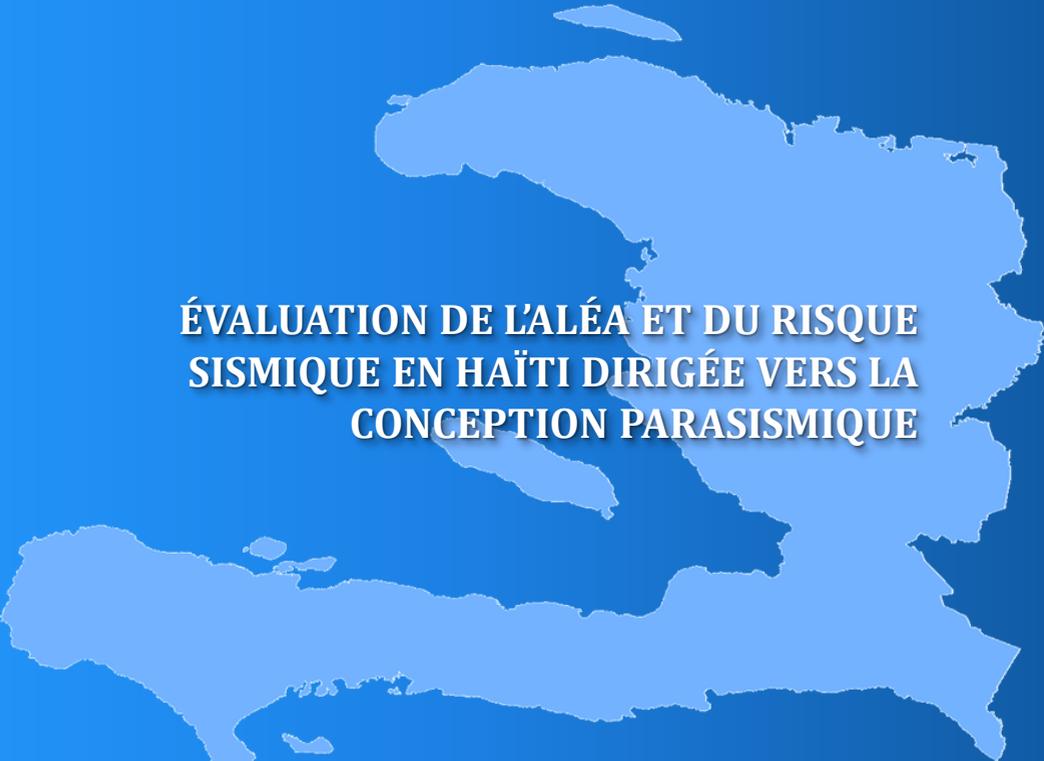


PROJET SISMO-HAITI
Rapport Final

A light blue map of Haiti is centered on the page, showing the main island and several smaller islands in the Caribbean Sea. The map is semi-transparent, allowing the text to be visible through it.

**ÉVALUATION DE L'ALÉA ET DU RISQUE
SISMIQUE EN HAÏTI DIRIGÉE VERS LA
CONCEPTION PARASISMIQUE**

Coordination scientifico-technique: UPM et ONEV
Participation: UCM, CSIC, UA, UAL, RSPR et ISU

23 Novembre 2012

Évaluation de l'aléa et du risque sismique en Haïti dirigée vers la conception parasismique

Ce projet a été développé par une équipe de chercheurs de différentes institutions:

Université Polytechnique de Madrid

Belén Benito Oterino
Jaime Cervera Bravo
Jorge Gaspar Escribano
Alejandra Staller Vázquez
Sandra Martínez Cuevas
Alicia Rivas Medina
Yolanda Torres Fernández
Raúl García Martínez
Pilar González-Crende
Ana Rita Serna Martínez
Maja Parovel
Romina García Castro

Observatoire National de l'Environnement et de la Vulnérabilité d'Haïti

Dwinel Belizaire
Jean Michel Haendel Dorfeuille
Gaspard Pierristal

Université Complutense de Madrid

José Jesús Martínez Díaz
Diego Córdoba Barba

Centre Supérieur de Recherches Scientifiques d'Espagne
Miguel de las Doblav Lavigne

Université d'Alicante

Sergio Molina Palacios

Université d'Almeria
Manuel Navarro Bernal

Université de Kanagawa
Takahisa Enomoto

Réseau Sismique de Puerto Rico
Víctor Huérfano

Institut Sismologique Universitaire de la République Dominicaine
Eugenio Polanco

Table de Matières

1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS	5
2. COLLABORATIONS ANTERIEURES	7
3. ACTIVITÉS RÉALISÉES DANS LE CADRE DU PROJET.....	13
3.1. <i>Système d'Information Géographique.....</i>	<i>13</i>
3.2. <i>Caractérisation sismogéologique d'Haïti.....</i>	<i>14</i>
3.3. <i>Evaluation de l'aléa sismique de l'île d'Hispaniola</i>	<i>31</i>
3.4. <i>Microzonation sismique et quantification de l'effet de site.....</i>	<i>44</i>
3.5. <i>Evaluation de la vulnérabilité sismique</i>	<i>59</i>
3.6. <i>Évaluation du risque sismique</i>	<i>66</i>
3.7. <i>Mesures d'atténuation du risque sismique existant.....</i>	<i>78</i>
4. RÉSULTATS.....	89
4.1. <i>Carte morphotectonique de failles actives quaternaires de l'île d'Hispaniola</i>	<i>90</i>
4.2. <i>Carte de microzonation sismique de Port-au-Prince.....</i>	<i>91</i>
4.3. <i>Cartes de l'aléa sismique en termes de PGA et SA (T) et plusieurs PR</i>	<i>92</i>
4.4. <i>Cartes de risque sismique de Port-au-Prince</i>	<i>104</i>
4.5. <i>Outil Web.....</i>	<i>108</i>
5. DIFFUSION DES RÉSULTATS	110
5.1. <i>Publiés.....</i>	<i>110</i>
5.2. <i>Projet de Fin de Carrière et Travaux de Fin de Master</i>	<i>112</i>
5.3. <i>Plan de publication</i>	<i>114</i>
6. RÉFÉRENCES.....	117
7. ANNEXES	127
7.1. <i>Formulaires de prise de données du MTPTC.....</i>	<i>127</i>
7.2. <i>Principales réussites des projets de coopération réalisés.....</i>	<i>130</i>

1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS

Après le séisme qui eut lieu en Haïti le 12 janvier 2010, dont l'épicentre a été localisé non loin de la capitale, Port-au-Prince (25 km en direction sud-est), d'une magnitude Mw 7.0 et à une profondeur de 13 km, le pays s'est retrouvé dans une situation catastrophique et d'extrême pauvreté, avec des graves carences en matière de santé, nutrition, éducation et logement. Les effets du tremblement de terre ont été dévastateurs pour la population : on compte plus de 300.000 morts, presque autant de blessés et 1,3 millions de sans-abri logés dans des campements « provisoires ». Quant aux conséquences matérielles, le séisme a totalement détruit près de 100.000 maisons et endommagé près de 200.000 (source : USGS). Ce tremblement de terre a été le plus fort enregistré dans la zone depuis 1770. De plus le séisme fut perceptible dans des pays voisins comme Cuba, la Jamaïque et la République Dominicaine, où il a provoqué l'alarme et des évacuations préventives.

La reconstruction du pays reste un sujet prioritaire pour la coopération internationale. Le présent projet, SISMO-HAITÍ, a été développé dans le but d'apporter la connaissance et l'information nécessaires afin de faciliter la prise de mesures préventives face au risque sismique existant, afin d'éviter qu'un éventuel futur séisme ne déclenche une nouvelle catastrophe. Dans le cas d'Haïti, aucune institution n'était chargée d'assurer une surveillance sismique, mais un contact direct a été établi avec l'Observatoire National de l'Environnement et de la Vulnérabilité (ONEV) en Haïti à travers son directeur Dwinel Belizaire Ing. M. Sc., qui est précisément celui qui a sollicité l'aide qui a motivé la présente proposition.

Le but ultime de ce projet est l'étude des mesures d'atténuation du risque élevé qui demeure, contribuant ainsi au développement durable de la région. Dans cette optique, la menace sismique en Haïti a été évaluée, constituant la base sur laquelle on prétend élaborer des critères de conception parasismique pour la reconstruction du pays qui pourront être inclus dans la première version de la norme antisismique, ainsi que le risque sismique à Port-au-Prince, dont les

résultats serviront de base pour élaborer les plans d'urgence face à ce risque naturel.

Les objectifs spécifiques atteints sont :

- Évaluation de l'aléa sismique en Haïti. On en obtient des cartes de différents paramètres de mouvement pour différentes probabilités de dépassement (ce qui suppose connaître la probabilité associée aux mouvements dus à des tremblements futurs).
- Évaluation de l'effet local à Port-au-Prince et élaboration d'une carte de microzonage de la ville.
- Étude de la vulnérabilité sismique locale à Port-au-Prince.
- Estimation du risque sismique à Port-au-Prince.
- Mesures d'atténuation du risque et de conception parasismique.

Ce rapport résume les activités et les résultats obtenus a cours de l'année 2011 lors de la mise en œuvre de ce projet. Le groupe de travail est une équipe multidisciplinaire composée de chercheurs de différents établissements universitaires et de recherche (Université Polytechnique de Madrid-UPM-, Conseil Supérieur de la Recherche Scientifique (CSIC) ; U. Complutense de Madrid-UCM-, U-UA-Alicante, Almeria-UAL-U., U. Autonome de Saint-Domingue, UASD et Université de Porto Rico Mayagüez--UPRM) experts dans les diverses matières impliquées dans le projet: géologie, sismologie, génie parasismique, architecture et gestion de l'information géographique. Tous les membres de cette équipe ont travaillé ensemble tout au long de l'année, en réalisant des réunions, des ateliers de travail, des vidéoconférences, en plus d'une visite à Port-au-Prince en Juillet 2011 afin de procéder à la première collecte de données.

2. COLLABORATIONS ANTERIEURES

Ce projet, ainsi que ceux développés dans les précédents appels à proposition de projets de l'UPM avec l'Amérique latine (N ° AL05_PID_0037, en 2005, N ° AL06-PID-019, en 2006, N ° AL07-PID-049, en 2007, N ° AL08-PID -038, en 2008, N ° AL09-PID-23, en 2010) s'inscrivent dans la ligne de coopération qui a commencé au Salvador à la suite du terrible tremblement de terre qui eut lieu dans ce pays en 2001. Cette coopération a été étendue à d'autres pays d'Amérique centrale dans la décennie suivante et, plus récemment, en Haïti, après le tremblement de terre de 2010. Les projets de 2005, 2006 et 2007 ont été développés seulement en coopération avec le Service National d'Études Territoriales du Salvador (SNET), alors qu'en 2008 s'est impliqué, en plus de l'UPM et de la SNET, l'Institut de Sismologie, Volcanologie, Météorologie et Hydrologie (INSIVUMEH) du Guatemala. Les années suivantes d'autres institutions d'autres pays de la région nous ont rejoints: Institut de Géosciences de l'Université du Panama, Université du Costa Rica, Réseau National Sismique (Costa Rica), Institut Costaricain d'Électricité, Université de Mariano Galvez (Guatemala), Institut Nicaraguayen d'Études Territoriales et Université Autonome du Honduras.

Depuis Janvier 2010, à la suite du tremblement de terre catastrophique qui a frappé Haïti, le Groupe a également entamé une ligne de coopération avec différentes institutions dans le pays, coordonné par l'Observatoire de l'Environnement et la Vulnérabilité (ONEV), relevant du ministère de l'Environnement d'Haïti. Dans le même cadre, le présent projet, financé par l'UPM, voit sa continuité garantie en 2012 suite au XII^{ème} Appel à Subventions et Aides pour Actions de Coopération Universitaire pour le Développement - 2011. En outre, l'AECID, à travers son Programme de Coopération Interuniversitaire (PIC), a accordé des aides au groupe d'une durée d'un an, prolongeable à quatre, afin de créer un département d'enseignement et de recherche du génie parasismique au sein de la Faculté des Sciences de l'Université d'Etat d'Haïti (UEH). Or, après l'obtention de ce financement et sa publication dans la Gazette officielle de l'Etat Espagnol, le nouveau chercheur principal de projet du côté haïtien, M. Dominique Boisson qui par l'initiative de l'AECID, remplace M. Bélizaire, a proposé d'importantes modifications dans le

contenu du projet. Les objectifs du nouveau projet proposé par M. Boisson s'éloignaient de l'esprit de coopération souhaité par le comité du projet initial, et, d'ailleurs, étaient incompatibles avec les différentes spécialisations de ses membres. Pour ces raisons, et compte tenu de l'absence d'explication de M. Boisson sur les modifications proposées, il a été décidé de renoncer au projet.

La ligne de coopération du Groupe a été renforcée par les projets suivants dont certains ont été financés par l'UPM, et d'autres par d'autres organismes:

“Evaluación del riesgo y prevención de deslizamientos catastróficos de laderas inducidos por terremotos. Aplicación a los casos de El Salvador y Sureste de España (ANDES)” (Évaluation du risque et prévention des glissements de terrain catastrophiques provoqués par des tremblements de terre. Application aux cas du Salvador et le sud-est de l'Espagne, ANDES). Projet du Plan national I + D + I 2000-2003, financé par l'ancien Ministère de la Science et de la Technologie (Ren2001-0266-C02-02).

