'échantillons sur les sondages CPT et les puits manuels ont permis :

- la mesure des teneurs en eau ;
- la mesure des masses volumiques humides et sèches ;
- l'analyse granulométrique par tamisage et/ou sédimentation ;
- la mesure des limites d'Atterberg.

L'ensemble de ces mesures a été effectuée par le LNBTP avec le matériel du laboratoire à partir d'un programme de mesures élaboré par le BRGM en concertation avec le LNBTP.

Les sites sont représentés en rouge sur la Figure 8. Les résultats détaillés de ces sondages sont dans les rapports B-12/420, B-13/226, B-13/299 du LNBTP et le rapport technique BRGM/RC-63102-FR de Belvaux et al. (2013).

#### 4.2.3 Géophysique

##### 4.2.3.1 MASW

Pendant la durée du projet 100 mesures MASW ont été effectuées sur 90 sites (en rouge sur la Figure 9). Les sites ont été choisis :

- prioritairement dans une première phase sur des quartiers jugés à enjeux importants et affectés par le séisme de 2010 (centre-ville de Port-au-Prince, de Pétionville, quartiers de Fort National, Carrefour Feuille, Bourdon Canapé Vert) ;
- dans une deuxième phase sur les formations lithologiques pour lesquels nous avons peu d'informations (en particulier sur la partie Nord de la zone d'étude).

La localisation et les interprétations de ces mesures sont détaillées dans le rapport de Belvaux et al. (2013) et son annexe technique. Une partie de ces mesures sont effectuées sur les sites de forages géotechniques, facilitant ainsi les interprétations croisées pour l'établissement de colonnes de sol.

Les premières mesures ont été effectuées par une équipe BRGM/LNBTP dans le cadre d'un programme de formation et de transfert de compétence à l'équipe du LNBTP. Les dernières mesures ont été effectuées de façon autonome par le LNBTP.

##### 4.2.3.2 H/V

285 mesures H/V ont été effectuées sur 121 sites (en rouge sur la Figure 10). A noter que sur de nombreux sites de Port-au-Prince, cette méthode n'a pas permis d'obtenir des interprétations claires sur les effets de site (cf. rapport de Belvaux et al., 2013). Ce type de mesures, facile à mettre en œuvre, a toutefois été effectué systématiquement sur tous les sites de sondage géotechnique et de profils MASW.

Les premières mesures ont été effectuées avec deux types de matériel (capteur Lennartz et numériseur CityShark, fournis par le BRGM, et Tromino fourni par le LNBTP) par une équipe conjointe BRGM/LNBTP. Par la suite, les mesures sur le terrain ont été effectuées de façon autonome par l'équipe du LNBTP avec le Tromino acquis pour le projet.

## 5 Cartographie des aléas

### 5.1 ALEA REGIONAL

#### 5.1.1 Principaux séismes destructeurs

Sur la région de Port au Prince, les témoignages de séismes ressentis remontent à un peu plus de trois siècles seulement. Flores et al (2011) ont fait une synthèse des observations macrosismiques connues sur l'île d'Hispaniola. Leurs évaluations d'intensité sont résumées dans le Tableau 2 pour Port-au-Prince et pour les intensités supérieures ou égales à VI. Avant le séisme du 12 Janvier 2010, Port-au-Prince avait subi des dommages sévères en 1751 et 1770. Les séismes de 1911 et 1946 ont des épicentres éloignés de Port-au-Prince et bien que très fortement ressentis n'ont pas occasionnés de dommages significatifs. Même si régulièrement des séismes sont ressentis dans l'agglomération, l'absence de dommages importants pendant une période de 240 ans a contribué à négliger la forte exposition au risque sismique de Port-au-Prince.

*Tableau 2 : Principaux séismes ressentis vers Port-au-Prince avec une intensité au moins égale à VI*

| Date             | Intensité | Remarques                                                                                   |
|------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9 Novembre 1701  | VI-VII    | Intensité dans la plaine du Cul de Sac (Port-au-Prince n'existait pas encore)               |
| 18 Octobre 1751  | V-VI      | Très destructeur en République Dominicaine                                                  |
| 21 Novembre 1751 | IX        | Port-au-Prince détruit                                                                      |
| 3 Juin 1770      | IX        | Port-au-Prince détruit                                                                      |
| 6 Octobre 1911   | VI        | Epicentre dans les montagnes du centre de l'île                                             |
| 4 Août 1946      | VI        | Séisme en République Dominicaine. Estimation d'intensité de l'Observatoire de Saint Martial |
| 12 Janvier 2010  | IX        | Centre-Ville de Port au Prince détruit (estimation d'intensité ShakeMap de l'USGS)          |

#### 5.1.2 Evaluation de l'aléa régional

L'aléa sismique d'Haïti a été réévalué en 2010 par Frankel et al. (2010) selon une méthodologie d'évaluation d'aléa sismique probabiliste. Pour une utilisation dans le cadre du code de construction IBC 2009, l'aléa est calculé pour la période de retour 2475 ans (correspondant à une probabilité d'occurrence de 2% sur 50 ans) et pour les périodes spectrales de 0.2 seconde et 1.0 seconde.

Cette évaluation d'aléa est utilisée comme référence d'aléa régional pour le futur code de construction CNBH en Haïti. Pour le présent microzonage sismique, l'aléa régional est basé sur les cartes de Frankel et al. (2010) reprises pour le code CNBH.

Sur la Figure 12, la zone d'étude est représentée en rouge sur la carte d'aléa sismique pour la période de retour 2475 ans et la période spectrale 0.2s. Les limites des communes concernées par le microzonage sont représentées en noir.

L'aléa régional n'est pas uniforme sur la zone d'étude. Il est plus fort à Pétionville et diminue graduellement vers la Plaine du cul-de-Sac avec un minimum sur la commune de Cité-Soleil. Ces variations d'aléa régional sont prises en compte pour le calcul des effets de site lithologiques.

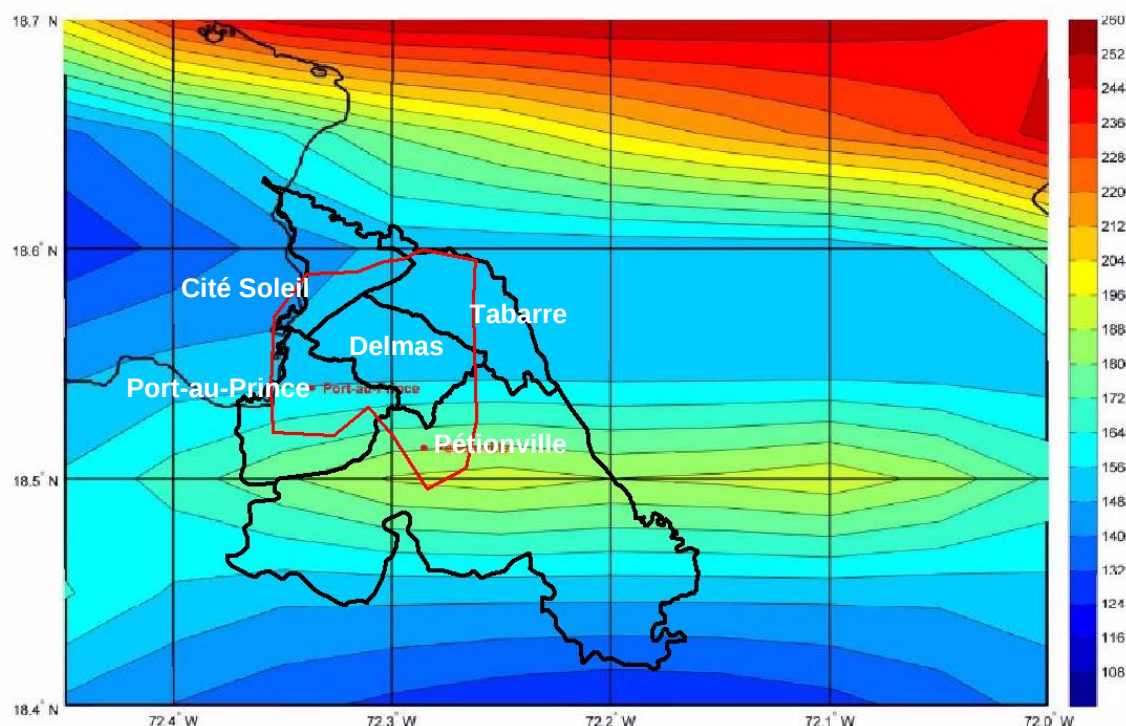


Figure 12 : Aléa régional pour la période spectrale de 0.2s (accélérations en %g) et la période de retour 2475 ans

### 5.1.3 Spectres de référence au rocher sur la zone d'étude

Les spectres d'accélération au rocher (sol B, selon la classification NEHRP) sont calculés selon le code ASCE-7-05 repris dans le code IBC 2009 et CNBH. Ces spectres et les paramètres associés sont représentés sur la Figure 13 et le Tableau 3.

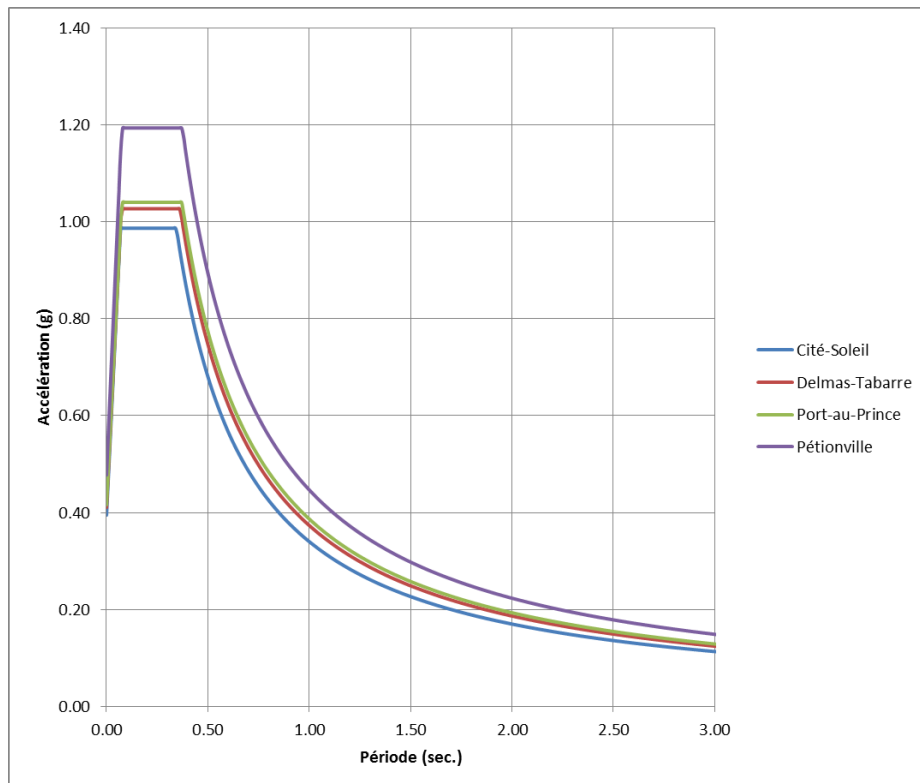


Figure 13 : Spectres de référence au rocher pour les communes concernées par le microzonage sismique

Tableau 3 : Paramètres associés aux spectres de référence au rocher (voir signification des paramètres au paragraphe 5.2.1)

| Commune        | $S_{DS}$<br>(g) | $S_{D1}$<br>(g) | PGA rocher<br>(g) | $T_0$<br>(s) | $T_s$<br>(s) |
|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------|--------------|
| Cité Soleil    | 1.48            | 0.51            | 0.39              | 0.07         | 0.35         |
| Tabarre        | 1.54            | 0.56            | 0.41              | 0.07         | 0.36         |
| Delmas         | 1.54            | 0.56            | 0.41              | 0.07         | 0.36         |
| Port-au-Prince | 1.56            | 0.58            | 0.42              | 0.07         | 0.37         |
| Pétionville    | 1.79            | 0.67            | 0.48              | 0.07         | 0.37         |

## 5.2 EFFETS DE SITE LITHOLOGIQUES

### 5.2.1 Représentation des spectres de réponse en accélération

La forme des spectres de réponse pour chaque classe de sol est calculée selon le même principe que pour le code ASCE- 7-05 préconisé par l'IBC. Le spectre (Figure 14) est construit à partir de 2 paramètres  $S_{DS}$  et  $S_{D1}$  calculés à partir des valeurs d'accélération aux périodes 0.2s et 1.0s de l'aléa au rocher (période de retour 2475 ans) et de coefficients d'amplification  $F_a$  (pour  $S_{DS}$ ) et  $F_v$  (pour  $S_{D1}$ ). Ces coefficients quantifient l'amplification en accélération de chaque classe de sol par rapport à un sol rocheux (classe B de la classification NEHRP) pour les périodes spectrales 0.2s ( $F_a$ ) et 1.0s ( $F_v$ ).

Les périodes du plateau  $T_0$  et  $T_s$  sont déduites de ces 2 valeurs. Le rapport Plateau/PGA est fixe et égal à 2.5. Entre  $T_s$  et  $T_L$ , le spectre décroît en  $1/T$ . Au-delà de  $T_L$  le spectre décroît en  $1/T^2$ . La valeur de  $T_L$  est imposée régionalement et ne varie pas en fonction du type de sol. Cette valeur  $T_L$  n'a pas été évaluée par Frankel et al. (2010). Elle est indiquée comme étant au moins égale à 4 secondes.