“Contribución a la renovación de la red acelerométrica de El Salvador y estudio del movimiento fuerte asociado a los sismos de 2001” (Contribution à la rénovation du réseau accélérométrique du Salvador et étude des mouvements forts associés aux tremblements de terre de 2001), financé par l'AECID et développé conjointement par le Service National d'Études Territoriales du Salvador (SNET), l'Université d'Amérique Centrale Siméon Cañas (UCA) et l'UPM. Le projet a été coordonné par le professeur Belén Benito.

“Riesgo sísmico y peligro de deslizamiento de laderas en El Salvador I” (Risque sismique et danger de glissements de terrain au Salvador I), financé par l'UPM, dans son appel à proposition de projets de 2004, au travers duquel la coopération entre l'UPM et le SNET s'est formellement institutionnalisée.

“Caracterización de Acciones Sísmicas y Evaluación del Peligro de Deslizamientos de Ladera” (Caractérisation de l'activité sismique et évaluation du risque de glissements de terrain), (CGL2005-07456-C03-03/BTE), financé par le Ministère de

l'Éducation et des Sciences (2004-2007). Projet coordonné Plan national I + D + I, qui a également impliqué un groupe du CEDEX et le Département de Géodynamique de la Faculté de Géologie de l'Université Complutense de Madrid.

“Riesgo sísmico y peligro de deslizamiento de laderas en El Salvador II” (Risque sismique et danger de glissements de terrain au Salvador II), financé par l'UPM, dans son appel à proposition de projets avec Latin-Amérique de 2005 (AL05-PID-0037)

“Riesgo sísmico y peligro de deslizamiento de laderas en El Salvador III” (Risque sismique et danger de glissements de terrain au Salvador III), financé par l'UPM, dans son appel à proposition de projets avec Latin-Amérique de 2006 (AL06-PID-019)

“Evaluación de la Amenaza sísmica en Centroamérica I” (Évaluation de l'aléa sismique en Amérique centrale I), financé par l'UPM, dans son appel à proposition de projets avec Amérique Latine de 2007 (AL07-PID-049)

“Evaluación Regional de la Amenaza Sísmica en Centroamérica” (Évaluation régionale de l'aléa sismique en Amérique centrale), financé par l'UPM, dans son appel à proposition de projets avec Amérique Latine de 2008 (AL08-PID-038).

“Desarrollo de estudios geológicos y sismológicos en el Salvador dirigidos a la mitigación del riesgo sísmico” (Développement d'études géologiques et sismologiques au Salvador visant à l'atténuation des risques sismiques), financé par l'Agence Espagnole de Coopération Internationale et de Développement (AECID, 2008-2010).

“Determinación de deformaciones y desplazamientos en la zona de falla de El Salvador II” (Détermination des déformations et des déplacements dans la zone de faille du Salvador II), financé par l'UPM, dans son appel à proposition de projets avec Amérique Latine (2008-2009).

“Análisis de Sensibilidad a la Peligrosidad Sísmica Incorporando Resultados de Estudios Recientes de Tectónica Activa en Centroamérica. Aplicación a la Mitigación del Riesgo Sísmico en

el SE de España. Proyecto SISMOCAES" (Analyse de sensibilité à l'aléa sismique intégrant des résultats d'études récentes de tectonique active en Amérique centrale. Application à l'atténuation du risque sismique dans le sud-est de l'Espagne. Projet SISMOCAES), financé par le ministère des Sciences et de l'Innovation (2009-2012).

"Red Temática en Amenaza y Riesgo Sísmico" (Réseau thématique en cas de menace et du risque sismique), financé par l'UPM (2011-2012 et 2012-2013).

Cette ligne de coopération s'est vue renforcée avec la participation du groupe d'Ingénierie Sismique dans le projet RESIS II, financé par l'Agence de Coopération Norvégienne (NORAD) et géré par le Centre de Réduction des désastres naturelles en Amérique centrale (CEPRENAC), afin de promouvoir l'étude des risques sismiques en Amérique centrale. La coordination de l'aspect relatif à la menace sismique de ce projet a été confiée au professeur Belén Benito. Deux ateliers d'un mois chacun, réalisés dans le ETSITGC en Avril 2008 et en Février 2010 avec la participation d'un représentant de chaque pays dans la région ont fait partie de ce travail. Le premier atelier aboutit sur une évaluation préliminaire de cartes de menace dans l'Amérique centrale qui a été publiée dans un livre intitulé "Risques sismiques en Amérique centrale" (Benito et al., 2010b) et dans un article publié en Avril 2012 dans le Bulletin de la Société Sismologique d'Amérique (Benito et al., 2012). Le deuxième atelier aboutit sur une évaluation du risque sismique dans chaque capitale et l'édition de six rapports nationaux. Les participants de ces ateliers ont constitué un groupe de travail qui demeure actif et avec lequel on continue de coopérer.

Pour réaliser les calculs de menace et risque sismique en Haïti un nouvel atelier a été organisé à l'ETSITGC, en Novembre 2011, dont les résultats sont exposés dans le présent rapport.

Au cours des projets décrits précédemment une ligne de formation de techniciens s'est renforcée en Amérique centrale, s'étendant en Haïti où, malgré le risque sismique élevé propre de la région, il y a, malheureusement, très peu de spécialistes qualifiés, et où les ressources matérielles pour y faire face sont très limitées.

Rapport du Projet SISMO-HAITI

Pour en savoir plus sur les résultats de cette ligne de coopération du groupe, on peut consulter l'annexe 7.2. de cette publication.

3. ACTIVITÉS RÉALISÉES DANS LE CADRE DU PROJET

3.1. Système d'Information Géographique

Une plate-forme Web a été mise en place. Elle est utilisée comme outil d'échange d'information documentaire par tous les composants du groupe de travail. On y retrouve répertoriée toute l'information recueillie jusqu'à ce jour, provenant principalement d'organismes internationaux (US Geological Survey-USGS, l'ONU, NASA, OpenStreetMap, GeoEye, etc). Cette initiative est rendue nécessaire afin d'optimiser les ressources de la coopération internationale destinées aux projets de développement.

Toute l'information est présentée sur une base de données indexée afin de pouvoir y accéder de manière efficace, et sur laquelle on a créé un Système d'Information Géographique (SIG) avec les couches d'information correspondantes. Les données recueillies seront utilisées dans les différentes phases de l'étude réalisée. Pour l'étude de l'aléa sismique on utilisera des couches géologiques (Figure 3-1 à gauche), tectoniques, Modèles Numériques de Terrain (MNT) et catalogues sismiques. Comme information supplémentaire, on aura recours également à la carte de transfert de contraintes de Coulomb (Figure 3-1 à droite). Pour le calcul du risque on utilisera les couches d'infrastructures, limites administratives, densité de population, distribution de dégâts causés par le séisme du 12 Janvier 2010, ou d'autres images géoréférencées. Étant donné que les effets sismogéologiques peuvent être des phénomènes de liquéfaction et de glissement de terrain, ils seront analysés en utilisant des couches d'hydrographie, lithologie et occupation du sol. Une collection d'images satellitaires géoréférencées de haute résolution (0,50 m), fournies par GeoEye, est aussi disponible. Ces images, enregistrées le 13 Janvier 2010, seront utilisées pour contrôler les changements, afin de détecter des glissements de terrain ou de nouvelles failles découvertes à la suite du séisme.

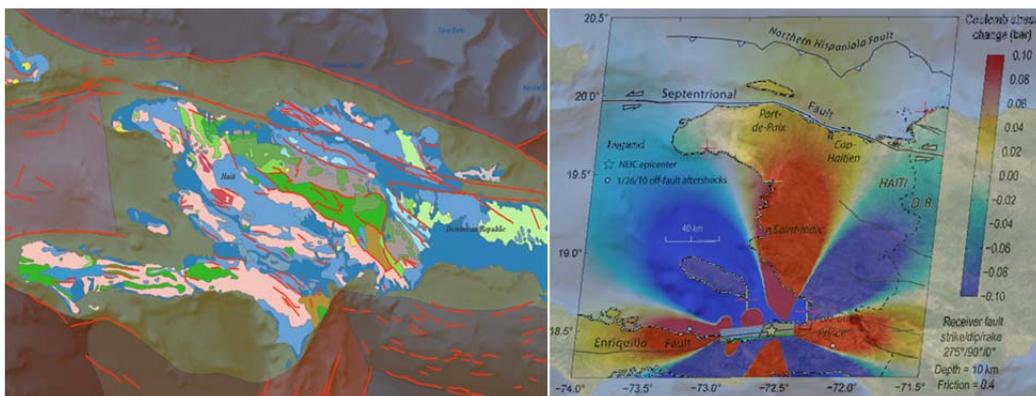


Figure 3-1. Tectonique d'Haïti (gauche) et contraintes de Coulomb de Lin et al., 2010 (droite)

Le logiciel ArcGis de ESRI a été utilisé comme outil permettant l'analyse de l'information géographique. Dans une deuxième phase il est proposé de développer des applications utilisant gvSIG (logiciel libre). Ce modèle de travail fournit une plus grande accessibilité et génère une valeur ajoutée aux projets de coopération, en permettant le partage d'informations à un coût nul. Ceci est d'une importance vitale dans la conception du projet, car on vise à générer des informations qui peuvent être partagées par tous les acteurs impliqués dans la gestion de l'urgence.

3.2. Caractérisation sismogéologique d'Haïti

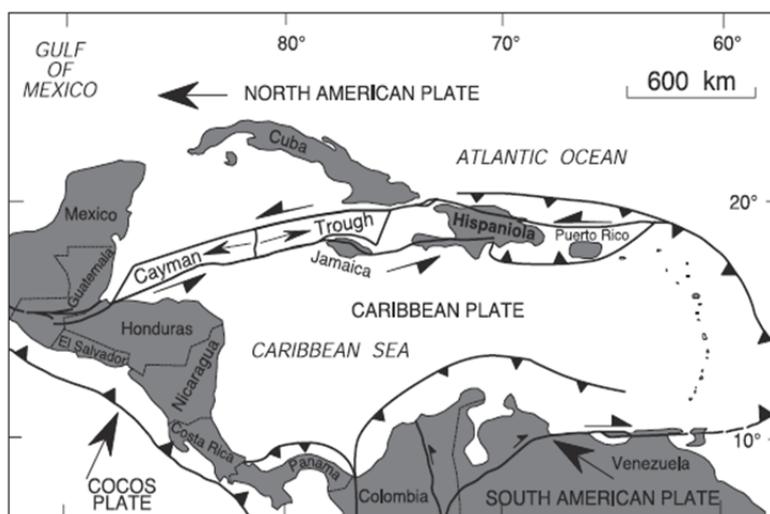
3.2.1. Cadre sismotectonique

L'analyse du cadre sismotectonique de la zone d'étude se centre sur les suivants aspects:

- Étude des antécédents sur le cadre géodynamique de la zone, l'activité sismique et la tectonique active.
- Synthèse des cartographies tectoniques existantes.
- Analyse de la distribution spatiale de la sismicité.
- Analyse de la source géologique du tremblement de terre de l'année 2010.

L'Hispaniola se situe sur une limite de plaques transpressive où la déformation s'absorbe par des failles transcurrentes et

transformantes et des zones compressives complexes. À Haïti, la déformation concerne essentiellement en deux zones transcurrantes principales en direction EO. Au nord, la faille Septentrionale absorbe à peu près 9 mm/an (Prentice et al., 2003; Manaker et al., 2008) avec un mouvement transcurrent pur. D'un autre côté, au sud, la faille d'Enriquillo absorbe 7 mm/an (Manaker et al., 2008). À cette déformation transcurrente il faut ajouter la composante compressive qui s'absorbe majoritairement à travers la subduction, mais qui est aussi partiellement transmise vers l'intérieur de l'Hispaniola. Le long de la faille Septentrionale peu de déformation compréssionnelle est absorbée, tandis que dans la zone de la faille d'Enriquillo 2-3 mm/an sont accommodés (Calais et al., 2010) par une série de failles inverses de direction ONO-ESE qui se prolongent avec une direction SE vers la ceinture de déformation de la Fosse des Morts (Mann et al., 2002), comme on peut observer dans la Figure 3-2.



Mann et al. (1998)

Figure 3-2. Schéma tectonique du bord nord de la plaque Caribbe (Mann et al., 1998)

L'analyse des cartographies géologiques-tectoniques antérieures a permis de réaliser une comparaison entre ces éléments, avec l'objectif de déterminer la structure de l'île et surtout l'âge des formations affectées par les failles qui ont été définies par l'analyse morphotectonique. Nous avons utilisé, entre autres, la cartographie

de Pérez Estaun et al. (2007) qui apparaît sur la Figure 3-3. La synthèse de la cartographie réalisée se montre sur la Figure 3-4.

Quant à l'analyse de la sismicité, nous avons étudié la distribution des épacentres par rapport à la position des failles, avec l'objectif de déterminer les provinces sismotectoniques à caractéristiques rhéologiques et sismologiques similaires. Comme résultat de cette analyse nous avons défini les zones sismogénétiques qui se considèrent à potentiel sismique homogène et qui constituent un des inputs pour le calcul postérieur du risque sismique. En particulier, nous avons défini trois zones à caractéristiques rhéologiques bien différenciées sur toute la surface d'Haïti (Figure 3-4):

- Les extrémités nord et sud, définies par les failles Septentrionale et d'Enriquillo, se caractérisent par une croûte continentale en transition vers l'océanique et des failles transcurrentes EO prédominantes.
- La zone centrale, caractérisée par des failles inverses de direction NO-SE.
- Le système de failles EO et ceintures de plissement qui définissent une zone de structure plus complexe sur une croûte continentale un peu plus épaisse.

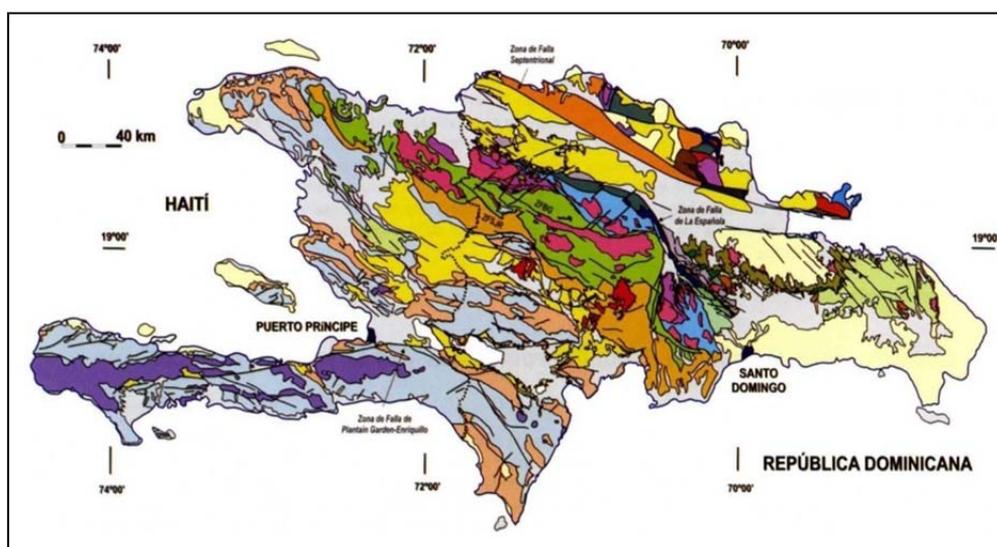


Figure 3-3. Carte géologique de L'Hispaniola (Pérez Estaun et al; 2007).

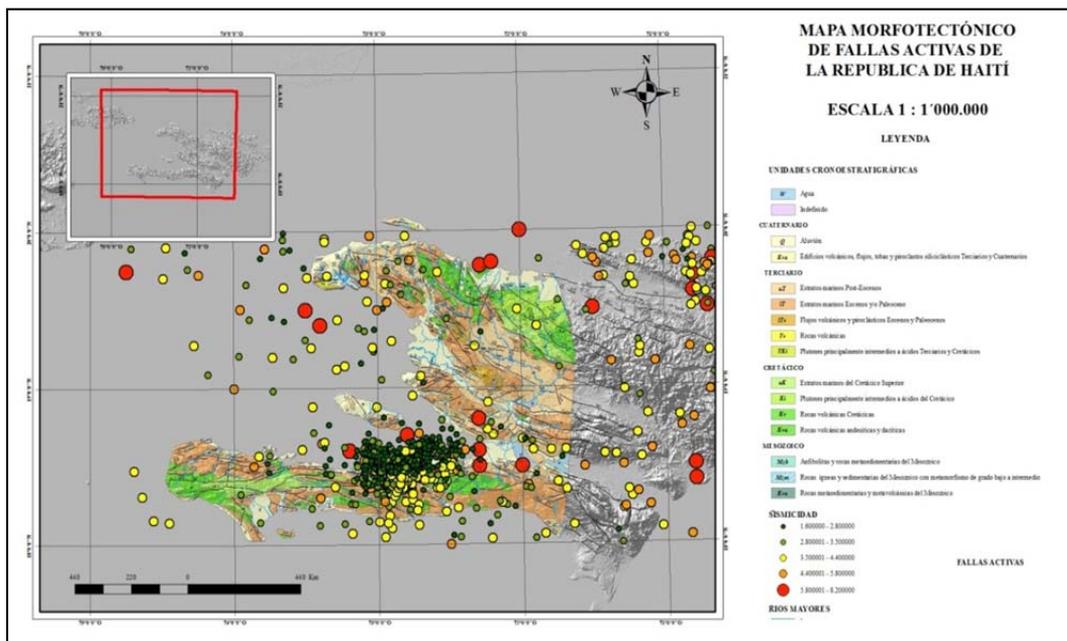


Figure 3-4. Carte géologique de synthèse de Haïti incluant l'activité sismique.

En ce qui concerne la source géologique du séisme de 2010, on a analysé la bibliographie en relation avec le tremblement de terre, ainsi que la structure locale. Initialement, on s'accorda à supposer que la faille responsable du séisme de janvier 2010 devrait être Enriquillo, parce qu'elle avait accumulé assez d'énergie élastique capable de générer un tremblement de terre de ces caractéristiques (Manaker et al., 2008). Cependant, les observations de terrain (Prentice et al., 2010), et les modèles de glissement obtenus à partir des données télé sismiques, GPS et InSAR (Calais et al., 2010, Hayes et al., 2010), mettent en valeur un type de fracture à caractéristiques différentes de celle de la faille d'Enriquillo. Les recherches actuelles suggèrent, d'une part, que cette faille n'a pas été la responsable de ce tremblement de terre si destructeur et, d'autre part, la véritable responsable serait une faille à mouvement oblique inverse/transcurrent inclinée vers le Nord, associé à une ceinture de déformation compressive située au nord de la faille d'Enriquillo.

Des informations additionnelles sur l'origine du tremblement de terre de janvier 2010 se trouvent dans le paragraphe 3.2.4.

3.2.2. Caractérisation morphotectonique de failles actives à l'Hispaniola

On a effectué une étude de caractérisation des failles actives de l'Hispaniola concentrée sur les points suivants:

- a) Compilation de modèles numériques de terrain (MDT) de la même résolution, principalement du SRTM, dérivés d'images ASTER à résolutions de 30 m.
- b) Analyse de la morphologie en utilisant différentes illuminations.
- c) Superposition des âges des unités géologiques sur le MDT.
- d) Analyse des caractéristiques superficielles dans les zones couvertes par les matériaux quaternaires afin de localiser les failles à activité récente.
- e) Élaboration de cartes de fracturations et détermination des différentes familles.
- f) Analyse de scénarios sismiques basés sur l'intégration de toutes les données.

La Figure 3-5 montre un détail du type d'analyse morphotectonique effectuée, une fois préparé les modèles digitaux de terrain. On a recherché des possibles preuves superficielles qui puissent confirmer l'activité quaternaire des failles, telles que la modification du réseau fluvial ou des morphologies récentes et des matériaux d'âge Quaternaire. Ensuite, on a développé une carte des failles actives d'Haïti. Nous avons défini six familles de fracturation active dispersées dans tout le pays qui se représentent sur la Figure 3-6.

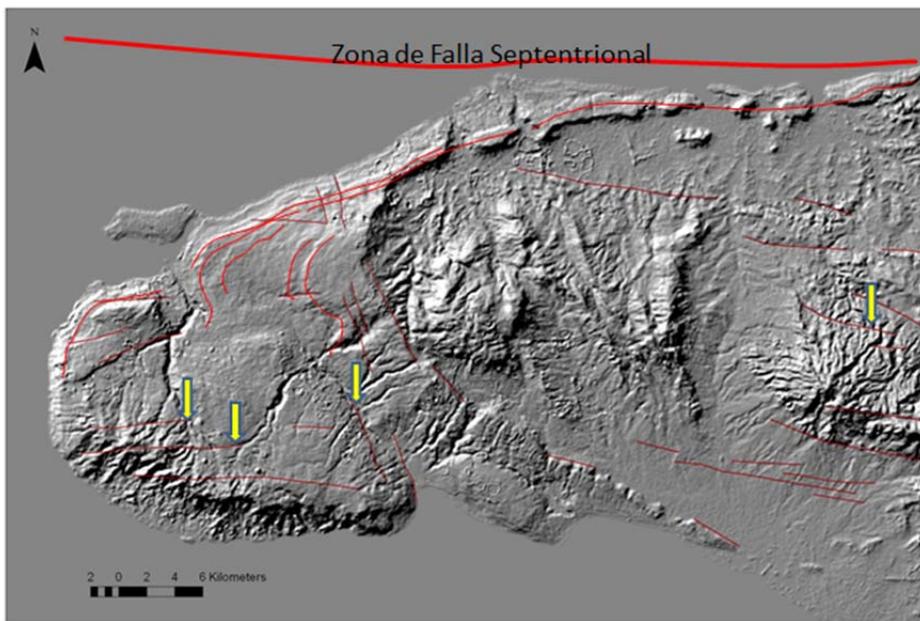


Figure 3-5. Détail des caractéristiques morphotectoniques associées à l'activité Quaternaire de failles qui ont été utilisées pour définir les traces des failles actives.

Bien qu'il existe des familles ayant des orientations différentes, les failles actives plus longues possédant les plus grands sauts sont celles qui appartiennent aux familles EO et NW-SE, c'est-à-dire les failles d'Enriquillo-Plantain Garden, Septentrionale, Léogâne et les failles parallèles à la direction de plissement du secteur central de l'île.

Une fois réalisée l'étude d'Haïti on a réalisé une recompilation de la géologie et la fracturation de Santo Domingo, afin de compléter la carte des failles actives d'Hispaniola qui figure dans le paragraphe 4.1.