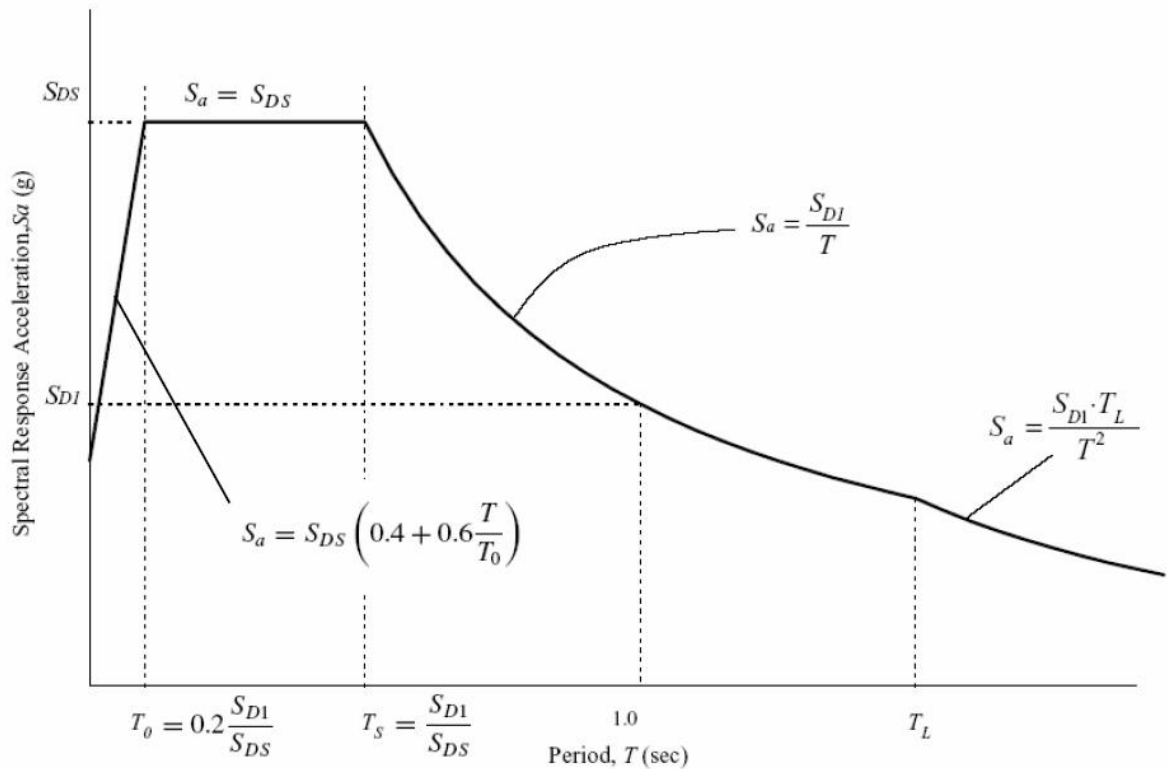


Figure 14 : Représentation de spectre forfaitaire selon le code IBC

Le spectre est donc défini de la façon suivante. Comme pour le code IBC, on calcule :

$$S_{DS} = 2/3 F_a S_s$$

$$S_{D1} = 2/3 F_v S_1$$

$$T_0 = 0.2 (S_{D1}/S_{DS})$$

$$T_s = (S_{D1}/S_{DS})$$

$$\text{De } 0 \text{ à } T_0 : S_a = S_{DS} * (0.4 + 0.6 T/T_0)$$

$$\text{De } T_0 \text{ à } T_s : S_a = S_{DS}$$

$$\text{De } T_s \text{ à } T_L : S_a = S_{D1} / T$$

$$\text{Au-delà de } T_L : S_a = (S_{D1} T_L) / T^2$$

La seule différence entre les classes de sol du microzonage sismique et les classes de sol forfaitaires de l'IBC réside dans les valeurs des coefficients d'amplifications  $F_a$  et  $F_v$ .

Les spectres de réponse sont calculés à 5% d'amortissement (amortissement préconisé pour le bâti courant dans les règles parasismiques IBC).

## 5.2.2 Zonage en classes de sol

### 5.2.2.1 Méthodologie

Le zonage consiste à identifier et cartographier les zones présentant des caractéristiques géologiques et géomécaniques cohérentes, et une réponse sismique homogène ; l'objectif est de fournir, en chaque zone, des mouvements sismiques adaptés au sous-sol.

Ce zonage se fait en plusieurs étapes :

- analyse croisée des informations géologiques, géophysiques et géotechniques ; ces informations regroupent les données existantes collectées et les données acquises au cours du projet ;
- identification des zones homogènes ;
- définition d'une ou plusieurs colonnes de sol représentatives associées à chaque zone ;
- calcul des réponses sismiques associées à chaque zone ;
- regroupement de zones pour obtenir le zonage sismique final.

Le processus et l'analyse qui a conduit au zonage sont détaillés dans le rapport de Belvaux et al., (2013).

### 5.2.2.2 Classes de sol et spectres associés

Le zonage sismique est défini en 7 classes de sol. Le rocher affleurant (classe 0) n'est présent qu'au niveau de la bordure sud de la zone d'étude sur les communes de Port-au-Prince et Pétionville. 6 autres classes de sols sont définies et présentées sur la Figure 15 et le Tableau 4. La cartographie des zones correspondantes est illustrée sur la Figure 16 et sur la Planche 2A.

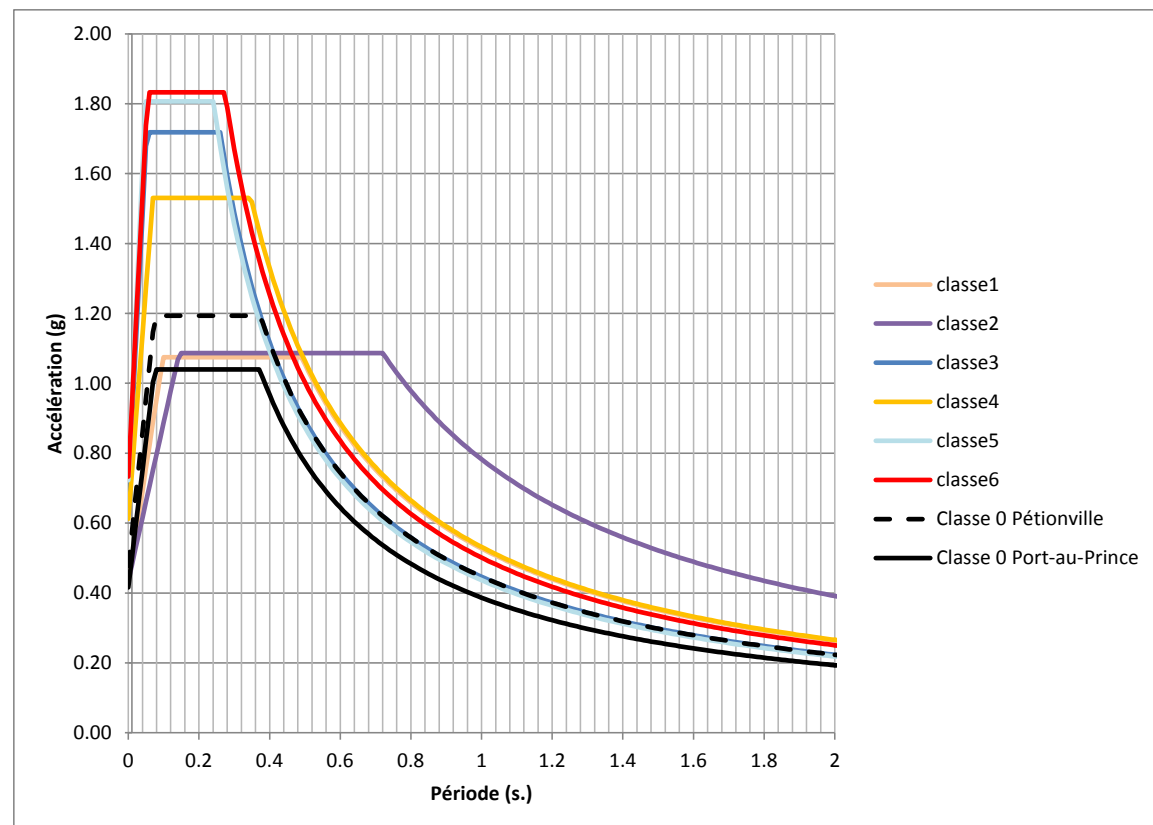


Figure 15 : Spectres de réponse en accélération des 7 classes de sols délimitées sur l'agglomération de Port-au-Prince

Dans le Tableau 4, les coefficients  $F_a$  et  $F_v$  indiquent les amplifications attendues par rapport à un sol rocheux (classe 0) autour de la période 0.2s et 1.0 seconde respectivement.

Tableau 4 : Paramètres associés aux spectres de réponse spécifiques des classes de sol. Pour la classe 0, 2 valeurs de paramètres sont indiquées pour les sols affleurants à Port-au-Prince et Pétionville

|          | SDS<br>(g) | SD1<br>(g) | PGA<br>(g) | PGA rocher<br>(g) | T0<br>(sec.) | Ts<br>(sec.) | $F_a$ | $F_v$ |
|----------|------------|------------|------------|-------------------|--------------|--------------|-------|-------|
| Classe 0 | 1.56-1.79  | 0.58-0.67  | 0.42-0.48  | 0.42-0.48         | 0.07         | 0.37         | 1.00  | 1.00  |
| Classe 1 | 1.07       | 0.53       | 0.43       | 0.41              | 0.10         | 0.49         | 1.05  | 1.41  |
| Classe 2 | 1.09       | 0.78       | 0.43       | 0.42              | 0.14         | 0.72         | 1.04  | 2.02  |
| Classe 3 | 1.72       | 0.44       | 0.69       | 0.48              | 0.05         | 0.26         | 1.44  | 1.00  |
| Classe 4 | 1.53       | 0.53       | 0.61       | 0.42              | 0.07         | 0.35         | 1.47  | 1.37  |
| Classe 5 | 1.81       | 0.44       | 0.72       | 0.42              | 0.05         | 0.24         | 1.74  | 1.13  |
| Classe 6 | 1.83       | 0.5        | 0.73       | 0.42              | 0.06         | 0.27         | 1.76  | 1.30  |

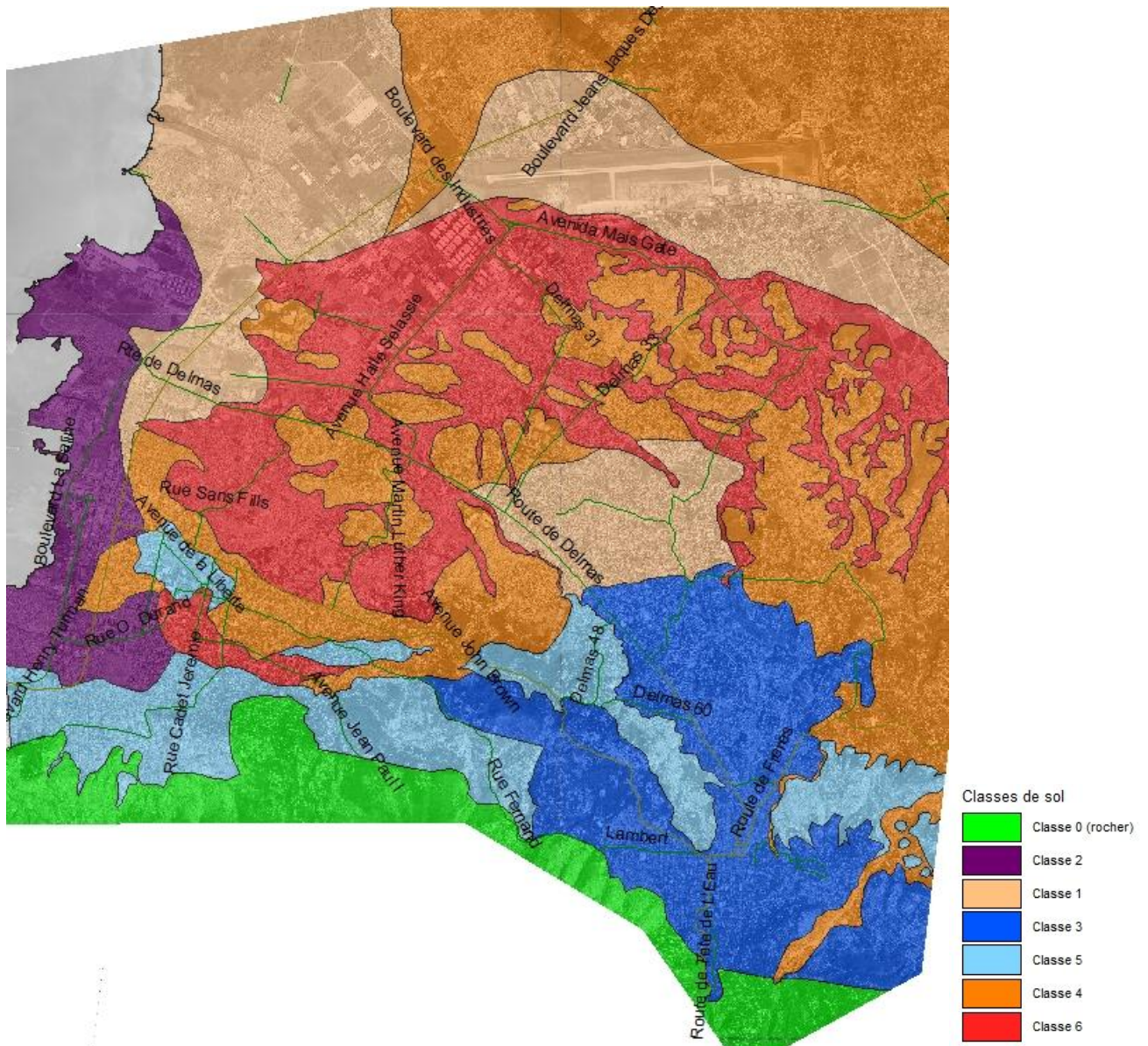


Figure 16 : Zonage en classes de sol des effets de site lithologiques

### 5.2.2.3 Correspondance avec les classes de sol NEHRP

Sur des critères de vitesses de cisaillement dans les 30 premiers mètres ( $V_{S30}$ ), une correspondance avec les classes de sol NEHRP peut être établie (cf. Tableau 5 et Figure 18). La cartographie des zones correspondantes est illustrée sur la Figure 17 et la planche 2B.