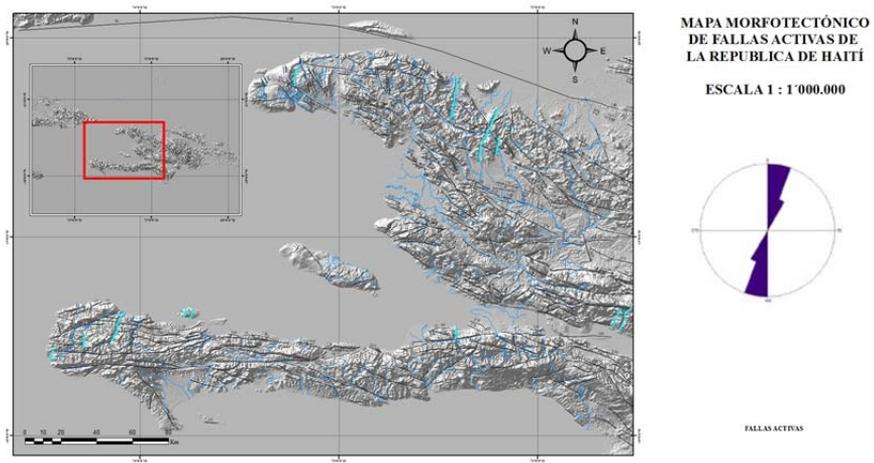


Figure 3-6 a. Cartes de failles actives séparées en différentes familles

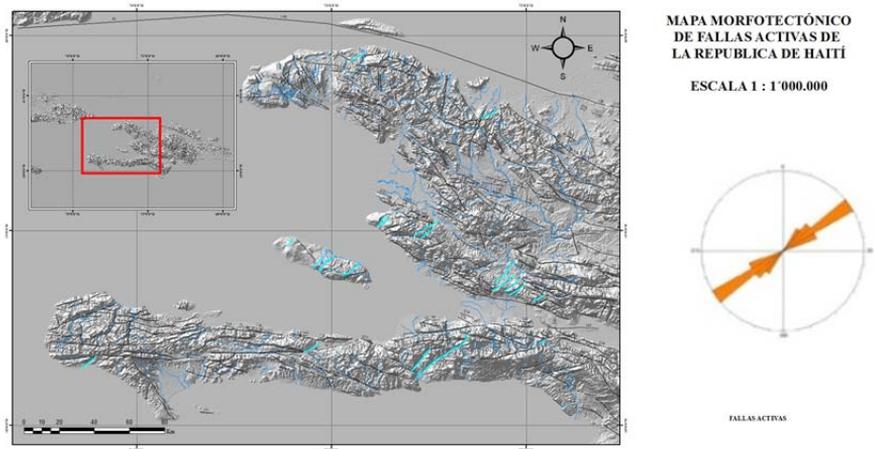


Figure 3-6 b. Cartes de failles actives séparées en différentes familles

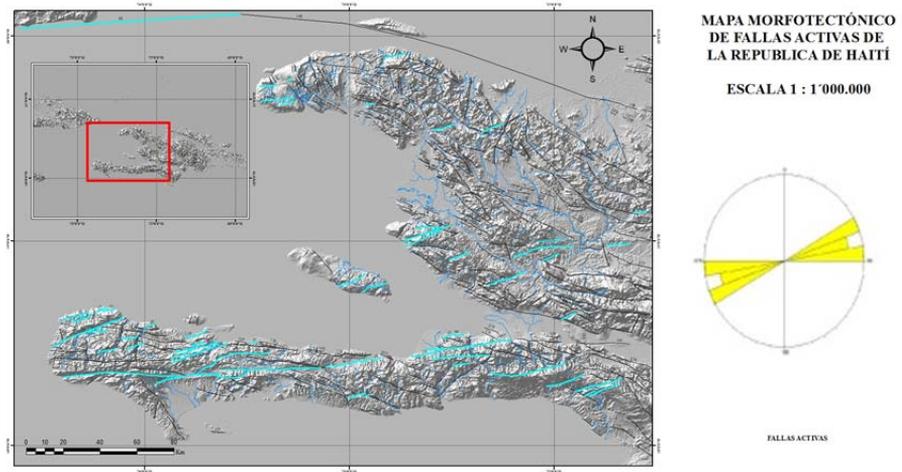


Figure 3-6 c. Cartes des failles actives séparées en différentes familles

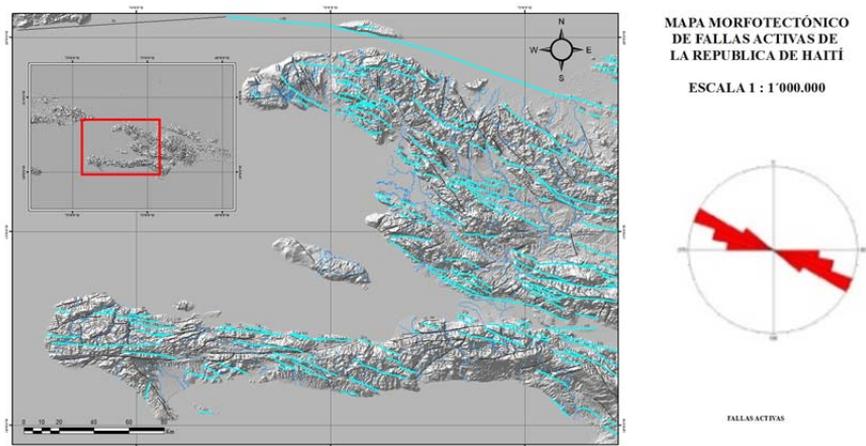


Figure 3-6 d. Cartes des failles actives séparées en différentes familles

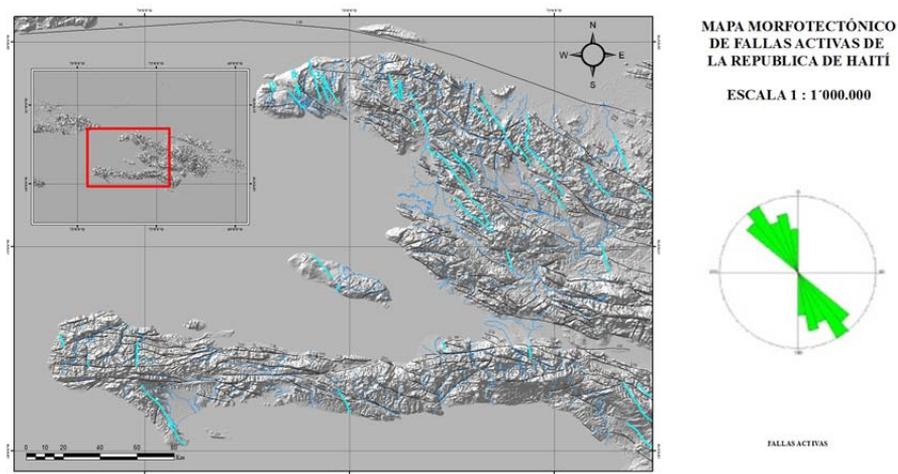


Figure 3-6 e. Cartes des failles actives séparées en différentes familles

3.2.3. Analyse de scénarios

A continuation et à travers de nos analyses sismotectonique et morphotectonique, nous avons établi des scénarios sismiques pour les failles de plus grandes dimensions de chaque famille. La carte de la Figure 3-7 présente les scénarios suggérés pour la région d'Haïti, correspondants à de possibles futurs tremblements de terre qui pourraient se déclencher (raisonnablement, avec une certaine probabilité). A continuation nous résumons les caractéristiques de chacune des sources considérées associées aux scénarios établis, qui se définissent par les dimensions de chaque faille et leurs caractéristiques mécaniques et tectoniques, ainsi que les informations disponibles qui ont fait l'objet de publications.

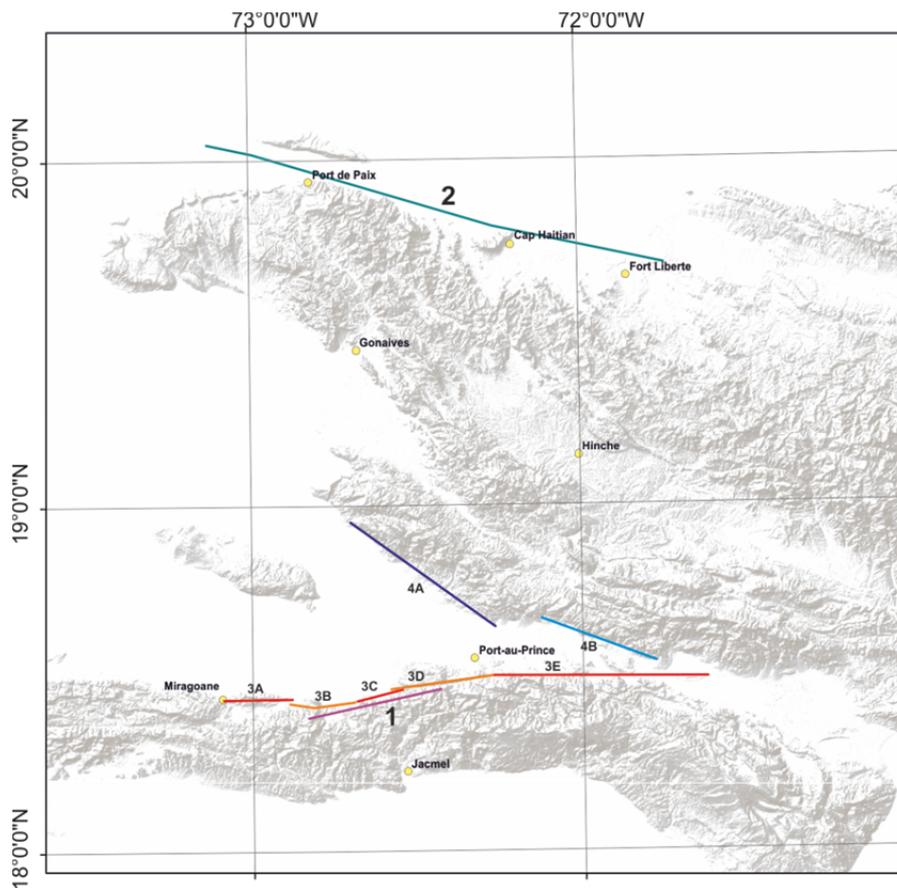


Figure 3-7. Scénarios sismiques proposés. La numération correspond à celle qui est utilisée dans le texte.

-1. Source: Faille de Léogâne (faille 1 sur la carte des scenarios)

Scénario supposé: répétition d'un tremblement de terre de magnitude et mécanisme égal à celui de 2010.

Paramètres du plan de rupture:

Coordonnées des extrêmes: (-72.831,18.316)-(-72.431,18.467)

Longitude: 41 km / Profondeur de rupture: de 5 à 20 km (faille aveugle)

Direction: 264°

Inclination: 43° N

Type de faille: Oblique (Inverse- coulissante: Rake 43°)

Mw: 7.24

Données interprétées de notre propre carte et de Mercier de Lépinay et al. (2011)

-2. Source: Faille Septentrionale

Paramètres du plan de rupture:

Coordonnées des extrêmes: (-73.128, 20.045)-(-71.736, 19.691)

Longitude: 150 km / Profondeur de rupture: de 0 a 15 km

Direction : 285°

Inclination: 90°

Type de faille: Oblique (coulissante: Rake 0°)

Mw: 7.53

Données interprétées de notre propre carte et de Frankel et al. (2011)

-3. Source: Faille d' Enriquillo-Plantain-Garden

Les observations sur le terrain d'études antérieures et l'analyse des images satellites et du modèle digital de terrain à partir des données LIDAR indiquent que la faille d'Enriquillo-Plantain Garden, dans la zone située au sud et à l'ouest de Port-au-Prince, présente une géométrie de direction EO avec une très forte inclinaison vers le sud, et une cinématique prédominante en transcurrance avec une composante verticale.

La trace quaternaire de cette faille peut être divisée en plusieurs secteurs qui pourraient se comporter comme des sections sismiques au long du bord nord de la péninsule de Tiburón (au sud-ouest d'Haïti), jusqu'à la frontière de la République Dominicaine (à l'est). Elle présente une direction générale N 85 ° E. Ces sections sont

capables de générer des séismes de magnitudes supérieures à 7,0. Leurs caractéristiques, selon la géométrie proposée pour ces sections par Prentice et al. (2010), sont les suivantes :

3A: Miraoane:

Paramètres du plan de rupture:

Coordonnées des extrêmes: (-73.089, 18.44)-(-72.882, 18.441)

Longitude: 22 km / Profondeur de rupture: de 0 a 15 km

Direction: 269°

Inclination: 90°

Type de faille: coulissante (Rake 0°)

Mw: 6.92

Slip Rate: 7 mm/a

3B: Goabe:

Paramètres du plan de rupture:

Coordonnées des extrêmes: (-72.888, 18.428)-(-72.692, 18.432)

Longitude: 20 km / Profondeur de rupture: de 0 a 15 km

Direction: 269°

Inclination: 90°

Type de faille: coulissante (Rake 0°)

Mw: 6.89

Slip Rate: 7 mm/a

3C: Dufort:

Paramètres du plan de rupture:

Coordonnées des extrêmes: (-72.888, 18.428)-(-72.692, 18.432)

Longitude: 15 km / Profondeur de rupture: de 0 a 15 km

Direction: 256°

Inclination: 90°

Type de faille: coulissante (Rake 0°)

Mw: 6.8

Slip Rate: 7 mm/a

3D: Nomance:

Paramètres du plan de rupture:

Coordonnées des extrêmes: (-72.582, 18.469)-(-72.27, 18.586)

Longitude: 33 km / Profondeur de rupture: de 0 a 15 km

Direction: 262°

Inclination: 90°

Type de faille: coulissante (Rake 0°)

Mw: 7.0

Slip Rate: 7 mm/a

3E: Dumay:

Paramètres du plan de rupture:

Coordonnées des extrêmes: (-72.268, 18.505)-(-72.622, 18.496)

Longitude: 68 km / Profondeur de rupture: de 0 a 15 km

Direction: 270°

Inclination: 90°

Type de faille: coulissante (Rake 0°)

Mw: 7.28

Slip Rate: 7 mm/a

-4. Source: failles de la ceinture de chevauchement. Faille du système Matheux Neiba

4A: Matheux Neiba1:

Paramètres du plan de rupture:

Coordonnées des extrêmes: (-72.701, 18.953)-(-72.267, 18.648)

Longitude: 57 km / Profondeur de rupture: de 0 a 20 km

Direction: 306°

Inclination: 55° N

Type de faille: Inverse (Rake 90°)

Mw: 7.38

4B: Matheux Neiba2:

Paramètres du plan de rupture:

Coordonnées des extrêmes: (-72.124, 18.672)-(-72.779, 18.544)

Longitude: 40 km / Profondeur de rupture: de 0 a 20 km

Direction: 291°

Inclination: 55° N

Type de faille: Inverse (Rake 90°)

Mw: 7.27

Discussion sur les scénarios maximum et probables.

En ce qui concerne la faille d'Enriquillo-Plantain Garden, deux séismes de magnitudes 7,5 Mw se sont produits au XVIII^e siècle (McCann, 2006; Ali et al., 2008). Leur emplacement indique qu'ils se sont déclenchés dans deux des sections décrites précédemment. La proximité temporelle suggère le fonctionnement d'un triggering, ce qui a pu provoquer le deuxième séisme. Considérant que ce mécanisme peut se répéter après l'événement de 2010, il est concevable qu'un séisme de magnitude Mw > 7.1 se déclenche dans les prochaines décennies dans une des sections décrites auparavant. C'est pourquoi on considère comme étant probable qu'un séisme sur cette faille ait lieu et qu'il pourrait être associé à une réactivation de Dumay à magnitude 7,2 Mw.

Si nous considérons un événement plus probable non soumis à la magnitude maximum, les failles du type 4B sont beaucoup plus nombreuses et susceptibles d'être activés. Dans ce cas on aurait un Scénario de type Neiba Matheu 2 à magnitude 6,9 Mw.

Dans le cas d'événements régionaux, la magnitude maximum serait produite par les zones de subduction au Nord d'Hispaniola et celles du Fossé de Morts (8.0 Mw), selon les géométries et données de Mw proposées par Frankel et al. (2011).