Il est à noter toutefois que les coefficients d'amplifications  $F_a$  et  $F_v$  des spectres NEHRP ne correspondent pas aux coefficients des classes de sol de cette étude. En particulier, les spectres forfaitaires des classes C et D ne permettent pas la prise en compte des fortes accélérations obtenues sur les courtes périodes ( $< 0.25$  s) pour les classes 3, 4, 5 et 6.

*Tableau 5 : Correspondance des 7 classes de sols avec les classes NEHRP correspondantes sur la base des vitesses VS30. Les coefficients d'amplifications Fa et Fv ne sont pas équivalents*

|          | Type NEHRP | Fa NEHRP | Fv NEHRP | Fa Cette étude | Fv Cette étude |
|----------|------------|----------|----------|----------------|----------------|
| Classe 0 | A-B        | 0.8-1.0  | 0.8-1.0  | 1              | 1              |
| Classe 1 | C-D        | 1        | 1.3-1.5  | 1.05           | 1.41           |
| Classe 2 | D          | 1        | 1.5      | 1.04           | 2.02           |
| Classe 3 | C          | 1        | 1.3      | 1.44           | 1.00           |
| Classe 4 | C          | 1        | 1.3      | 1.47           | 1.37           |
| Classe 5 | C          | 1        | 1.3      | 1.74           | 1.13           |
| Classe 6 | D          | 1        | 1.5      | 1.76           | 1.30           |

La Figure 19 montre comment évoluent les coefficients d'amplifications Fa et Fv en fonction de la valeur moyenne de VS30 de chaque classe de sol. Dans la classification NEHRP et pour le niveau élevé d'aléa régional de la zone, Fa reste constant et égal à 1 pour les VS30 entre 180 et 1000 m/s correspondant aux classes de sol B, C, D. Fv augmente lorsque la valeur de VS30 diminue.

Pour les classes de sols du microzonage, la tendance d'évolution de Fv avec VS30 est globalement respectée. Mais il n'y a aucune corrélation entre Fa et VS30. Ce paramètre n'est pas un bon indicateur pour les effets de site hautes fréquences qui sont observés par le microzonage.

Ce zonage en classes de sol NEHRP est moins fin que le zonage en 7 classes de sol spécifiques. Basé uniquement sur des critères de valeurs de vitesses des ondes de cisaillement dans les trente premiers mètres (VS30), il ne permet pas de distinguer les différences de comportement des sols (amplifications à courte période et/ou à longue période) du zonage en classes de sol spécifique qui prend en compte des colonnes de sols plus précises et des épaisseurs plus importantes.

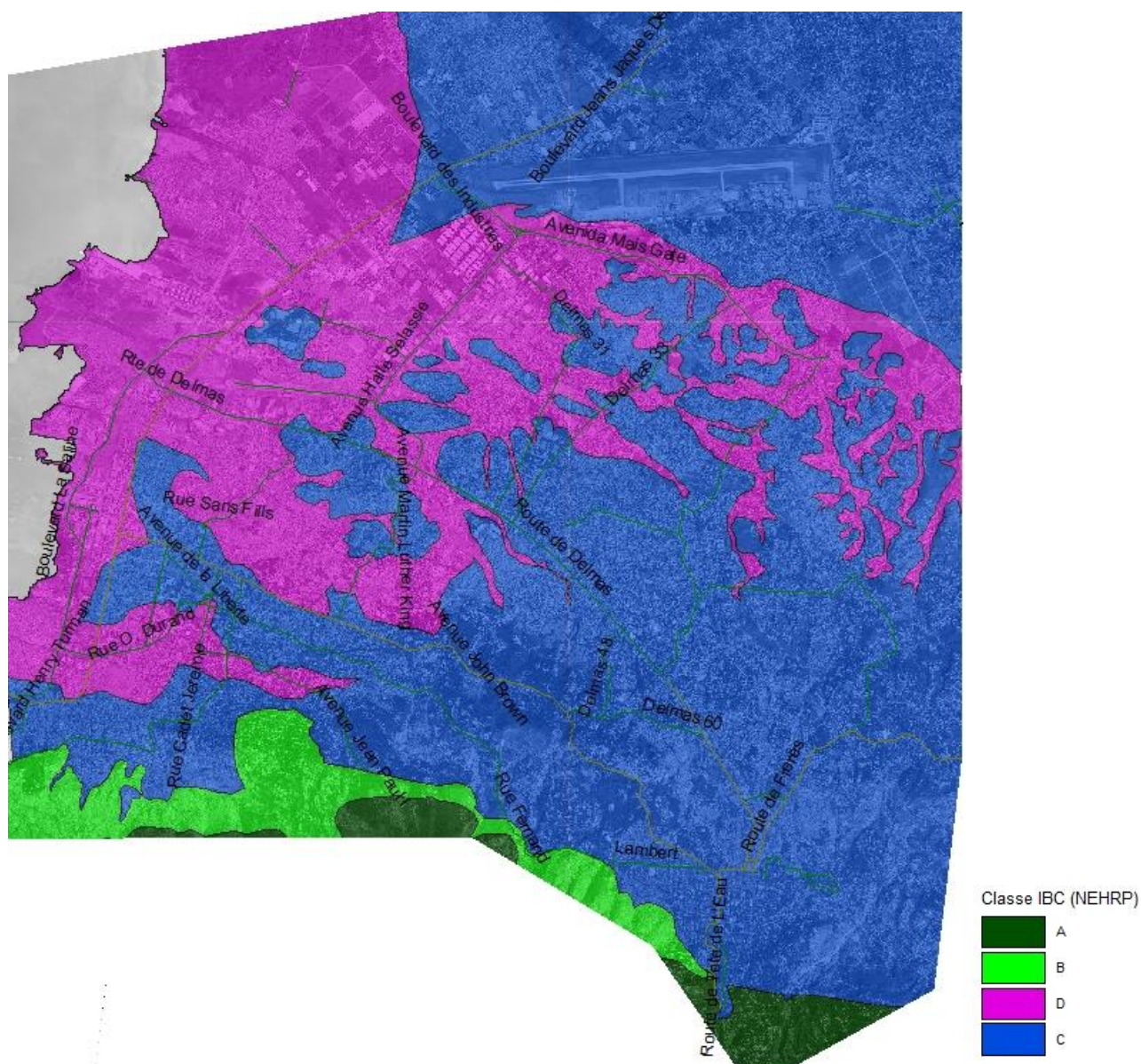


Figure 17 : Zonage en classes de sol IBC (NEHRP)

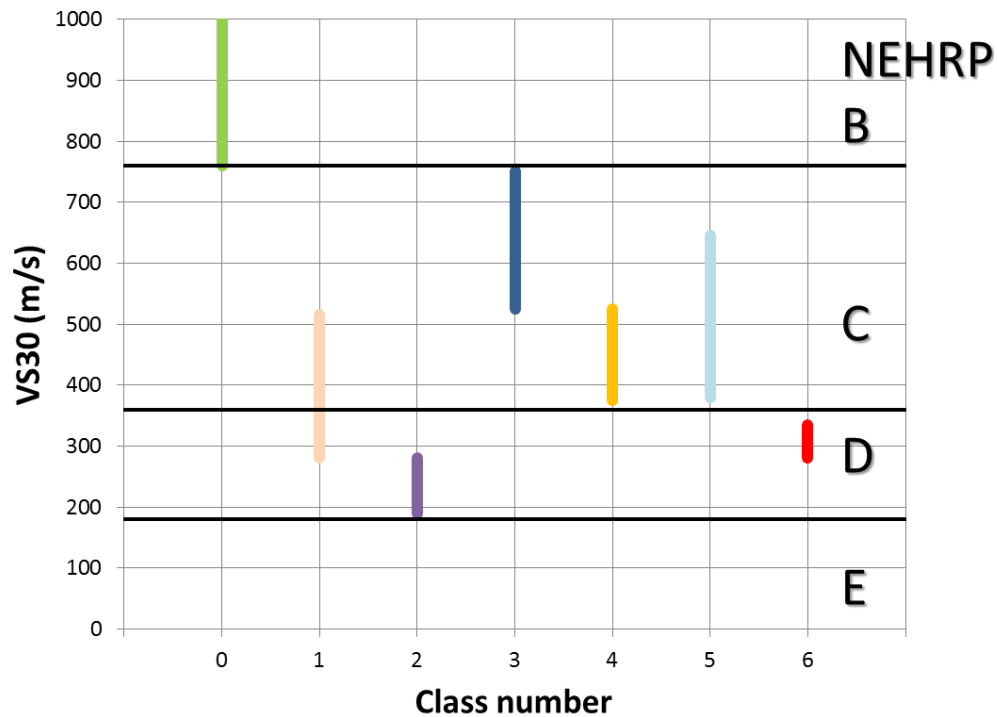


Figure 18 : Gammes de VS30 correspondant à chaque classe de sol (droites verticales colorée) et comparaison avec les VS30 associées aux classes de sols NEHRP (délimitées par les droites horizontales noires)

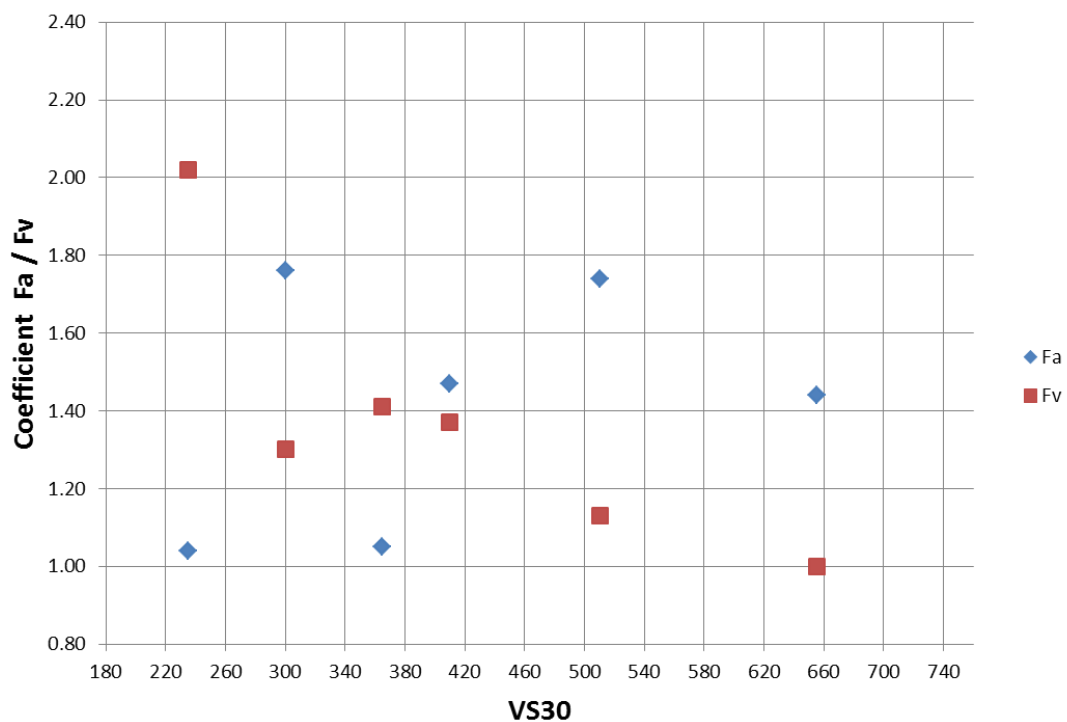


Figure 19 : Relation entre coefficients d'amplification  $F_a$ ,  $F_v$  de chaque classe de sol et les valeurs moyennes de VS30 de chaque classe.

### 5.2.3 Préconisations pour l'aménagement

#### 5.2.3.1 Informations qualitatives d'effets de site des classes de sols

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 oscille 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 20 illustre ce phénomène. En 1<sup>ère</sup> approximation la période de résonance d'un bâtiment est égale au nombre d'étages divisé par 10. Pour des sols meubles, le spectre de réponse a son maximum décalé vers les périodes longues, les immeubles de grande hauteur subissent une agression plus forte que les immeubles bas. Pour les sols rigides, le spectre de réponse a son maximum décalé vers les courtes périodes : les immeubles de faible hauteur subissent une agression plus forte dans ce cas.