En ce qui concerne la profondeur, avec les informations disponibles et tenant en compte les modèles d'inversion du glissement obtenus par des études antérieures au séisme de 2010 (Hayes et al., 2010), nous pouvons concevoir une croûte sismogénique avec une épaisseur de 15 à 20 km.

3.2.4. Effets sismogéologiques du séisme de Janvier 2010

A partir de l'analyse des images satellite de Google Earth (avant et après le tremblement de terre), une étude détaillée des déformations

causées par le séisme a été entreprise sur un vaste secteur du sud de l'île (y compris les villes de Port au Prince, Carrefour et Gressier), sur les montagnes du Massif de la Selle (où le séisme s'est produit et où se trouve la faille d'Enriquillo-plantain-Garden (EPG)), ainsi que sur plusieurs rivières et leurs deltas affectés par les tremblements (Momanche, Grise, Frorse).

Des résultats partiels de ces recherches ont été publiés par Miguel de las Doblas en Mars 2010 sur le site officiel du tremblement de terre mis en place par la communauté scientifique internationale (<http://supersites.earthobservations.org/haiti.php>). Sur cette page web on trouve la majorité des données scientifiques partielles ou définitives obtenues par les différents chercheurs qui, dans le monde, se sont immédiatement portés sur ce tremblement de terre.

Les principaux types de déformations géologiques observées à la suite du tremblement de terre comprennent des glissements de terrain, des structures de liquéfaction, des élévations côtières, des fractures et ruptures, des modifications des rivières et de leurs deltas et des surfaces fracturées en blocs chaotiques. Les risques géologiques plus significatifs résultant de ces événements sismiques déduits à partir de ces études concernent des glissements de terrain, des inondations, la réactivation de certains éléments tectoniques instables (fractures, zones de ruptures chaotiques, etc.), la modification des deltas fluviaux et leur apports sédimentaires, etc.

Malheureusement, l'observation des dernières images de Google Earth du dernier trimestre de 2010 (après la saison des pluies), nous permet de constater, comme nous le supposions, que bon nombre de structures ont été effacées par les eaux torrentielles ou enterrées par les sédiments. Notamment, ce sont les structures de liquéfaction, les fractures et ruptures, les modifications des cours d'eau et leurs deltas et les glissements de terrain les plus affectées, soit qu'ont disparu, soit qu'ont été radicalement modifiées. Les seuls témoins qui perdurent de ces déformations, oblitérées à présent sur le terrain, se trouvent sur les images de Google Earth d'avant la période des pluies. Ces images sont toujours disponibles en utilisant le dispositif temporel de cet excellent outil.

Les premiers résultats scientifiques obtenus par les équipes américaines qui s'installèrent immédiatement sur la zone sinistrée ont été publiés dans une série d'articles de la revue Nature Geosciences (V. 3, novembre 2010), et leur conclusion unanime est que le séisme ne s'est pas produit le long de la faille EPG (comme tout le monde avait initialement supposé), mais sur une faille inverse/aveugle non-affleurante, située au nord de la EPG. Les résultats obtenus dans ces articles par rapport à l'état des connaissances sismogéologiques de l'île par les différents chercheurs sont très pessimistes: «les complexités du tremblement de terre sont encore un mystère absolu...»; «...nous n'avons pas une vision claire du futur sismique de Haïti...»; «... le mieux que nous pouvons recommander comme résultat de nos investigations c'est de reconstruire Port-Au-Prince avec le maximum de mesures de sécurité qui soit possible selon les fonds disponibles...! »

En outre, certaines des conclusions obtenues dans ces articles sont contradictoires, ou directement erronées, à la vue des caractéristiques du séisme et de ses répliques. Par exemple, l'article de Calais et (2010, _p_794-799) présente des imprécisions, voir des erreurs, importantes:

1) la localisation de la série de répliques qu'ils utilisent est totalement différente de celle qu'utilisent Hayes et al. (2010, p. 800-805) dans le même volume de la revue ; (2) ils localisent l'épicentre sans aucune précision sur le plan de faille de l'EPG (en réalité il se trouve quelques kilomètres au sud) ; (3) ils suggèrent que la faille inverse responsable du séisme (faille de Léogâne) serait au nord de l'EPG et aurait une orientation ENE. Cette affirmation est erronée car: 1) la faille de Léogâne appartient au système de plissement tertiaire haïtien à direction ONO à NO (et non pas ENE) ; (et 2) on comprend mal comment une prétendue faille aveugle (non-affleurante) située au nord de l'EPG (à inclination N) peut générer un tremblement de terre avec un épicentre au sud d'elle-même et de la faille principale (EPG).).

La revue Earthquake Spectra a aussi consacré un numéro monographique au tremblement de terre haïtien, avec un total de 24 articles (volume 27, octobre 2011).

3.3. Evaluation de l'aléa sismique de l'île d'Hispaniola

3.3.1. Méthodologie et spécifications de calculs

Pour calculer l'aléa sismique de l'île d'Hispaniola, les différentes méthodes de calcul ont été analysées, et soumises à une étude comparative (déterministe, probabiliste). Celle choisie pour réaliser le calcul a été la méthode probabiliste connue sous le nom *Probability Seismic Hazard Assessment* (PSHA). Cette méthode semble être la plus appropriée pour l'étude du danger sismique visant à établir des critères de conception parasismique, car elle fournit les accélérations espérées associées à leur probabilité de dépassement ou à leur période de retour, données par une courbe d'aléa sismique. Ceci est fondamental dans la conception parasismique, puisque la probabilité supposée doit dépendre de l'importance de la construction. En outre, la méthode permet de quantifier les incertitudes inhérentes aux différentes modélisations de sismicité, zonage, équations de mouvement fort (lois d'atténuation), etc., à travers la composition d'un arbre logique qui considère les différentes possibilités de calcul.

Dans le calcul on a considéré, non seulement les zones sismogénétiques, mais aussi les failles décrites et caractérisées dans la section 3.2.2. Par conséquent, on adopte un modèle hybride composé de zones et de failles.

À cette fin, nous avons défini un zonage tenant compte de l'hypothèse que chaque zone sismogénétique a un potentiel sismique homogène, ce qui signifie que la sismicité est distribuée aléatoirement dans l'espace et le temps (modèle de Poisson). Trois des zones sismogénétiques contiennent les failles les plus importantes de la région (Septentrional, Enriquillo et Matheux-Neiba), considérées comme responsables d'événements de grandes magnitudes (à partir de Mw 6.5 dans la faille de Matheux-Neiba et de Mw 7.0 dans les failles d'Enriquillo et de Septentrional). On considère que le reste d'événements (petites magnitudes) est distribué dans les zones sismogénétiques.

Le modèle de récurrence à travers lequel la sismicité dans ces zones a été caractérisée est une loi de Gutenberg-Richter (GR), calculée à partir des événements répertoriés dans le catalogue sismique. Dans

un premier temps, les calculs ont été réalisés en utilisant deux méthodes d'ajustement de la sismicité à la loi de Gutenberg-Richter: moindres carrés et maximum de vraisemblance. Pour le calcul final du risque nous avons rejeté la première des méthodes, vu l'état actuel de la technique.

Cependant, la récurrence des failles a été calculée à partir des données de taux de glissement obtenues avec GPS (mentionné dans la section 3.2), comme suit:

- Par une loi de GR pour les magnitudes associées à des failles, dont le paramètre «a» a été calculé en utilisant l'équation dérivée du moment sismique (Frankel et al, 1996):

$$\dot{M}_0 = \mu i LW = \sum_{M=6.5}^{M=M_C} N(M) M_0 = \sum_{M=6.5}^{M=M_C} 10^{a-bM} 10^{1.5M+16.1}$$

- A travers le modèle de tremblement de terre caractéristique, dont le taux de magnitude caractéristique a été obtenu en utilisant l'équation suivante (Frankel et al., 1996):

$$rate = \mu i LW / M_{0C}$$

Le mouvement étudié est calculé en termes d'accélération maximale du sol (PGA) et d'accélération spectrales (SA) pour les périodes structurelles suivantes : 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 et 2.0 secondes. Les cartes obtenues présentent le mouvement espéré pour trois périodes de retour : 475, 975 et 2475 années.

3.3.2. Calcul de l'aléa sismique de l'île d'Hispaniola

Le calcul a été effectué avec le logiciel CRISIS-2007 (UNAM, Université Nationale Autonome du Mexique). La première étape est consacrée à préparer les inputs nécessaires: catalogue sismique, caractérisation des failles, zonage et modèles d'atténuation (ou équations de prédiction de mouvement fort, GMPE).

3.3.2.1. Catalogue sismique

Un catalogue sismique a été élaboré, où se trouvent répertoriées des données historiques ainsi qu'instrumentales de la région de l'île et ses

environs, à travers de différents organismes du monde entier. Ils sont énumérés ci-dessous par ordre de priorité:

- 1.- EHB: catalogue révisé de Engdahl (Engdahl y Villaseñor, 2002; Engdahl et al., 1998)
BAKUN: article publié (Bakun et al., 2012)
RSPR: Red Sísmica de Puerto Rico. Puerto Rico.
UASD: Universidad Autónoma de Santo Domingo
NEIC: National Earthquake Information Center. USA Y NEIS: National Earthquake Information Service.
USCGS: United State Geological Survey. USA.
ISU, NEI Y RELACIES GARCÍA MAYORDOMO/GARCIA MAYORDOMO/CHUY Y ALVAREZ: Calcul de l'aléa sismique de la Rep. Dominicaine
ISC/ISS: International Seismological Centre. United Kingdom.
- 2.- HRVD: Department of Geological Sciences, Harvard University, Cambridge (Now GCMT). USA.
GCMT: Global Centroid Moment Tensor
PDE: Preliminary Data Earthquake (del NEIC o USGS)
CSEM: Centre Sismologique Euro-Mediterraneen. Francia.
LDG: Laboratoire de detection et de geophysique. Francia.
- 3.- CADCG: Central América Data Centre. Costa Rica.
CASC: Central American Seismic Center. Universidad de Costa Rica, San José. Costa Rica.
IPGH: Instituto Panamericano de Geografía e Historia. Panamá.
SSNC: Servicio Sismológico Nacional de Cuba, Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Cuba
JSN: Jamaica Seismic Network, University of the West Indies – Mona. Jamaica.
TRN: Seismic Research Unit, University of the West Indies. Trinidad & Tobago.
- 4.- IASPEI: International Association for Seismology and Physics of the Earth Interior.
IDC: International Data Center of the CTBTO Preparatory Commission.
EIDC: Experimental (GSETT3) International Data Center. Center for Monitoring Research. USA.
BJI: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. China

GUTE/G&R: Gutenberg-Richter (article publié, Gutenberg y Richter, 1954)
SZGRF: Seismologisches Zentralobservatorium Grafenburg. Alemania.
NAO: Norwegian seismic Array (NORSAR). Norway.
HFS: Hagfors Observatory, The National Defense Research Institute. Sweden.
DUSS: Department of Geology, Faculty of Sciences, Damascus University. Siria.
MOS: Geophysical Institute-Russian Academy of Science, Obninsk. Rusia.

Une fois recueillis tous les événements enregistrés dans la région entre 1551 et 2011 (7700 registres, approximativement), on a procédé à leur homogénéisation, afin de disposer de toutes les magnitudes à la même échelle (M_w), puisque initialement il existait une grande hétérogénéité entre les données fournies par les différents organismes (M_s , m_b , M_D , M_L). Pour cela, on fait appel aux équations empiriques élaborées par Bozzoni et al. (2011) dans leurs travaux de calcul de l'aléa sismique dans les îles orientales des Caraïbes.

Ensuite on a procédé à son **dépuration**, réalisée en plusieurs étapes:

Etape A. On a éliminé du catalogue originel les registres d'événements dépourvus de localisation et de date, ainsi que tous les séismes de magnitudes $M_w < 4.0$, dont l'influence sur l'aléa sismique est considérée négligeable.

Etape B. On a localisé les événements dupliqués, c'est-à-dire ceux fournis par plusieurs organismes avec des solutions différentes. On a considéré les registres aux coordonnées identiques de localisation, date et heure, comme des registres représentant les mêmes événements. Dans ces cas, on a conservé seulement les données du tremblement de terre apportées par l'organisme le plus fiable (suivant l'ordre de priorité cité précédemment).

Etape C. Avec les données résultantes, on a localisé les séries sismiques et éliminé les répliques et prémonitoires, gardant uniquement le tremblement de terre principal de chaque série (de

manière à vérifier l'hypothèse selon laquelle l'ajustement de l'activité sismique est régi par un modèle de Poisson).

Après ce processus, le catalogue définitif contient 1786 événements, dont:

- 96 tremblements de terre historiques (jusqu'en 1960); leur magnitude varie entre [4.0-8.3].
- 1690 tremblements instrumentaux (jusqu'en 1960); leur magnitude varie entre [4.0-7.0].

Une dernière correction a été apportée par manque de **complétude** du catalogue. Pour cela, on a déduit les années de référence à partir desquelles le catalogue peut être considéré complet pour différents intervalles de magnitude avec un pas de 0.5.

Pour effectuer la correction de l'incomplétude, le catalogue est divisé en deux régimes de profondeur:

- Catalogue superficiel: séismes de profondeur de moins de 50 km.
- Catalogue profond: séismes de profondeur de plus de 50 km.