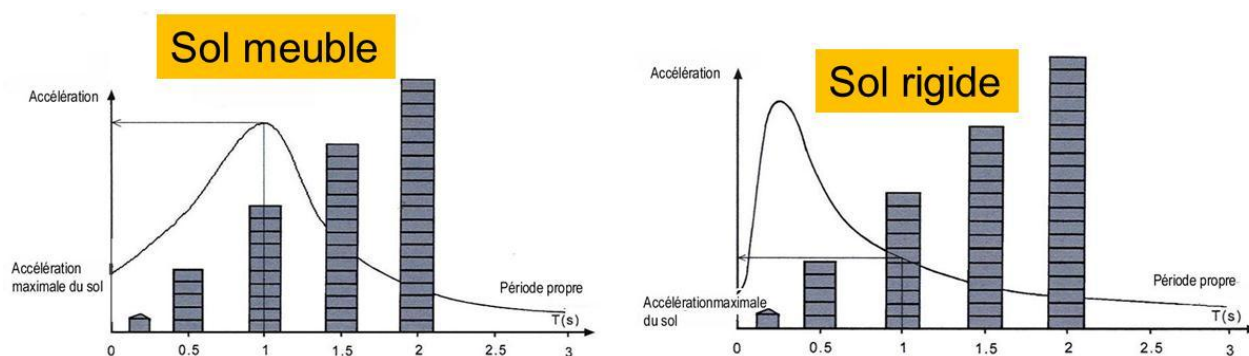


Figure 20 : Spectre de réponse des sols et période de résonance de bâtiment. Les immeubles élevés (ou souples) subissent une agression plus forte sur des sols meubles. A l'inverse des effets de site associés à des sols rigides affectent plus particulièrement les immeubles bas. Ce type de comparaison n'est valable qu'à épaisseur de sol comparable dans les deux cas

En dehors des spectres de dimensionnement, qui intègrent ces effets, et qui sont utilisés par les constructeurs, il est important de donner également une information qualitative sur les caractéristiques des sols, ceci afin de fournir des éléments d'aide à la décision pour une meilleure adaptation des projets d'aménagement au sol.

Ainsi, les classes de sols définies pour l'agglomération de Port-au-Prince peuvent être qualifiées en trois niveaux d'effets de site « faible à moyen », « moyen à fort », « fort » (Tableau 6). Ces niveaux sont déterminés en fonction des valeurs des coefficients  $F_a$  et  $F_v$ . On distingue :

- les effets sur les bâtiments de courte période propre ( $< 0,2$  s), généralement des bâtiments à structures rigides ou de faible hauteur, ils sont corrélés au coefficient  $F_a$  du spectre de réponse ;

- les effets sur les bâtiments de période propre plus longue ( $> 0,2$  s) généralement des bâtiments à structures plus souples ou de plus grande hauteur, ils sont corrélés au coefficient  $F_v$  du spectre de réponse.

Cette qualification de l'importance des effets site pour les classes de sol du microzonage est donnée sur le Tableau 6.

De fortes amplifications sont possibles pour les immeubles souples ou de grande hauteur sur les sols de la classe 2. A l'inverse sur les sols de classes 5 et 6, les bâtiments rigides ou de faible hauteur, sont susceptibles de subir une agression plus forte.

Tableau 6 : Information qualitative sur les effets de site attendus pour chaque classe de sol

| Classe de sol | Effets de site<br>sur bâtiment rigide<br>ou de faible hauteur | Effets de site<br>sur bâtiment souple<br>ou de grande hauteur |
|---------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| classe 0      | sans effets de site                                           | sans effets de site                                           |
| classe 1      | faible à moyen                                                | moyen à fort                                                  |
| classe 2      | faible à moyen                                                | fort                                                          |
| classe 3      | moyen à fort                                                  | faible à moyen                                                |
| classe 4      | moyen à fort                                                  | moyen à fort                                                  |
| classe 5      | fort                                                          | faible à moyen                                                |
| classe 6      | fort                                                          | moyen à fort                                                  |

### 5.2.3.2 Informations qualitatives des sols de fondations

En fonction de la nature des sols et de ses propriétés mécaniques, la portance des sols n'est pas la même et le mode de fondation pour les projets de bâtiment doit être adapté. Le tableau 1.7.4 du code CNBH illustre cette influence et est reporté ici sur le Tableau 7

Tableau 7 : Influence des sols sur la fondation (d'après CNBH2012)

| Catégorie de sol                                 | Type de sol                                             | Caractéristiques mécaniques | Recommandations                                     |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------|
| Sols mous, liquéfiables (nappe phréatique haute) | Argiles, limons, remblais, sables lâches                | Faibles                     | Sites à éviter                                      |
| Formations compressibles                         | Tourbes, vases, mangroves                               | Très faibles                | Sites à éviter                                      |
| Alluvions sableuses                              | Sables                                                  | Faibles                     | Fondations spéciales; avis géotechnique obligatoire |
| Alluvions compactes                              | Granulométrie variable                                  | Moyennes                    | Avis géotechnique fortement recommandé              |
| Sols d'altération                                | Formations volcaniques altérées                         | Moyennes                    | Avis géotechnique fortement recommandé              |
| Sols durs, compacts                              | Argiles dures, silts, sables ou graviers durs ou fermes | Moyennes à bonnes           | Portance satisfaisante                              |
| Tufs, schistes argileux                          | Tufs calcaires, argiles à blocs calcaires               | Moyennes à bonnes           | Portance satisfaisante                              |
| Substrat fissuré ou sain                         | Milieu rocheux, volcanique ou calcaire                  | Bonnes à très bonnes        | Conditions optimales                                |

L'information qualitative sur la portance à associer aux 7 classes de sol du microzonage sismique est donnée dans le Tableau 8.

La portance des sols est définie en trois niveaux :

- « **faible à moyenne** » pour les sols mous pour lesquels des fondations spéciales sont à prévoir ;
- « **moyenne à bonne** » pour des sols de portance moyenne où le mode de fondation doit être apprécié au cas par cas ;
- « **bonne** » pour des sols avec des conditions optimales pour des projets courants.

*Tableau 8 : Information qualitative sur la portance des 7 classes de sols de l'agglomération de Port-au-Prince*

| Classe de sol<br>(Microzonage) | VS30 (m/s) | Portance du sol de<br>fondation |
|--------------------------------|------------|---------------------------------|
| classe 0                       | > 760      | Bonne                           |
| classe 1                       | 365        | Faible à moyenne                |
| classe 2                       | 235        | Faible à moyenne                |
| classe 3                       | 655        | Moyenne à bonne                 |
| classe 4                       | 410        | Faible à moyenne                |
| classe 5                       | 510        | Moyenne à bonne                 |
| classe 6                       | 300        | Faible à moyenne                |

**La présence de sols qualifiés de portance faible à moyenne, devra conduire à la plus grande méfiance.** Un avis géotechnique sera nécessaire pour définir le mode de fondation le plus adapté.

De plus, pour le mode de fondation, le phénomène de liquéfaction des sols est aussi à prendre en considération (cf. paragraphe 5.4)

## 5.3 EFFETS DE SITE TOPOGRAPHIQUES

### 5.3.1 Phénomène

Certaines configurations topographiques (cf. Figure 21) peuvent entraîner des amplifications notoires d'un signal sismique, entraînant une augmentation locale de l'intensité du tremblement de terre. Il s'agit de zones de rupture de pente, de crête, de bordure de plateau, de sommet.

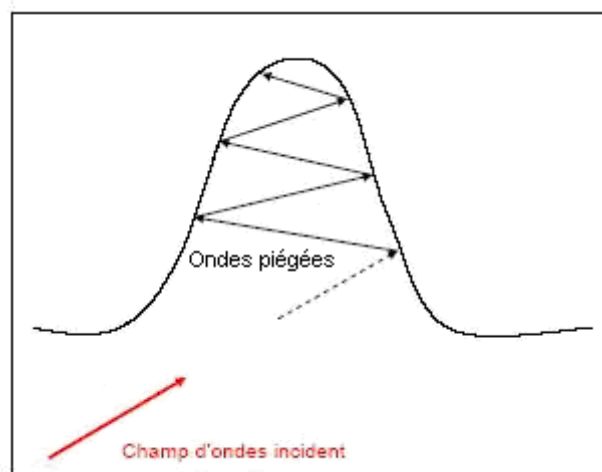


Figure 21 : Principe des effets topographiques

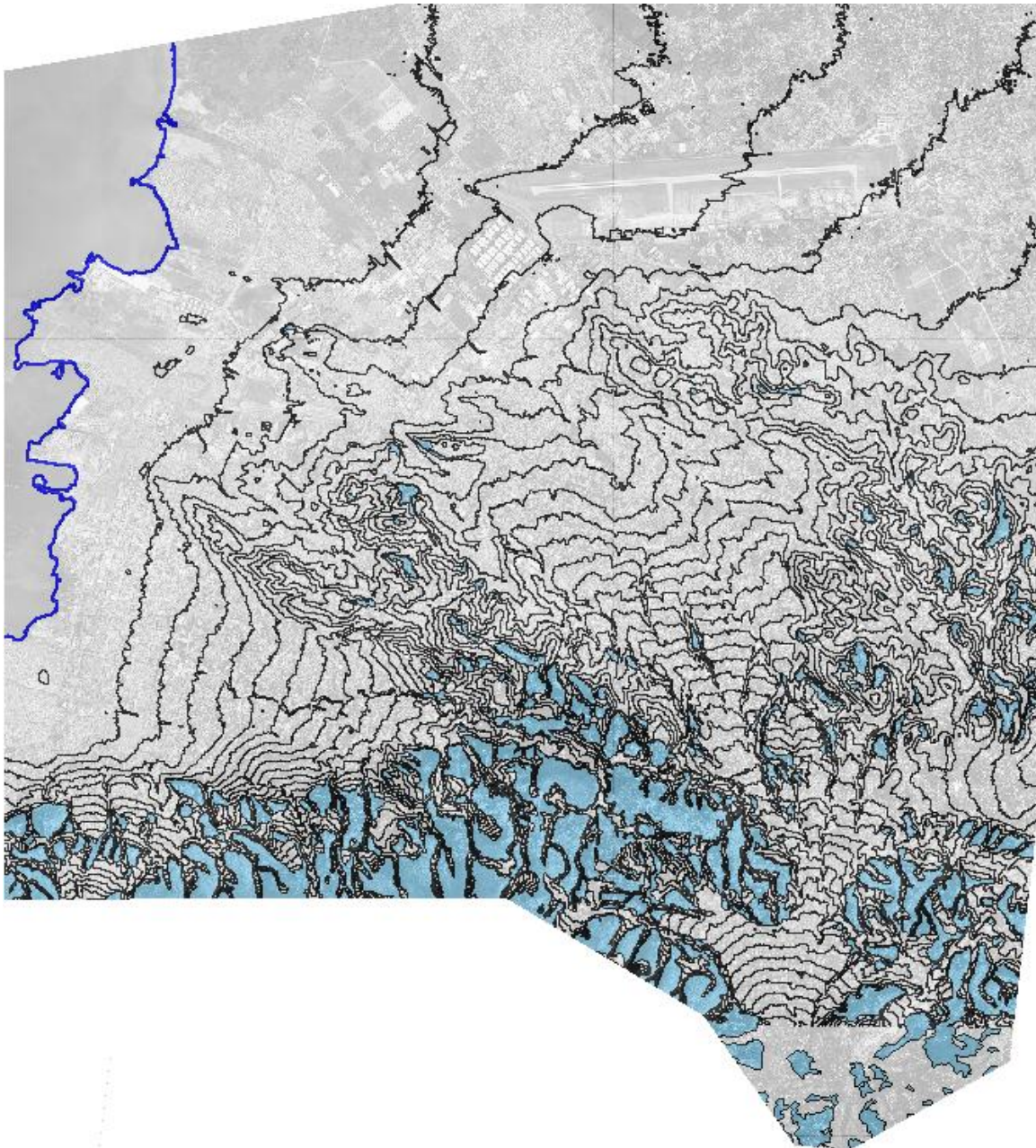
L'amplification est difficile à quantifier du fait de la complexité physique du phénomène. En effet, celle-ci dépend à la fois de la nature des ondes sismiques considérées, de leur incidence, de la géométrie 3D du relief, mais également des formations géologiques en place. Aussi la modélisation quantitative est encore du domaine de la recherche.

### 5.3.2 Cartographie de l'aléa

L'approche proposée est une approche forfaitaire telle que pour les microzonages sismiques en France (EC8). Les spectres de réponse pour le dimensionnement des bâtiments sont augmentés d'un coefficient d'amplification forfaitaire  $\tau$  en fonction de la pente sans privilégier de fréquence particulière. La méthodologie de calcul est détaillée dans le rapport de Belvaux et al., (2013).

La cartographie des zones exposées à un effet de site topographique est donc faite de façon qualitative en indiquant les zones où un coefficient multiplicatif  $\tau$  (prenant une valeur entre 1 et 1.4) pourrait être applicable.

Le zonage est illustré sur la Figure 22 et la planche 3. Ce phénomène concerne en premier lieu le sud de l'agglomération. Il n'est pas limité à une formation géologique particulière.



*Figure 22 : Zonage des effets de site topographiques possibles au niveau de l'agglomération de Port-au-Prince. En bleu clair, les zones où l'effet de site topographique est à considérer avec la prise en compte d'un coefficient multiplicatif applicable au spectre de dimensionnement.*

### 5.3.3 Limites de validité et précautions d'usage

La cartographie est fortement dépendante de la résolution du MNT utilisé (ici un pas de 10 m). Le zonage n'est donc pas précis à l'échelle d'une parcelle de terrain.

La carte est uniquement informative pour repérer les zones où l'on doit se préoccuper de ce phénomène.

#### 5.3.4 Préconisations pour l'aménagement

La cartographie du zonage d'effet de site topographique indiquera les zones où ce phénomène devra être pris en compte pour le dimensionnement d'ouvrage. Pour tout projet à l'échelle d'une parcelle, il reste nécessaire d'évaluer la pente du terrain, pour déterminer si on doit appliquer un coefficient multiplicatif forfaitaire  $\tau$  au spectre de dimensionnement et éventuellement moduler la valeur de ce coefficient en fonction de la pente.

Le caractère obligatoire ou non en fonction de la classe de bâtiment devra être donné par les règles parasismiques applicables en Haïti ou défini localement par un Plan de Prévention des Risques.

**Par défaut, la valeur maximale de ce coefficient forfaitaire est  $\tau= 1.4$ .** Les conditions de prise en compte (valeur du coefficient, critères de pente, catégorie d'importance du bâtiment concerné) sont fixées par la réglementation parasismique nationale ou locale.

A noter que le code de construction IBC ne donne pas de prescription vis-à-vis de l'effet de site topographique. Des conditions d'applications sont mentionnées par le code européen EC8 et pourraient servir d'exemple.

## 5.4 LIQUEFACTION DES SOLS

### 5.4.1 Le phénomène et les effets attendus

La liquéfaction est une perte de résistance au cisaillement du sol créée par une quasi annulation de la contrainte effective par augmentation de la pression interstitielle. Celle-ci est entre autre causée par les sollicitations cycliques générées par un séisme (Figure 23).

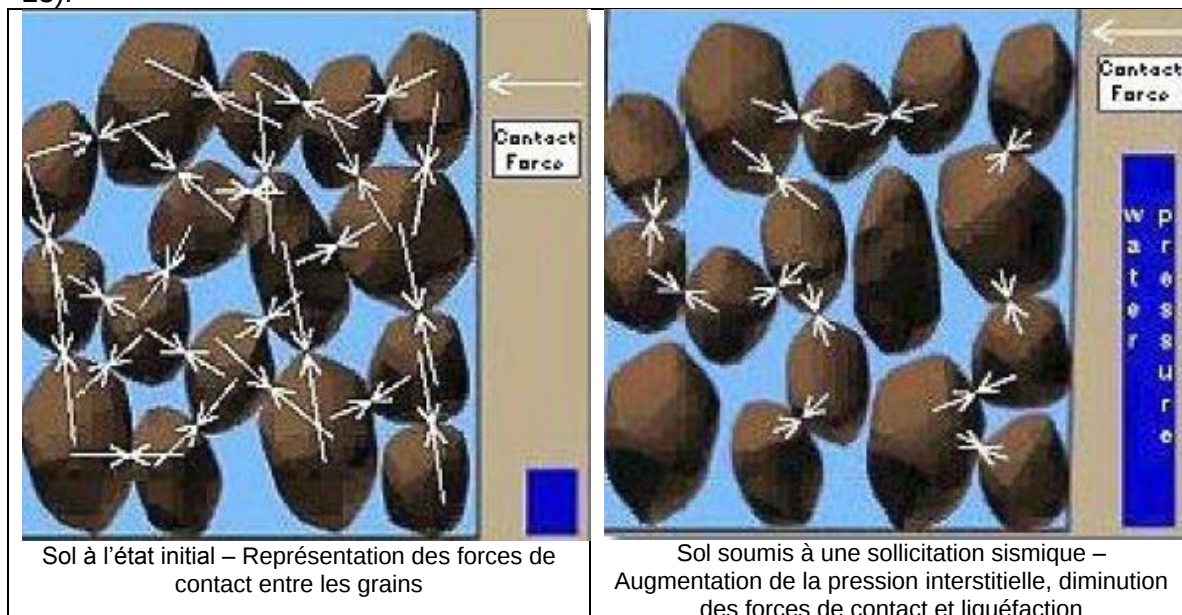


Figure 23 : Schéma d'explication du phénomène de liquéfaction

Les retours d'expériences montrent que la liquéfaction concerne uniquement les sols situés à moins de 20 m de profondeur et qu'elle se produit le plus souvent sur des sols non cohérents lâches et saturés, tels que, par exemple, des alluvions récentes ou des remblais hydrauliques non compactés.

Les conséquences de ce phénomène se manifestent en surface par des déformations du sol, d'autant plus importantes que l'épaisseur de sol liquéfié est grande : apparition de « volcans de sable », tassement, poinçonnement, glissement latéral, etc. Ces déformations peuvent être particulièrement dommageables pour les constructions.

Suite au séisme de 2010, de tels désordres ont été observés en de nombreux endroits sur la bordure littorale de Port-au-Prince et des villes environnantes (Figure 28).

Figure 24 : Effet de la liquéfaction – Glissement latéral observé sur le port de Port-au-Prince (Haïti) suite au séisme du 12/01/2010



### 5.4.2 Cartographie de l'aléa

L'évaluation de l'aléa liquéfaction se base en grande partie sur le guide édité par l'AFPS en 1993 et sur les travaux du NCEER présentés par Youd et al., 2001.

Elle nécessite une analyse synthétique des données issues de la carte géologique et des sondages géotechniques, en particulier les résultats des essais en laboratoire et ceux des sondages SPT et CPT. Les calculs comparent les contraintes de sollicitations à la résistance du sol. Ils prennent en compte la magnitude du séisme de référence et les pics d'accélération du sol (PGA). Ils aboutissent à une note allant de 0 à 100. Cette note correspond à un niveau d'aléa : nul, faible, moyen ou fort.

Aboutir à un niveau de dommage nécessiterait de croiser l'aléa à la vulnérabilité des constructions. Pour un bâtiment d'importance moyenne (quelques étages), on peut associer, en première approche, **l'aléa fort** à la ruine probable d'un tel bâtiment, **l'aléa moyen** à des désordres sérieux, **l'aléa faible** à des désordres a priori réparables et **l'aléa nul** à l'absence attendu de tout désordre. Quelques outils existent pour évaluer l'intensité de ces dommages.

Les analyses « calculatoires » et statistiques ont été réalisées sur 92 sondages, répartis sur 53 sites. Un exemple est illustré sur la Figure 25. La méthodologie et les calculs sont détaillés dans le rapport de Belvaux et al., (2013).

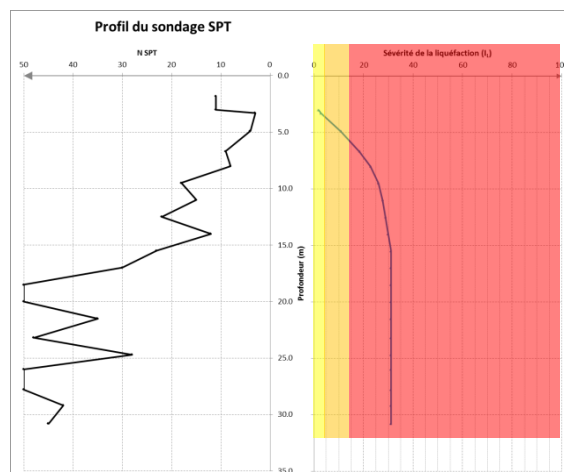
Certaines zones, encore mal connues, ont fait l'objet d'interpolations ou d'extrapolations à partir des analyses les plus proches.

*Figure 25 : Evaluation de l'aléa - exemple du traitement du sondage SPT-RPàP-6*

*A gauche : le profil du sondage SPT-RPàP-6 ;*

*A droite : la sévérité de la liquéfaction IL ;*

*Ici :  $IL = 31.1$ , ce qui correspond à un aléa fort.*



Les terrains présentant le plus fort risque de liquéfier sont en premier lieu les remblais de la bordure littorale (aléa fort), puis les alluvions récentes fluvio-marines (bordure littorale) et les alluvions fluviales (situés autour de la Rivière Grise) (aléa moyen et faible). Le reste de la zone d'étude n'est pas soumis à l'aléa liquéfaction (aléa nul).

La carte de l'aléa liquéfaction est présentée sur la Figure 26 et la planche 5.

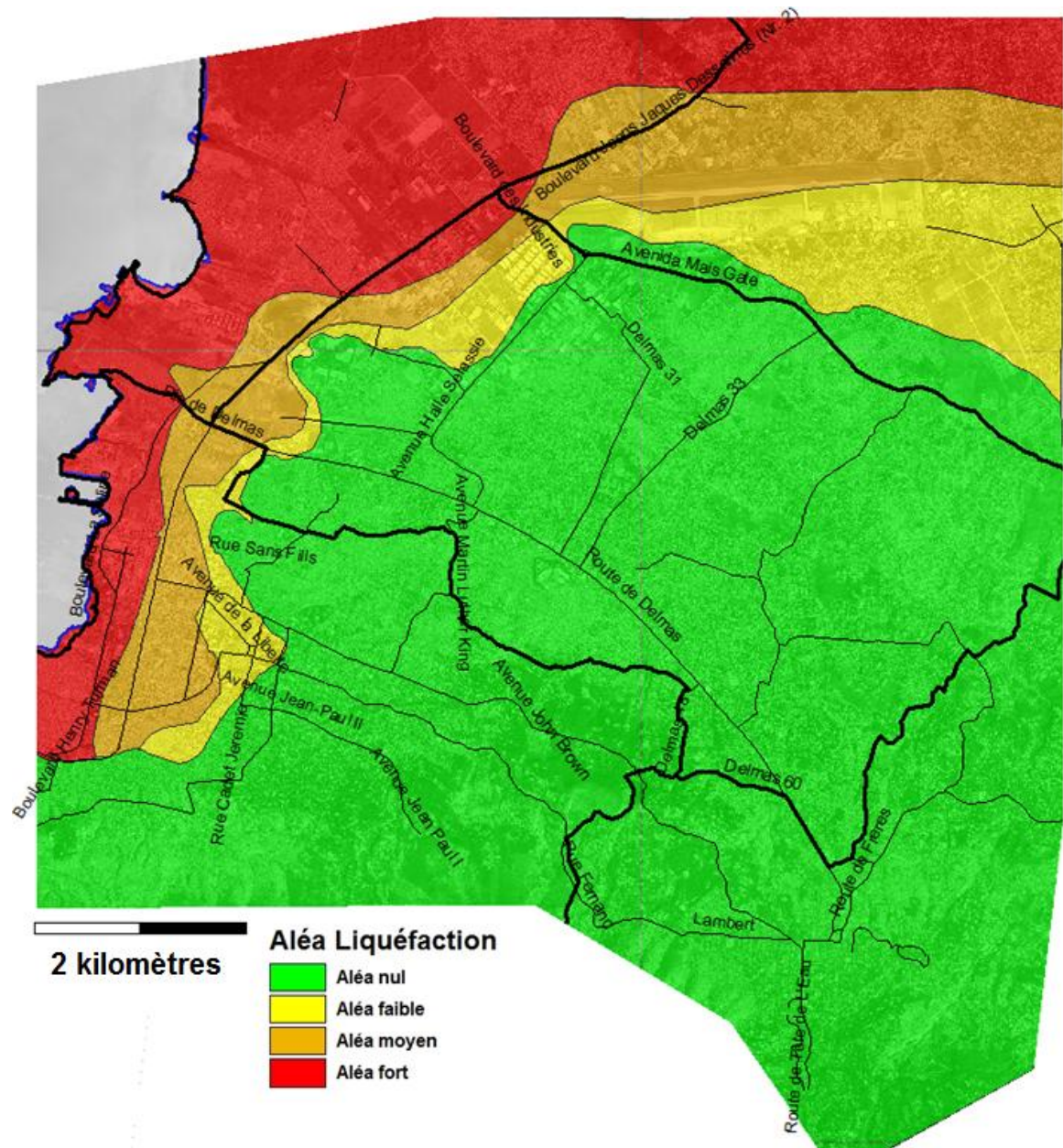


Figure 26 : Cartographie de l'aléa liquéfaction

#### 5.4.3 Limites de validité et précautions d'usage

Comme précédemment expliqué, la carte d'aléa a été réalisée sur la base d'études géotechniques ponctuelles. Pour en tirer profit lors de prochaines études, il sera intéressant d'utiliser dans un premier temps les études les plus proches et, si nécessaire, d'en réaliser de nouvelles. Il convient de rappeler que certains quartiers contiennent actuellement peu de données : Bicentenaire, Cité Soleil, zone portuaire, voisinage de la rivière Grise, etc.