La table des années de référence, résultant de chaque régime de profondeur et intervalle de magnitude, est présentée ci-dessous :

Rang de Mw	Année de référence	
	Prof. < 50 km	Prof. ≥ 50km
[4.0 - 4.5)	2000	2000
[4.5 - 5.0)	1990	1990
[5.0 - 5.5)	1970	1980
[5.5 - 6.0)	1960	1960
[6.0 - 6.5)	1920	1925
[6.5 - 7.0)	1680	1680
[7.0 - 7.5)	1551	1615
[7.5 - 8.0]	1551	1615

La Figure 3-8 montre la carte des épicentres recueillis dans le catalogue du projet réalisé.

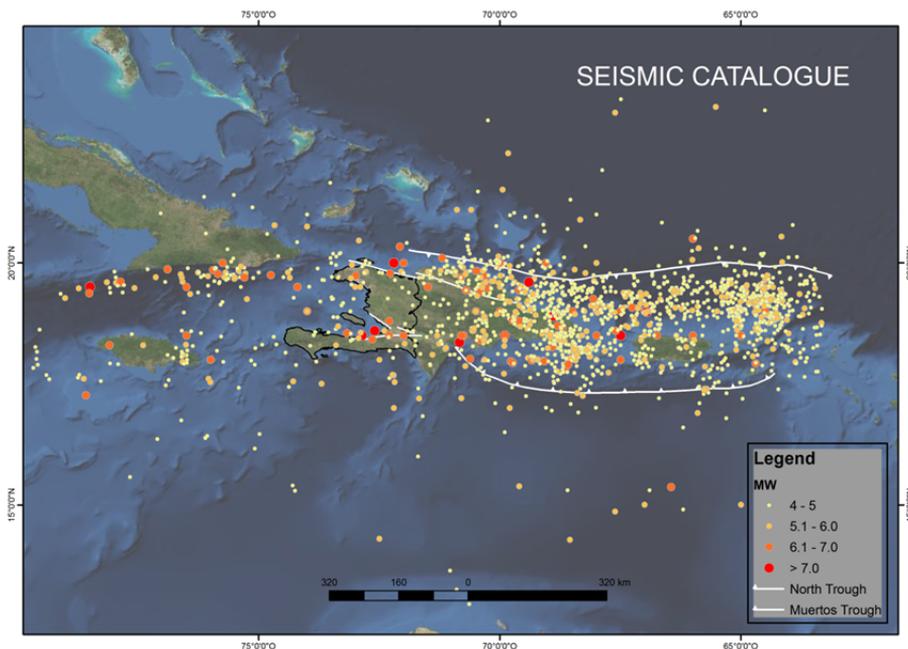


Figure 3-8. Catalogue sismique élaboré pour le projet SISMO-HAITI

3.3.2.2. Caractérisation des sources sismogénétiques

Comme il est indiqué à la section 3.3.1, pour cette étude on a considéré comme sources sismogénétiques les trois failles principales de la région et les zones sismogénétiques définies couvrant l'île d'Hispaniola. Pour définir ce zonage, on a considéré l'activité sismique des zones de subduction (zonage profond) et de la région corticale (zonage cortical) qui abritent les systèmes de failles locales de l'île.

A partir des travaux de García-Mayordomo et Suárez (1999) ainsi que ceux de Granja (2008), on a défini un zonage superficiel ($h < 50$ km), composé de six zones sismogénétiques, où l'on a considéré les failles, et un zonage profond ($h \geq 50$ km), composé de quatre zones définies dans le régime de subduction. Les deux zonages se montrent dans la Figure 3-9 et la Figure 3-10, respectivement.

On a choisi quatre critères fondamentaux pour définir ces zonages:

- Le style tectonique de déformation tectonique .

- La géologie superficielle (domaine géologique avec une certaine homogénéité mécanique).
- Une certaine homogénéité des familles de failles quaternaires, en termes d'orientation, cinématique et taille.
- Distribution et caractéristiques de la sismicité.

Ces critères ont été appliqués principalement aux zones superficielles où il existe des informations géologico-structurelles. Pour les zones profondes, on a considéré uniquement :

- La géométrie de la zone de subduction à partir de données géophysiques .
- La nature de la sismicité, en termes de distribution ainsi que de mécanismes focaux.

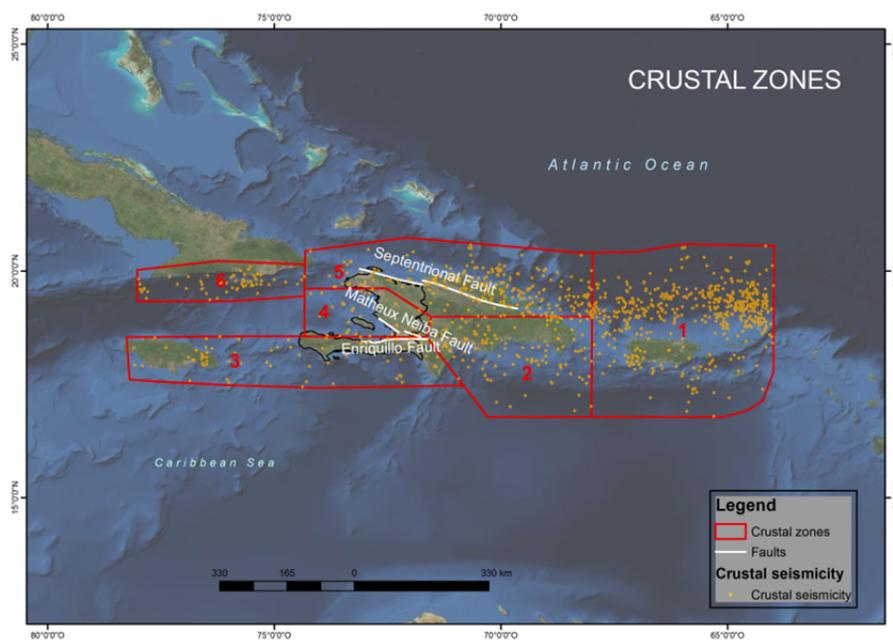


Figure 3-9. Zonage sismique régional. Zones corticales superposées avec la tectonique de la région.

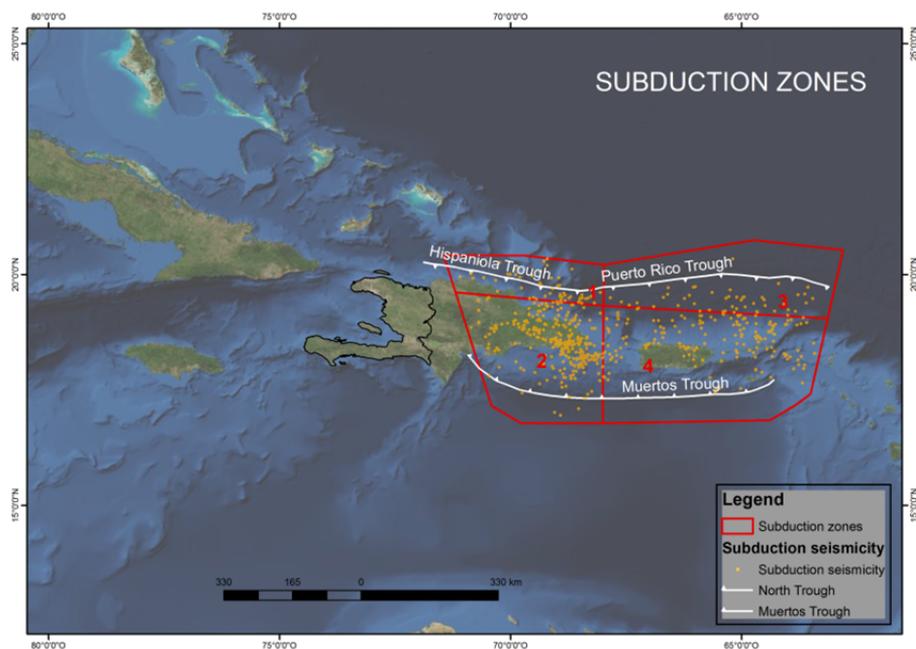


Figure 3-10. Zonage sismique régional. Zones profondes de subduction intra-plaque superposées avec la tectonique de la région.

Les paramètres caractérisant l'activité sismique de chaque source, soit-elle une zone ou une faille, ont été calculés selon la procédure décrite dans le paragraphe 3.3.1. Les paramètres résultants se montrent dans la table ci-dessous:

Nom de la zone superficielle	Prof. (km)	Vraisemblance maximale			Paramètres sismiques	
		E (M)	M1	M2	b	N(M min)
ZONA 1	10	7.8	7.5	8.0	1.01046	18.789734
ZONA 2	10	8.0	7.7	8.2	0.86817	4.191390
ZONA 3	10	6.6	6.3	6.8	0.74205	2.560958
ZONA 4	10	6.7	6.4	6.9	0.81181	0.975809
ZONA 5	10	7.3	7.0	7.5	0.91988	9.510638
ZONA 6	10	7.4	7.1	7.6	0.90939	2.746439

Vraisemblance maximale

Nom de la zone profonde	Prof. (km)	Mag máx			Paramètres sismiques	
		E (M)	M1	M2	b	N(M min)
ZONA 1s	50-245	6.3	6.0	6.5	1.40016	3.704045
ZONA 2s	50-245	8.6	8.3	8.8	1.06381	13.846478
ZONA 3s	50-224	5.5	5.2	5.7	1.55693	2.381056
ZONA 4s	50-224	7.6	7.3	7.8	1.19916	7.049373

Paramètres calculés à partir de données GPS de mouvements de failles

Nom de la faille	Rang de Mw		Modèle de G-R		Modèle de séisme caractéristique		
	Mmi	Mc	b	N(Mmin)	N(Mc)	T00	F
2A.Septentrional	7	7.5	1.0	0.002505	0.003165	169	0.086870
2B.Septentrional	7	7.7	1.0	0.002522	0.003090	169	0.121092
4A.Matheux	7	7.4	1.0	0.000164	0.000282	3541	0.048945
4B.Matheux	7	7.3	1.0	0.000149	0.000292	241	0.036859
3.1.Enriquillo W	6.5	7.6	1.0	0.002826	0.001837	543	0.174632
3.2.Enriquillo E	6.5	7.5	1.0	0.003271	0.001881	241	0.159321
3.1.F.Les Cayes E	6.5	7.2	1.0	0.001893	0.002019	241	0.112820
3.1.G.Les Cayes W1	6.5	7.2	1.0	0.001587	0.002083	241	0.113383
3.1.G.Les Cayes W2	6.5	7.1	1.0	0.001693	0.002090	104	0.097251
3.2.A.Miragoane	6.5	6.9	1.0	0.001524	0.002202	1	0.065380
3.2.BC.Goabe-Dufort	6.5	7.1	1.0	0.001503	0.002131	104	0.097551
3.2.D.Nomance	6.5	7.1	1.0	0.001456	0.002136	104	0.097585
3.2.E.Dumay	6.5	7.3	1.0	0.002037	0.001982	241	0.128564

3.3.2.3. Equations de prédiction du mouvement fort du sol.

La prochaine étape nécessaire à l'étude de l'aléa sismique est la définition des modèles d'atténuation ou GMPE's (« Ground Motion Prediction Equations' »), avec lesquels on simule le mouvement, qui constituent le deuxième input de calcul.

Etant donné que, jusqu'à ce jour, on n'a pas encore développé des équations spectrales d'atténuation du mouvement fort du sol en Haïti,

on a décidé d'adopter les équations d'atténuation choisies pour le calcul de l'aléa sismique en Amérique Centrale (Benito et al. 2012), à cause des caractéristiques similaires que présentent la tectonique des deux zones, ainsi que quelques-unes des équations proposées dans deux études de la région Caraïbe : « Probabilistic Seismic Hazard Assessment at the Eastern Caribbean » (Bozzoni et al. 2011) et « Seismic Hazard Maps for Haiti » (Frankel et al. 2011).