#### 5.4.4 Préconisations pour l'aménagement

Les adaptations constructives à mettre en place pour limiter les effets de la liquéfaction sur les constructions reposent sur plusieurs principes, chacun visant à améliorer un ou plusieurs des « ingrédients » concourant au phénomène (Figure 27). Les sols de faible

résistance peuvent dans certains cas être remplacés par de meilleurs matériaux. Leur « tenue » peut également être améliorée par un traitement en place (injection de coulis par exemple). L'eau dans le sol peut aussi être gérée de manière à diminuer la probabilité de liquéfaction. Enfin, les couches problématiques peuvent être « contournées » par la mise en place de fondations profondes (pieux).

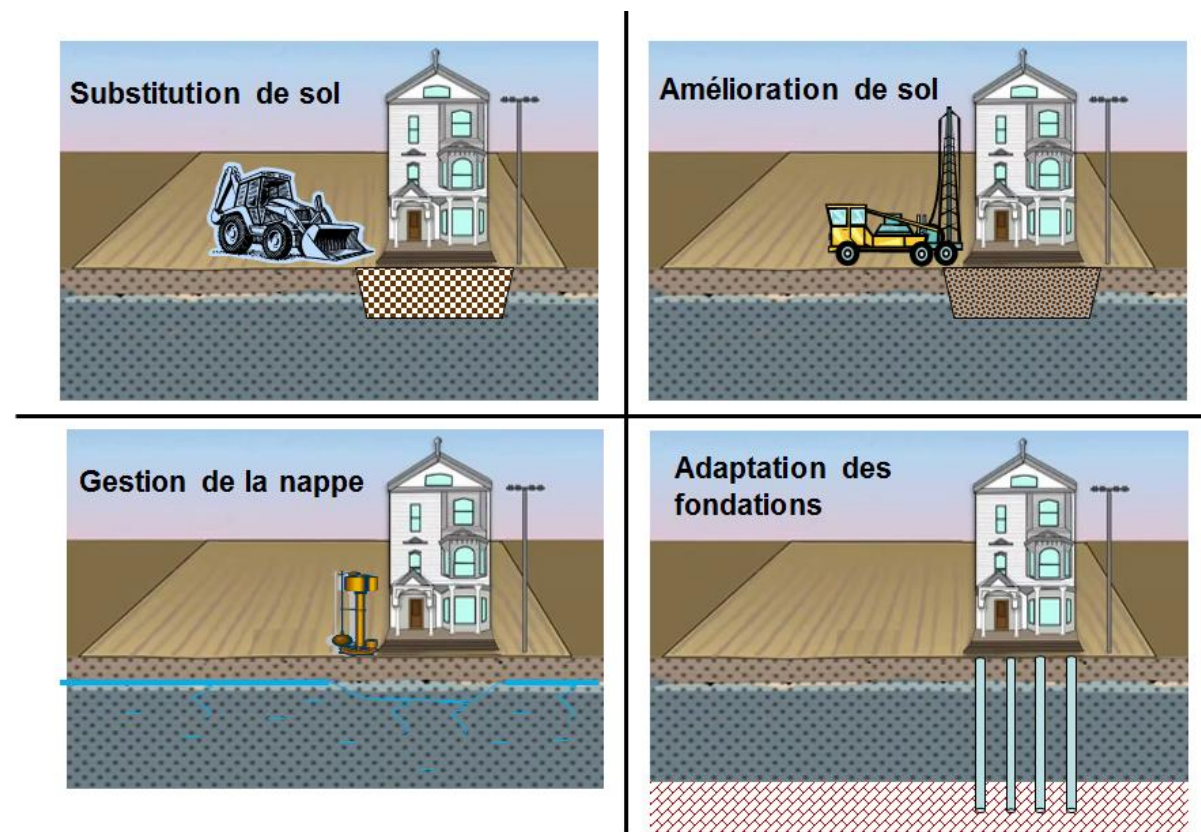


Figure 27 : Adaptations constructives, principes des solutions techniques existantes

Ces principes doivent toujours être étudiés au cas par cas. Une solution optimale ne peut être choisie qu'en fonction des caractéristiques du site, du projet, et bien sûr de son coût.

## 5.5 RUPTURE DE SURFACE DE FAILLES ACTIVES

### 5.5.1 Le phénomène et les effets attendus

Une faille peut être considérée comme active si elle a subi au moins une réactivation sismique au cours du Quaternaire, ou si elle montre des évidences de déplacement actuel. Lorsqu'une faille active à l'origine d'un séisme débouche en surface, elle peut induire des déplacements le long de la ligne de rupture (rupture des terrains à la surface du sol).

Les bâtiments et infrastructures construites sur la faille, en plus de subir de fortes accélérations du sol, seront fortement affectés par ces déplacements en surface.

### 5.5.2 Cartographie

La méthodologie et l'analyse ayant conduit à la cartographie est détaillée dans le rapport de Terrier et Bialkowski (2013).

A partir des observations tectoniques et stratigraphiques, ainsi que des données morphologiques, une cartographie des failles est proposée dans le cadre d'une cartographie géologique préliminaire faite spécifiquement pour ce microzonage sismique (Figure 28 et planche 1). Nous y distinguons :

- les segments de failles observés sur le terrain (en rouge sur la figure),
- les segments interprétés sur la base de données morphologiques (en mauve sur la figure),
- les segments interprétés comme possibles mais masqués par des formations récentes ou non décelables dans le paysage (en vert sur la figure).

Les failles sont qualifiées de majeures ou mineures. Les failles majeures correspondent à des structures tectoniques plus importantes dans le schéma tectonique proposé, du fait de la régularité et longueur de leur tracé mais aussi de leur empreinte dans la morphologie et de l'intensité des déformations tectoniques observées.

Parmi ces failles plus importantes que d'autres, nous pouvons citer:

- **f1**, bordant le flanc nord du morne Bourdon, qui se poursuit vers l'est en direction de Bois Neuf puis Frères jusqu'à la Rivière Grise,
- **f3**, interprétée ou visible depuis Turgeau, jusqu'à morne Hercule, puis les quartiers Berthe et Métivier,
- **f4**, visible depuis les quartiers Martissant et Deprez jusqu'au morne Calvaire où elle se connecte au système de failles d'Enriquillo.

La faille f2, cartée depuis les mornes Canapé Vert, Lazare puis le quartier Meyotte se connecte au SE à la faille F3. Contrairement aux failles f1, f3 et f4, elle n'apparaît pas comme un contact faillé régulier entre deux formations lithologiques.

### 5.5.3 Poursuite des études

Les tracés et évaluations de taux d'activité ne sont ici que préliminaires et nécessiteraient des travaux plus approfondis pour réduire les incertitudes.

A cette fin, l'analyse pourrait être poursuivie par des reconnaissances géophysiques locales (profils sismiques sur 50 à 100 m de profondeur et réalisés perpendiculairement

à leur tracé) puis la réalisation de tranchée(s) paléosismique(s) et la datation des formations géologiques.

#### **5.5.4 Recommandations pour la prise en compte des failles actives dans le cadre du microzonage de Port-au-Prince**

Dans l'attente d'études complémentaires et pour une prise en compte dans une politique future d'aménagement, les recommandations suivantes peuvent être émises :

Les failles f1, f3 et f4 sont probablement actives. Il est souhaitable de prévoir de part et d'autre de ces failles une bande de neutralisation de part et d'autre des tracés indiqués. La largeur de cette bande pourrait être de 100m. Au niveau de ces bandes nous préconisons dans la mesure du possible l'inconstructibilité des bâtiments à forts enjeux tels que les écoles, les hôpitaux, les centres de secours ou les bâtiments stratégiques en cas de crise.

A défaut, au niveau des bandes de failles, une valeur forfaitaire de dimensionnement pour la prise en compte des ruptures en surface devrait être retenue. Nous préconisons la prise en compte d'un rejet possible de 0,5m, valeur qui correspondrait à un séisme de magnitude 6,5, pour une rupture décrochante - inverse d'un plan de faille sur une longueur moyenne de 15 à 20 km.

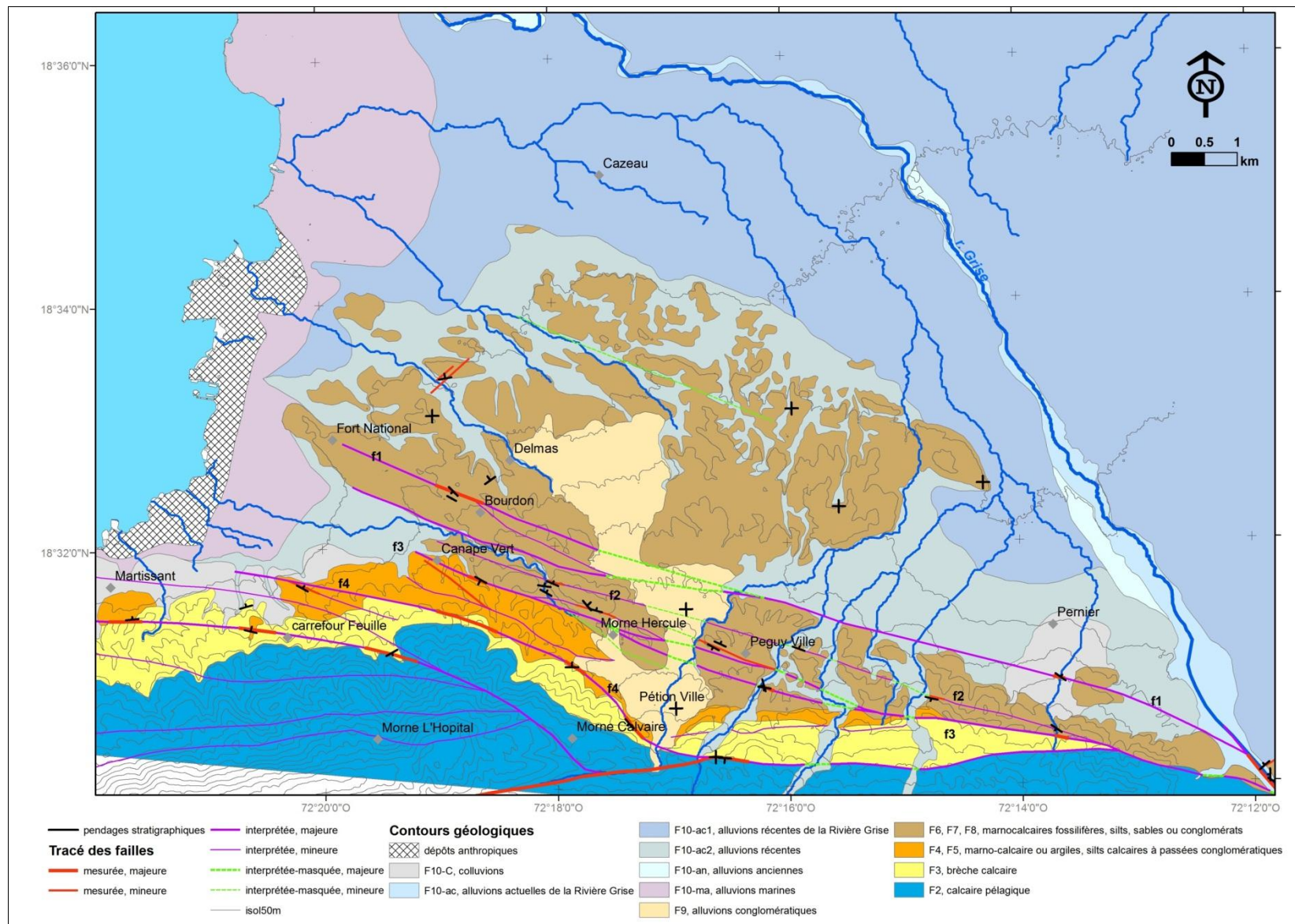


Figure 28 : Carte géologique préliminaire de l'agglomération de Port-au-Prince

## 5.6 MOUVEMENTS DE TERRAIN

La cartographie de l'aléa mouvement de terrain a fait l'objet d'un rapport spécifique (Terrier et Nachbaur, 2013). Il convient de s'y référer pour une description plus détaillée. Nous ne reprenons ici que les principaux résultats en rapport direct avec la cartographie.

### 5.6.1 Typologie

Au vu des observations, deux catégories de mouvements de terrain susceptibles d'affecter la zone étudiée sont retenues : des **glissements de terrain** (ex Figure 29), potentiellement de grande ampleur voire très grande ampleur et des **chutes de bloc**, plus localisées (Figure 30).