Une fois analysées les caractéristiques de chaque modèle d'atténuation proposé, les choix finaux sont les suivants:

MODÈLE	TYPE DE SOURCES	PARAMÈTRES	ORIGINE DES DONNÉES	TYPE MAG	RANG MAG	TYPE DIST	RANG DIST
Kanno et al (2006)	Intraplaque, cortical	M, dist, type de sol	Amérique Centrale	Mw	4.0-9.0	Rrup	0-200 km
Zhao et al (2006)	Interplaque, Intraplaque, cortical	M, dist, H, type de source, mécanisme, type de sol	Japon	Mw	5-8.2	Rrup	10-300 km
Lin and Lee (2008)	Interplaque, Intraplaque,	M, dist, H, type de séisme, type de sol	Taiwan	Mw	5.3-8.1	D hip	15-630 km
Boore and Atkinson (2008)	Corticale	M, dist, type de sol, mécanisme	Mondiale	Mw	5.0-8.0	R jb	< 200 km

MODÈLE	MOUVEMENT	RANG FRÉQUENCE	COMPOSANTE UTILISÉE POUR PGA y SA	TYPE DE SOL ET VITESSES ASSOCIÉES
Kanno et al (2006)	log (SA) (cm/s ²)	0.05-5.0 s	Mesure géométrique des deux composantes horizontales	roche, sol mou
Zhao et al (2006)	log (cm/s ²)	0-5.0 s	Mesure géométrique des deux composantes horizontales en cm/s ²	Roche dure: V30>1100; roche: V30>600; sol dur: 300<V30=600; sol moyen: 200<V30=300;V30=200
Lin and Lee (2008)	log (gals)	0.01-5 s	Mesure géométrique	Roche (B,C), sol dur (D, E) :selon Lee et al. (2001)
Boore and Atkinson (2008)	log (cm/s ²)	0.01-10 s	Mesure géométrique des deux composantes horizontales	NEHRP

Dans les figures ci-dessous (Figure 3-11 et Figure 3-12) sont représentés ces modèles selon le type de source, superficielle ou profonde:

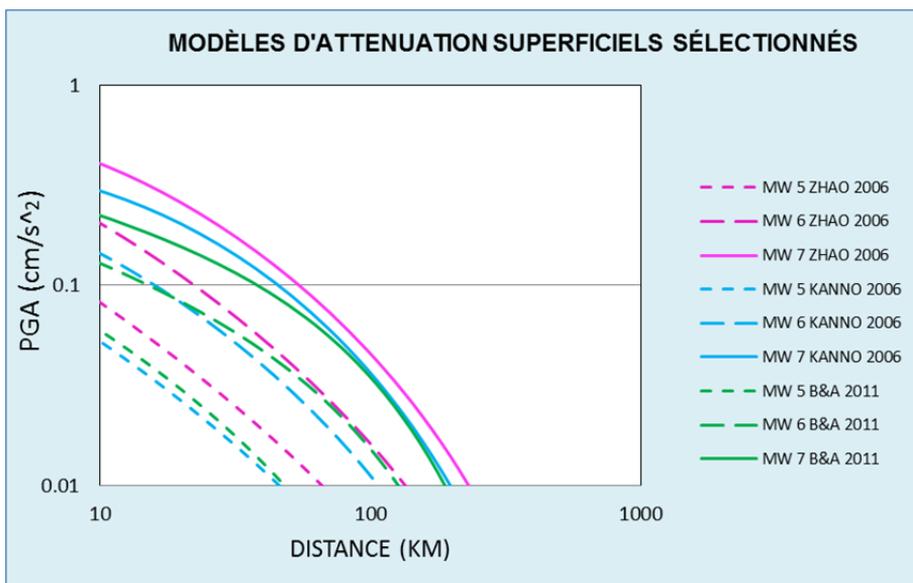


Figure 3-11. Représentation des modèles d'atténuation sélectionnés pour les sources sismiques corticales pour le calcul de l'aléa sismique d'Haïti.

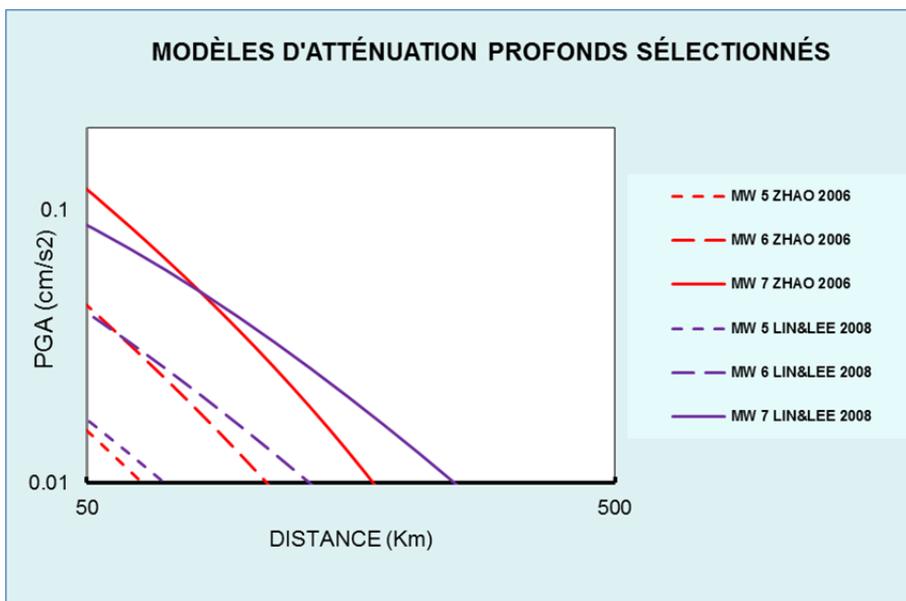


Figure 3-12. Représentation des modèles d'atténuation sélectionnés pour les sources sismiques de subduction intra-plaque pour le calcul de l'aléa sismique d'Haïti.

3.3.2.4. Arbre logique

On a créé un arbre logique à deux nœuds pour quantifier l'incertitude épistémique inhérente aux GMPE's ainsi qu'aux modèles de récurrence adoptés pour les failles. Les nœuds sont munis de six branches et deux branches respectivement, qui représentent chacune des options de calcul adoptées. Chaque branche du nœud d'atténuation résulte d'une combinaison de modèles, l'un pour des zones corticales et l'autre pour des zones de subduction. Un résumé de la composition des nœuds et des branches de l'arbre logique adopté se présente ci-dessous:

Nœud des modèles d'atténuation:

Branche 1 (KZ). Poids 0.15.

- Zones corticales avec le modèle d'atténuation de Kanno et al., 2006.
- Zones de subduction intraplaque avec le modèle d'atténuation de Zhao et al., 2006.

Branche 3 (KLL). Poids 0.15.

- Zones corticales avec le modèle d'atténuation de Kanno et al., 2006.
- Zones de subduction interplaque avec le modèle d'atténuation de Lin and Lee 2008.

Branche 4 (ZZ). Poids 0.15.

- Zones corticales avec le modèle d'atténuation de Zhao et al., 2006.
- Zones de subduction intraplaque avec le modèle d'atténuation de Zhao et al., 2006.

Branche 6 (ZLL). Poids 0.15.

- Zones corticales avec le modèle d'atténuation de Zhao et al., 2006.
- Zones de subduction interplaque avec le modèle d'atténuation de Lin and Lee 2008.

Branche 7 (BZ). Poids 0.2.

- Zones corticales avec le modèle d'atténuation de Boore and Atkinson 2008.
- Zones de subduction intraplaque avec le modèle d'atténuation de Zhao et al., 2006.

Branche 9 (BLL). Poids 0.2.

- Zones corticales avec le modèle d'atténuation de Boore and Atkinson 2008.
- Zones de subduction interplaque avec le modèle d'atténuation de Lin and Lee 2008.

Nœud des modèles de Récurrence:

Branche 1 (GR-GR). Poids 0.5.

- Zones sismogénétiques: loi de GR calculée à partir du catalogue sismique.
- Failles: loi de GR calculée à partir du taux de glissement obtenu d'observations GPS.

Branche 2 (GR-MC). Poids 0.5.

- Zones sismogénétiques: loi de GR calculée à partir du catalogue sismique.
- Failles: modèle de séisme caractéristique calculé à partir du taux de glissement obtenu d'observations GPS.

3.3.3. Résultats de l'aléa sismique de l'île d'Hispaniola

Ce rapport présente quelques-unes des cartes d'aléa élaborées pour l'île d'Hispaniola. Dans la section 4.3 on montre les plus remarquables:

- Cartes en termes de PGA, pour des périodes de retour (PR) de 475, 975 et 2475 ans, obtenues par le calcul d'une moyenne pondérée à partir de l'arbre logique (Figure 4-3 à Figure 4-5).

- Cartes de PR 475 ans, en termes de SA (T) pour T = 0.1, 0.2, 0.5, 1 et 2 secondes (Figure 4-6 à Figure 4-10)
- Cartes de PR 975 ans, en termes de SA (T) pour T = 0.2 y 1 secondes (Figure 4-11 et Figure 4-12)
- Cartes de PR 2475 ans, en termes de SA (T) pour T = 0.2 et 1 secondes (Figure 4-13 et Figure 4-14)

3.4. Microzonation sismique et quantification de l'effet de site

3.4.1. Introduction

L'évaluation précise du risque sismique requiert d'études détaillées qui tiennent compte des aspects sismiques (rupture, propagation, etc.), géologiques (effets de sol, compte tenu des possibles phénomènes d'amplification associés à la géologie superficielle, topographie, etc.), sismologiques (risques associés aux fortes vibrations sismiques tels que liquéfaction, glissements de terrain, tassements différentiels, etc.), en relation avec l'ingénierie comme la vulnérabilité et le comportement sismique des constructions et d'autre part, ceux liées aux aspects économiques et aux victimes. De cette façon on estime, ou le risque sismique (Benito p. ex la 2010a), ou les scénarios de dégâts sismiques (p. ex. Enomoto et al., 2010), ou bien tous les deux. Ce dernier type d'études mérite une attention prioritaire pour la gestion et réduction efficace du risque sismique dans les villes.

L'étude de l'effet de site, en fonction des conditions géologiques du terrain, est un aspect important pour la prévention et la réduction du risque sismique à l'échelle urbaine. Les études de microzonation sismique cherchent à obtenir des fréquences (périodes) prédominantes et les amplifications du mouvement du sol prévu lorsque survient un choc sismique.

L'évaluation précise des caractéristiques de la réponse sismique pour chaque type de sol et sa capacité d'amplification, nécessite une connaissance en détail du comportement dynamique de la structure

géologique superficielle du terrain. Selon la classification de NEHRP de 1993, la vitesse moyenne des ondes S dans les 30 premiers mètres (VS30) a été adoptée dans divers codes sismiques (p. ex. la Norme de Construction Antisismique Espagnole (NCSE-02); Eurocode-8 (EC8)) en tant que paramètre représentatif de la réponse sismique du sol.

La relation entre les courbes de dispersion des ondes superficielles et des paramètres élastiques du sol a été largement utilisée dans la prospection géophysique, en utilisant des tremblements de terre et/ou des explosions, pour obtenir des modèles superficiels stratifiés 1D (p. ex. Navarro et al., 1997;) (Tokimatsu, 1997). La méthode d'autocorrélation spatiale (SPAC), basé sur le travail de Aki (1957) et réinterprétée par Henstridge (1979), a été testée comme une technique innovatrice et appropriée pour déterminer les propriétés élastiques du terrain à partir des mesures du bruit ambiant (p. ex. Parolai et al. 2005;) Garcia-Jerez et al. 2007, 2008, 2010 ; Navarro et al. (2008, 2010). Cette méthode se présente comme une alternative aux méthodes traditionnelles de prospection et permet de calculer les vitesses de propagation des ondes superficielles. L'inversion des courbes de dispersion des vitesses de propagation des ondes superficielles de période courte permet d'obtenir le modèle de vitesse de cisaillement de la structure du terrain à l'échelle régionale (p.e. Navarro et al. 1997) et locale (p.e. García-Jerez et al. 2007, 2008; Navarro et al. 2008, 2010).

Les mesures du bruit ambiant de courte durée pour caractériser le comportement dynamique du sol (période prédominante du sol), ont été appliquées dans différents environnements sismiques (p. ex. Garcia-jerez et al. 2007; Navarro et al. 2001, 2007 ; Caselles et al. 2010). La méthode de la relation spectrale H/V du bruit ambiant (Nakamura, 1989) a été largement discutée et on a démontré qu'elle est valide, rapide et efficace dans la détermination de la période prédominante du sol (p. ex. Ohmachi et Konno, 1998; Bard, 1999 ; Enomoto et al., 2002).

L'objectif de cette étude est de procéder à une analyse détaillée de la réponse sismique du sol (structure de la vitesse de cisaillement et période prédominante) à différentes localités de la zone urbaine de Port-au-Prince, par l'analyse des enregistrements du bruit ambiant de courte période, ce qui permet d'évaluer quantitativement la relation

entre les conditions superficielles du terrain en ce qui concerne l'amplification et la distribution des dommages observés.

Les résultats obtenus seront une contribution importante pour des recherches postérieures sur la réduction du risque sismique dans la région, car ils permettront de sélectionner les emplacements plus sûrs pour la construction des nouveaux bâtiments, l'amélioration de la conception sismique et la prévention des catastrophes avec des conséquences négatives sur l'environnement naturel et socioéconomique.

3.4.2. Analyse du bruit ambiant

Le bruit ambiant se compose de vibrations du terrain de faible amplitude (de l'ordre de plusieurs micromètres) produites par des phénomènes naturels (fronts atmosphériques, réactions géothermiques, vagues, etc.) et/ou des sources artificielles (trafic, machinerie lourde, etc.). Les vibrations qui ont des fréquences $f > 1$ Hz sont généralement désignées « bruit ambiant » (microtrements) et ceux où $f < 1$ Hz sont des microséismes. Le bruit ambiant est utilisé en ingénierie sismique en raison de la forte relation existante entre les caractéristiques de celui-ci et le comportement dynamique fondamental des couches plus superficielles du sol.