*Figure 29 : Glissement Djobel 3 depuis le versant opposée. Source BRGM 2012*

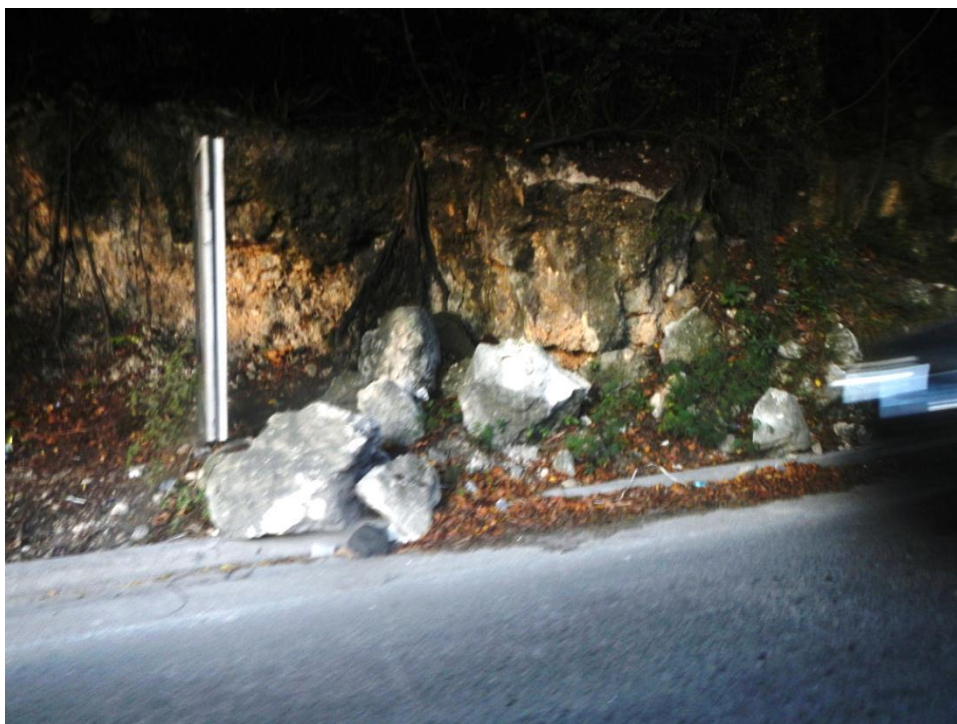


Figure 30 : Chute de blocs sur la chaussée de la route PanAméricaine.

### 5.6.2 Cartographie de l'aléa

La carte d'aléa est présentée en Figure 31 et sur la planche 4. Elle distingue les lieux concernés par des événements de type glissement de terrain (GI, trame colorée sur la Figure 31) des événements chutes de blocs (G, trame hachurée ou avec des petits triangles). Il ressort que l'aléa glissements concerne près de la moitié du territoire étudié, tandis que le phénomène de chutes de bloc, concentré sur la frontière sud de la zone étudiée, sur les contreforts du massif de la Selle, concerne moins de 10%. Par son emprise et l'ampleur de ses dégâts, les glissements de terrain restent largement le phénomène le plus fréquent et le plus dommageable. La carte d'aléa distingue :

**Les zones d'aléa faible à nul** : Il s'agit notamment des zones plates ou de faible pente (inférieures à 5°). Ce sont des zones non ou très peu concernées par les glissements de terrain ou les chutes de blocs : les quelques phénomènes qui peuvent survenir sont d'ampleur limitée.

**Les zones d'aléa modéré, GI1** : il s'agit de zones qui peuvent être affectées par des glissements de terrain d'ampleur limitée (centaines de m<sup>3</sup> pour les glissements de terrain) ou plus exceptionnellement d'ampleur moyenne (milliers de m<sup>3</sup>). Il s'agit de zones de faible pente (entre 5 et 10° en moyenne), concernées par des formations marneuses, marno-calcaires ou silts miocènes (Formations F4 à F8 de la Figure 28).

**Les zones d'aléa moyen, GI2 et C2 :**

- GI2 : ce sont des zones qui peuvent régulièrement être affectées par des glissements de terrain de moyenne ampleur (milliers de m<sup>3</sup>) et, de façon plus exceptionnelle, par des phénomènes de plus grande ampleur (dizaines de milliers de m<sup>3</sup>). Il s'agit soit de zones de faible pente (10 à 20° en moyenne) avec une géologie défavorable (marnes, marno-calcaires, silts, alluvions, soit encore de zones soumises à la propagation de glissements venant de l'amont, mais d'ampleur limitée ;

- C2 : ce sont des zones qui concernent les terrains rocheux de pente généralement supérieure à 15°, ainsi que les zones exposées à la propagation de blocs venant de l'amont.

**Les zones d'aléa fort, GL3:** Il s'agit pour l'essentiel de zones où des glissements de terrain superficiels sont fréquents, des zones déjà exposées à des glissements de grande ampleur, et/ou des phénomènes de grande ampleur peuvent se produire. Il s'agit des pentes moyennes à fortes avec une géologie ou une occupation du sol défavorable, ou des zones soumises à la propagation de glissements venant de l'amont et de forte ampleur. On retrouve ainsi en aléa fort les ravines et les pieds de versant, réceptacles des matériaux glissés en provenance de versants et éventuellement remobilisables sous forme de coulées de boues dans les ravines. Ces zones peuvent aussi concerner des secteurs exposés à des chutes de blocs très fréquentes, sur des pentes supérieures à 30°. Toutefois, le volume impliqué est généralement faible, il ne s'agit pas d'éboulement rocheux de plusieurs milliers de m<sup>3</sup> et a fortiori d'écroulement rocheux.

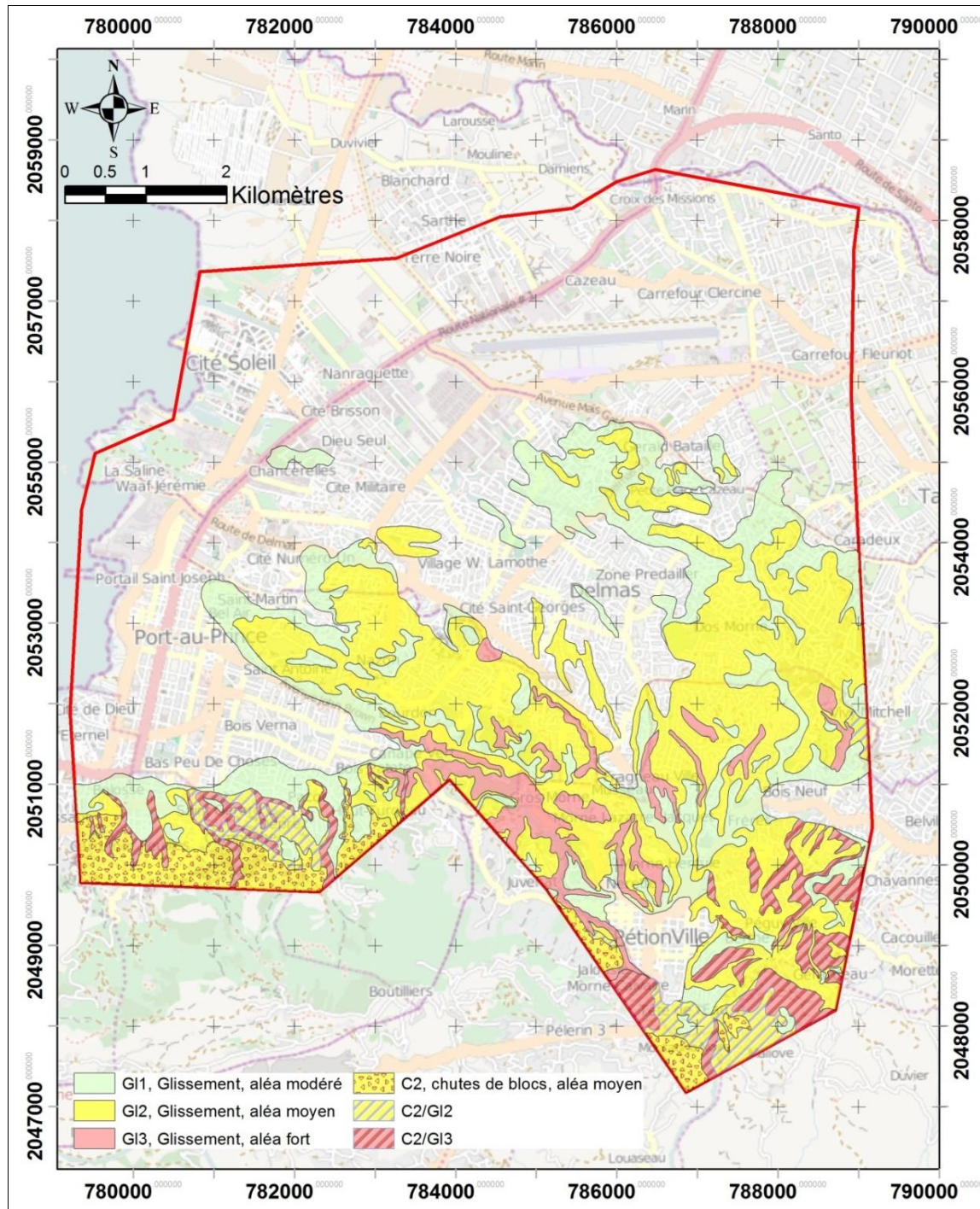


Figure 31 : Carte d'aléa mouvements de terrain, Gl= Glissement de terrain, C= chute de bloc

### 5.6.3 Limites de validité et précaution d'usage

Les zones d'aléa faible à négligeable sont des zones très peu concernées par les mouvements de terrain : les quelques phénomènes qui peuvent survenir sont de faible ampleur. Cependant, il ne faut pas les considérer comme exemptes de risque ; ce n'est pas le cas.

Les préconisations et/ou règlements associés doivent tenir compte des aléas résiduels et doivent notamment s'attacher à ce que le risque ne soit pas aggravé par certaines actions, notamment anthropiques. En exemple, un terrassement peut conduire à déclencher des glissements en amont ; une mauvaise gestion des eaux peut aggraver le risque en aval.

L'échelle de validité dépend de l'échelle de travail d'une part et de la précision des données d'entrées d'autre part. Elle est établie ici au 1/10 000. Le zonage pourrait être affiné ou précisé à l'aide d'informations supplémentaires, notamment par des reconnaissances géophysiques ou une caractérisation géotechnique et hydrogéologique des terrains.

#### 5.6.4 Préconisations pour l'aménagement

Le chapitre 5 du rapport de Terrier et Nachbaur (2013) donne des pistes de réflexions et des propositions pour une transposition de ces cartes d'aléa en document réglementaire de type Plan de Prévention des Risques. Celles-ci sont données uniquement à titre indicative.

De façon générale :

- **Zone d'aléa nul à négligeable (non cartographié) :** Les phénomènes redoutés étant de faible ampleur, ces zones ne font pas l'objet de recommandation particulière. Cependant, les règles de l'art en matière de terrassement et de construction devront absolument être respectées, notamment dans le but de ne pas aggraver le risque ailleurs et donc en tenant compte de l'environnement amont et aval.
- **Zone d'aléa modéré :** Les phénomènes peuvent être traités au niveau de la parcelle ou de quelques parcelles, la zone reste donc constructible sous conditions. Ces précautions concernent le défrichement, les terrassements, les soutènements, l'interdiction de dépôt de remblais, la maîtrise des eaux de ruissellement, etc. Ces zones doivent faire l'objet d'une vigilance particulière, car des aménagements ne prenant pas en compte le risque de mouvements de terrain pourraient aggraver la situation, non seulement sur les parcelles considérées, mais également à l'aval. Des programmes sur les aménagements existants, visant à réduire l'aléa, pourront aussi être menés dans certaines zones.
- **Zone d'aléa moyen :** Les phénomènes peuvent concerner une grande partie du versant (glissement de terrain de moyenne à grande ampleur). Une étude géotechnique est donc recommandée sur l'ensemble du versant avant tout projet de construction sachant que la réduction de l'aléa ou l'aménagement de ces zones pourra nécessiter un traitement à l'échelle du versant. Suite à une étude géotechnique plus détaillée, face aux contraintes techniques et économiques nécessaires pour stabiliser le versant, le choix pourra être pris de rendre le versant ou une partie du versant en zone inconstructible. Concernant les constructions existantes, toutes les mesures seront prises pour ne pas aggraver l'état existant et ce, notamment dans le cadre de modifications. Pour les phénomènes de chutes de blocs, des parades peuvent être mises en œuvre. Elles peuvent néanmoins être plus ou moins coûteuses selon le volume impliqué et la zone géographique concernée.
- **Zone d'aléa fort :** Il s'agit de zones de glissement de terrain de grande à très grande ampleur actif ou potentiel. Ces zones ne doivent donc pas faire l'objet de nouvelles constructions à usage d'habitation et a fortiori à enjeu élevé. Concernant les secteurs bâtis dans des zones d'aléa fort, il faudra choisir au cas par cas, entre des travaux de réaménagement permettant de réduire l'aléa (zones de remblais, maîtrise des eaux de ruissellement et d'infiltration par exemple), et des déplacements d'habitation dans les cas les plus dangereux (habitations dans des lits de ravines ainsi que sur les

fortes pentes). Dans tous les cas des mesures visant à ne pas aggraver l'état existant doivent être préconisées.

Dans certaines zones, du fait de l'intensité et la fréquence de l'aléa, la constructibilité est conditionnée à la réalisation d'une étude préalable destinée à rendre compatible le projet (construction, installations, ouvrages ou équipements) avec le risque considéré.

L'aléa glissement de terrain concerne presque la moitié du territoire étudié, tandis que le phénomène de chutes de bloc concerne moins de 10% du territoire. Par son emprise et l'ampleur de ses dégâts, les glissements de terrain restent largement le phénomène le plus fréquent et le plus dommageable.



## 6 Recommandations d'utilisation

### 6.1 AVERTISSEMENTS

Les cartes ont été réalisées à une échelle donnée et correspondent à un état de connaissance donné. Il convient donc d'être prudent lors d'analyses à une échelle plus précise (celle d'une parcelle par exemple), particulièrement si on est à proximité d'une limite de zone.

Cette étude ne concerne que certains aléas spécifiques (effets de site, faille, mouvement de terrain, liquéfaction). Pour une appréciation correcte des risques naturels au niveau d'un site, ces cartes doivent être croisées également avec d'autres aléas : inondations, submersion marine, cyclones, tsunامي, etc.

Les recommandations données dans les différents paragraphes du chapitre 5 le sont à titre indicatif sans rentrer dans le détail de ce qui relève de la réglementation (interdictions de construire, contraintes spécifiques à respecter avant toute autorisation de construire, prescriptions obligatoires ou non, graduations en fonction des enjeux exposés ...)

La cartographie de microzonage sismique est un outil d'information et la base sur laquelle peut s'appuyer une réglementation parasismique locale à mettre en place. Les décisions d'application relèvent des autorités nationales et locales.

### 6.2 RECOMMANDATIONS POUR LA CONSTRUCTION ET L'AMENAGEMENT

L'aléa sismique est un **aléa fort sur toute l'agglomération de Port-au-Prince quel que soit le site**. L'étude de microzonage sismique montre néanmoins que dans ce contexte d'aléa élevé les effets attendus ne sont pas les mêmes suivant les secteurs :

- L'aléa régional est plus élevé vers Pétionville que vers Cité Soleil du fait d'une plus grande proximité du Système de failles actives Pétionville-Tiburon
- Les terrains à topographie agitée du Sud sont particulièrement impactés par un aléa mouvement de terrain fort sur de larges secteurs, avec, en plus, de l'effet de site topographique sur les crêtes, rebord de talus et fortes pentes. Ces terrains du sud présentent aussi des traces d'activité sur des failles dont l'activité et la cartographie restent encore à préciser.
- A l'inverse, sur les terrains plus plats du littoral et de la Plaine du Cul-de-Sac, si l'aléa est un peu moins élevé du fait d'un plus grand éloignement des sources sismiques et d'une topographie plus favorable, les effets les plus sensibles concernent la lithologie des sols : moindre qualité des sols de fondations, aléa liquéfaction élevé, amplifications des secousses liées aux effets de sites lithologiques.

Dans un tel contexte d'aléa fort, la construction parasismique est une nécessité si on souhaite une réduction significative du risque sismique. Les cartes de microzonage sont des **outils d'aide pour définir les modalités de construction parasismiques adaptées au site d'implantation** :

- spectres de dimensionnement spécifiques pour les bâtiments à étages ;

- conception de bâtiments rigides ou souples et qui ne rentrent pas en résonance car prenant en compte l'effet de site ;
- renforcements supplémentaires en cas d'effet de site topographique ;
- traitement des sols ou fondations adaptées si liquéfaction ;
- ouvrages de protection pour l'aléa mouvement de terrain faible à moyen...

Pour les **projets d'aménagement et les constructions de grands bâtiments**, les cartes de microzonage sont un appui au stade de l'avant-projet. Elles ne remplacent pas les études de sol qui définissent les conditions à l'échelle de la parcelle, mais permettent dans une phase très en amont d'évaluer les contraintes liées au sol et d'optimiser la réalisation technique et le coût.

Pour la **construction de maison individuelle**, il existe des guides d'application élaborés à destination des professionnels du bâtiment, pour des bâtiments de forme simple, de faibles dimensions. Les cartes de microzonages sismiques sont des aides permettant d'une part :

- **de savoir si on est dans les conditions d'exclusion de ces règles simplifiées** de construction liées aux conditions de sols : les pentes trop fortes ( $> 30^\circ$ ), les zones d'aléa mouvement de terrain fort, les sols de fondations trop mous ou soumis à un aléa liquéfaction fort.
- **de connaître les effets locaux de l'aléa sismique auquel le site peut être soumis** : information qualitative sur les effets de site lithologiques ; information qualitative sur la portance des sols ; zonage des effets de sites topographiques ; aléa mouvements de terrain et typologie de mouvement de terrain ; présence de faille active à proximité...

En résumé, cette étude indique pour chaque secteur quel type d'effets consécutifs à la survenance d'un séisme, est à prendre en considération (les ruptures de faille active en surface, les effets de site topographiques, les effets de site lithologiques liés à la nature du sol, les phénomènes de liquéfaction, les mouvements de terrain induits). Elle aide ainsi à adapter l'implantation des constructions et des infrastructures au contexte local dans le cadre d'une politique de prévention et de réglementation parasismique.

### 6.3 RECOMMANDATIONS SUR L'ETAT DE CONNAISSANCE DE L'ALEA

Nous avons essayé autant que possible de découpler les spectres de dimensionnement des classes de sol à effet de site de l'aléa sismique régional. En effet, la référence choisie pour l'aléa sismique régional (Frankel et al., 2010) était une réévaluation rapide de l'aléa effectuée très peu de temps après le séisme de Janvier 2010. Les hypothèses sur l'activité des failles évoluent depuis et l'aléa régional sur Haïti devra certainement être réévalué de façon plus fine. Si l'aléa régional change, les spectres des classes de sol sont re-calculables très facilement à partir des coefficients  $F_a$  et  $F_v$ , sans avoir à mettre à jour cette présente étude, à condition, néanmoins, de rester dans des conditions similaires de niveau d'aléa. Si on change de façon importante ce niveau d'aléa, la réponse des sols aux sollicitations sismiques ne sera pas la même et doit alors être réévaluée.

L'étude des failles a mis en évidence des indices d'activité sur certains accidents. Les investigations menées ici restent insuffisantes pour définir le niveau d'activité et des incertitudes restent sur les tracés en surface. Cette connaissance des failles doit être approfondie par de nouveaux travaux de recherche universitaire.

Enfin, bien que basée sur de nombreuses données collectées ou acquises durant le projet, le sous-sol de Port-au-Prince est par endroit relativement complexe et hétérogène. La base de données du sous-sol qui a été ici constituée doit pouvoir être maintenue et mise à jour régulièrement si on souhaite affiner ce zonage par la suite.

## 6.4 DE L'ALEA AU RISQUE

En plus d'être un outil d'aide à la décision pour l'aménagement du territoire et les constructions nouvelles, le microzonage sismique est aussi une information de base indispensable pour l'évaluation du risque sismique.

Le **scénario de risque sismique** est un autre outil d'aide à la réduction du risque. Grâce à des simulations numériques, il permet d'évaluer sur un territoire, les dommages aux biens et aux personnes qui pourraient être provoqués par un séisme à venir. Les simulations permettent de mettre en évidence les zones à risques les plus importantes aussi bien du fait du comportement des sols que de la typologie de l'habitat.

La simulation des impacts (populations impactées, dommages pressenties) sous forme de scénarios de risque sismique s'appuie sur les évaluations d'aléa local issues des microzonages sismiques.

De nombreux secteurs présentant un **aléa fort** ont été mis en évidence pour l'aléa mouvement de terrain et l'aléa liquéfaction. Pour d'autres secteurs, des effets de sites conséquents peuvent se produire. Ces zones sont déjà fortement peuplées avec un habitat souvent vulnérable.

Elles sont à cibler prioritairement pour des actions de prévention, protection des populations à mener par les autorités compétentes.

Le microzonage sismique peut être un **support de communication et de sensibilisation pour l'information préventive** en fournissant des cartes d'informations sur les risques sismiques et les mouvements de terrain présents sur une commune.

Pour cet objectif, nous recommandons que la **diffusion des cartes soit la plus large possible, à destination notamment des habitants, des milieux éducatifs, des constructeurs/aménageurs, des autorités locales, des services de l'état.**



## 7 Bibliographie

### 7.1 RAPPORTS ANNEXES

Belvaux M., G. Noury, S. Auclair, E. Vanhoudeusden, D. Bertil et équipe microzonage sismique (2013) Microzonage sismique de Port-au-Prince (Haïti) : Effets de site et Liquéfaction. Rapport final BRGM/RC-63102-FR.

Terrier M. et Bialkowski A. (2013) – Microzonage sismique de Port-au-Prince (Haïti) : étude géologique. Rapport BRGM/RP-61243-FR, p.73, ill.39.

Terrier M. et Nachbaur A. (2013) - Microzonage sismique de Port-au-Prince (Haïti) : Carte de l'aléa mouvements de terrain. Rapport BRGM/ BRGM/RC-62440-FR, 93 p., 32 fig., 1 ann.

LNBTP (2012) Etude complémentaire du microzonage de la ville de Port-au-Prince. Rapport définitif d'étude géotechnique. Rapport B-12/420. 83p.

LNBTP (2013a) Etude complémentaire du microzonage de la ville de Port-au-Prince. Rapport définitif d'étude géotechnique (Phase II). Rapport B-13/226. 77 p.

LNBTP (2013b) Etude complémentaire du microzonage de la ville de Port-au-Prince. Rapport définitif d'étude géotechnique (Phase III). Rapport B-13/299-34. 84 p.

### 7.2 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CITEES

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

ASCE 7-05 (2005) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, 2005,

Bachhuber J. L., Rathje E. M., Cox B. R., Dulberg R. A., Kottke A. (2010) Carte géologique de Port-au-Prince. GEER Team, 2010,

Bachhuber J. L., Rathje E. M., Cox B. R., Dulberg R. A., Kottke A., Wood C. (2010) Carte de classification sismique des sols pour Port-au-Prince, Haiti.. GEER Team,

Boisson D, Thimus JF., (2010), Atlas géotechnique de la zone de Pétion-Ville/Frères. Projet pilote de support géotechnique des zones habitables de Port-au-Prince, Editions de l'université d'Haïti.

CNBH (2012) Code National du Bâtiment d'Haïti. Ministère des Travaux Publics, Transports et Communications (MTPTC). Edition Janvier 2013

Cox B.R., Bachhuber J., Rathje E., Wood C.M., Dulberg R., Kottke A., Green R.A., Olson S.M. (2011), Shear Wave Velocity- and Geology-Based Seismic Microzonation of Port-au-Prince, Haiti, Earthquake Spectra, Volume 27, No. S1, pages S67–S92, October 2011; VC 2011, Earthquake Engineering Research Institute

Eurocode 8 (2003). Design provisions for earthquake resistance of structures — Part 5: foundations, retaining structures and geotechnical aspects. ENV 1998–5, CEN European Committee for Standardisation, Brussels.

Flores C.H., ten Brink U.S., and Bakun W.H. (2011) Accounts of Damage from Historical Earthquakes in the Northeastern Caribbean, to Aid in the Determination of their Location and Intensity Magnitudes. Open-File Report 2011–1133. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey

Frankel, A., Harmsen, S., Mueller, C., Calais, E. and Haase, J. (2010). Documentation for Initial Seismic Hazard Maps for Haiti. United States Geological Survey Open-File Report 2010-1067.

GEOTECHSOL (2011-2012) 42 rapports d'études géotechniques (non publiées).

Green, R. A., S. M. Olson, B. M. Cox, G. J. Rix, E. M. Rathje, J. Bachhuber, J. French, S. Lasley, and N. Martin (2011) "Geotechnical Aspects of Failures at Port-au-Prince Seaport during the January 12, 2010 Haiti Earthquake," Earthquake Spectra, Vol. 27, No. S1, pp. S43-S65.

Harp, E.L., Jibson, R.W., and Dart, R.L. (2011) The effect of complex fault rupture on the distribution of landslides triggered by the 12 January 2010, Haiti earthquake: Proceedings of the Second World Landslide Forum, Rome, Italy, p.625.

Hauss C., Bertil, D., Courtray, V., Dunand, F., Guilleminot, Y., Loustallot, G., Mompelat, J.M. (2010) Le séisme d'Haïti du 12 Janvier 2010. Rapport de la mission AFPS. AFPS/MEEDDM. 170p.

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

IMSRN (2012). Qualification et cartographie préliminaire des aléas mouvements de terrain et inondation sur les huit premiers quartiers prioritaires. Plan de prévention des risques Inondations – Mouvements de terrain – Sismique. Commune de Port-au-Prince. Haiti. Rapport d'étape 1. Pour le PNUD.

LNBTP (1976-2013). 155 rapports d'études géotechniques (non publiés)

Mompelat J.M. (2010) Mission d'expertise post-sismique du BRGM en Haïti du 19 au 25 février 2010. Observations préliminaires.

Momplaisir B.M., Boisson D. (1987) feuille Sud-Est (feuille Port-au-Prince) – Carte géologique à 1/250000 de la République d'Haïti (en 4 feuilles), B.M.E. (1982-1988).

NEHRP (2009) Recommended Seismic Previsions for New Buildings and Other Structures, FEMA P-750/2009 Edition.

Prépetit C. (1986-2011) Landslide reports (19 unpublished field reports). Bureau des Mines et de l'Energie.

Rathje, E., Bachhuber, J., Cox, B., French, J., Green, R., Olson, S., Rix, G., Wells, D., and Suncar, O., (2010). Geotechnical Engineering Reconnaissance of the 2010 Haiti Earthquake, Geo-Engineering Extreme Events Reconnaissance Association, Report No. GEER-021, 22 February, 97 pp.

UNOSAT (2010). : Cartes et Atlas de dommages du séisme d'Haïti. UNOSTA programme opérationnel d'application satellite de l'UNITAR (United Nations Institute for Training and Research)

URGEO (2011-2012) 14 rapports d'études géotechniques (non publiés).

Youd, T.L. & Al. (2001) - Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(10), p. 817-833.

**Dépôt légal : 14-07-316**  
Bibliothèque nationale d'Haïti  
**ISBN : 978-99970-4-233-0**