3.4.2.1. Instrumentation

On a utilisé deux équipes portables qui enregistrent la vibration de l'environnement SPC-51, formés par un système d'acquisition (Figure 3-13 a), des senseurs de vitesse VSE-15 dans un intervalle de fréquences entre 0,1 et 70 Hz et un intervalle dynamique de 15×10^{-8} à 0.1 m/s (Figure 3-13 b), une conversion analogique digitale de 16 bit et une fréquence d'échantillonnage variable qui permet des enregistrements simultanés sur 6 bandes. Pour la détermination de la structure superficielle du terrain on a investi 30 minutes par rayon choisi, tandis que 10 minutes ont été suffisantes pour déterminer la période prédominante du sol. Dans les deux cas, le signal a enregistré 100 événements par seconde, en évitant pendant le processus de mesure des sources de bruit à proximité du sismomètre.

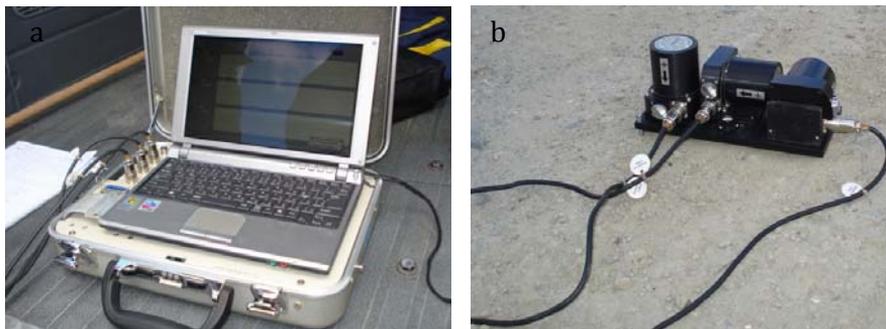


Figure 3-13. Equipe utilisée pour les mesures de bruit ambiant à Port Au Prince (Haïti). (a) Système d'acquisition; (b) Senseurs de vitesse

3.4.2.2. Structure superficielle du terrain

3.4.2.2.1. Analyse de dispersion des ondes Rayleigh

La détermination de la structure superficielle du terrain dans la zone urbaine de Port-au-Prince (Haïti) a été réalisée à proximité du Palais National à partir des mesures de bruit ambiant, à l'aide de l'appareil de mesure décrit dans la section précédente. On a utilisé 6 senseurs de vitesse VSE-15D de composante verticale, distribués, 5 d'entre eux symétriquement au long d'un cercle de rayon R , et un sixième au centre. Afin d'obtenir un large éventail de périodes dans la courbe de dispersion des ondes Rayleigh enregistrées, on a utilisé différents rayons (5, 10 et 20 m respectivement).

Depuis leur introduction par les articles de Aki (1957), les mesures du bruit ambiant à l'aide de réseaux de senseurs sont devenues populaires et ont prouvé leur utilité pour l'obtention des paramètres élastiques qui caractérisent la structure superficielle du sol (Jerez-Garcia et al., 2008, 2010). On a utilisé la méthode d'autocorrélation spatiale traditionnelle (SPAC), qui suppose que le bruit ambiant est généré par des sources éloignées, qu'il se compose d'ondes superficielles, et qu'il existe un mode clairement prédominant pour chaque fréquence et type d'onde (Rayleigh et Love).

Le mode opératif le plus immédiat de profiter des relations développées par Aki (1957) consiste à effectuer des mesures simultanées des composantes verticales sur un cercle de rayon R et sur une station centrale ($R = 0$) en utilisant la propriété:

$$\rho(R, \omega) \equiv \frac{W_0(R, \omega)}{W_0(0, \omega)} = J_0(k_R(\omega)R) \quad (1)$$

pour calculer la vitesse de phase des ondes Rayleigh $c_R(\omega) = \omega/k_R(\omega)$ à partir du coefficient d'autocorrélation spatiale de $\rho(R, \omega)$.

Les enregistrements des six stations ont été traités à l'aide de la « traditionnelle » méthode SPAC (Aki, 1957). Tous les signaux (Figure 3-14) ont été séparés à des intervalles de 20 secondes avec un recouvrement de 80 % et passés au domaine de la fréquence à l'aide de la transformée de Fourier discrète (TFD). Quant aux spectres complexes on calcule une moyenne pour les stations sur la circonférence et une division pour la valeur correspondante à la station centrale. Le résultat est le coefficient de corrélation $\rho(R, \omega)$, (Figure 3-15) qui est en relation avec la vitesse de phase des ondes Rayleigh $c(f)$, ce qui permet de calculer la courbe de dispersion correspondante à chaque rayon (Figure 3-16). La courbe de dispersion $c(f)$ pour un site (Figure 3-17) a été déterminée à partir de l'interpolation des courbes de dispersion obtenues pour les différents radios utilisées. La stabilité de $\rho(R, \omega)$ pour les différents espaces temporels a été constatée, éliminant ceux qui présentent des altérations claires et en effectuant une moyenne sur le reste.

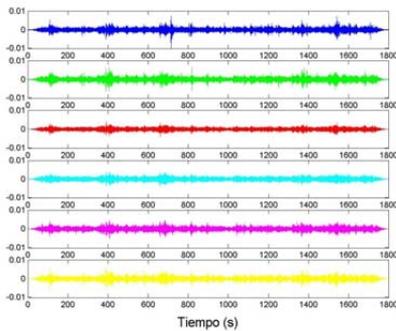


Figure 3-14 Exemple d'enregistrements de bruit ambiant à Port Au Prince.

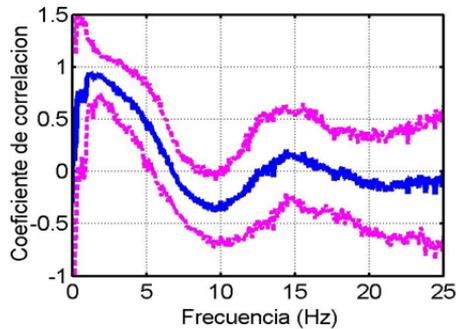


Figure 3-15 Exemple de coefficient de corrélation obtenu pour un rayon donné

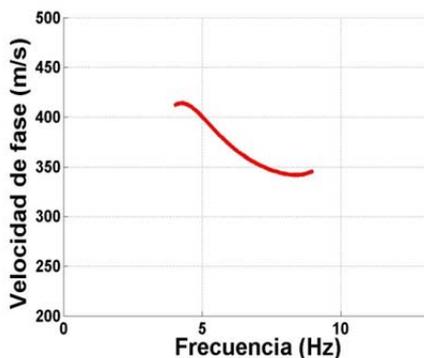


Figure 3-16. Courbe de dispersion des ondes

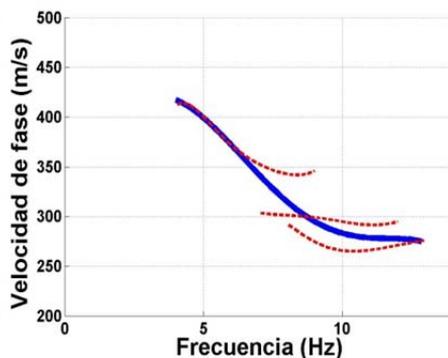


Figure 3-17 Courbe de dispersion obtenue à Port Au Prince (ligne bleue) à partir de l'interpolation des courbes de dispersion obtenues pour différents rayons

3.4.2.2.2. Structure de la vitesse de cisaillement

Le modèle de la vitesse des ondes de cisaillement $V_S(z)$ a été déterminé à partir de l'inversion stochastique de la courbe de dispersion observée (Figure 3-17), à l'aide d'un modèle initial formé par 7 couches sur un demi-espace, construit à partir du critère $\lambda/3$ (Tokimatsu, 1997), n'ayant pas d'informations géotechniques précises sur la zone d'étude.

Dans le procès d'inversion nous avons inversé la vitesse de phase des ondes R_g , ainsi que l'épaisseur des couches, ce qui a permis, compte tenu de l'intervalle de la courbe de dispersion, d'obtenir un modèle de vitesse de cisaillement jusqu'à une profondeur de 40 m sur un demi-espace (Figure 3-18).

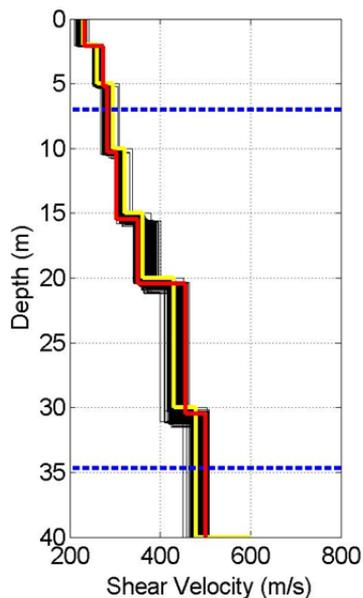


Figure 3-18. Modèle de vitesse de cisaillement obtenu sur le site du Palais National à Port Au Prince (Haïti). La ligne jaune représente le modèle initial de départ. La ligne rouge est le modèle final. Les lignes bleues représentent l'intervalle de profondeur dans lequel le modèle présente une bonne résolution.

Les valeurs VS obtenues (Table 3-1) oscillent entre 233 ms⁻¹ à la surface et 501 ms⁻¹ à une profondeur de 40 m. La comparaison entre la courbe de dispersion observée et la courbe de dispersion théorique (Figure 3-19), calculée à partir du modèle de vitesse obtenu (Figure 3-18), montre que les deux courbes sont presque identiques, ce qui démontre que le modèle calculé concorde bien avec les conditions réelles du terrain analysé.

Table 3-1. Valeurs du modèle de vitesse de cisaillement obtenu sur le site du Palais National à Port Au Prince (Haïti).

Épaisseur (m)	V _s (ms ⁻¹)
2.10	233
3.12	274
5.07	283
5.20	303
4.94	350
10.03	456
10.04	501

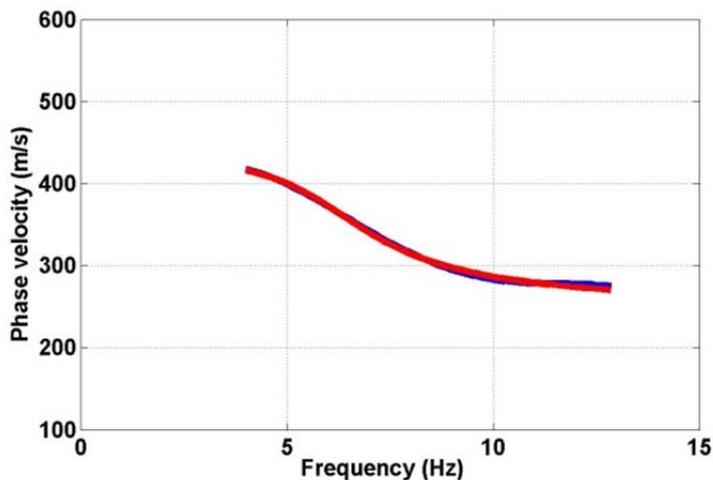


Figure 3-19. Courbe de dispersion obtenue à Port Au Prince (ligne bleue) à partir de l'interpolation des courbes de dispersion obtenues pour différents rayons (lignes rouges).

3.4.2.2.3. Structure V_s^{30}

Le modèle moyen de vitesse des ondes de cisaillement jusqu'à une profondeur de 30 m (V_s^{30}) a été calculé selon la formule:

$$V_s^{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}} \quad (2)$$

où h_i et v_i représentent l'épaisseur (en mètres) et la vitesse des ondes de cisaillement (m - 1) de chaque couche respectivement, par-dessus les 30 premiers mètres de profondeur.

Avec les valeurs obtenues de la structure superficielle du terrain (Table 3-1) nous avons calculé la valeur V_s^{30} , et nous obtenons une valeur de 331 ms⁻¹, ce qui classe ce site comme sol de type D selon la norme NEHRP (2003) ou de type III selon la norme NCSE-02 (Table 3-2). Ce résultat est dans l'intervalle des vitesses de cisaillement obtenu empiriquement dans la zone d'étude à partir des profils sismiques de réfraction (Table 3-3).

Table 3-2. Types de sols selon NEHRP 2003, l'Eurocode 8 (EC8), et la norme de construction sismorésistante espagnole (NCSE-02)

Types de sols			DESCRIP- TION GÉNÉRALE	V _S ³⁰ (ms ⁻¹)		
NEHRP	EC8	NCSE-02		NEHRP	EC8	NCSE-02
A	A	I	Roche dure	>1500	>800	>750
B			Roche semi dure	760-1500		
C	B	II	Sol très dense et roche molle	360-760	360-800	400-750
D	C	III	Sols rigides	180-360	180-360	200-400
E	D	IV	Sol moyen-mou	<180	<180	<200
F	E		Sols spéciaux	Liquéfaction	Liquéfaction	

Table 3-3. Classification du sol de la région urbaine de Port Au Prince (Bachhuber et al. 2010)

Unités géologiques	N	Matériaux	V _S ³⁰ (ms ⁻¹)
Remplissages artificiels	3	Zone de dépôts artificiels gagnée sur la mer.	278±68
Holocène	3	Dépôts marins et estuariens, intercalés avec dépôts d'éventail alluvial.	331±25
Pléistocène-Holocène	4	Dépôts d'éventail alluvial disposés en forte pente le long de la partie frontale des montagnes.	519±79
Pliocène-Pléistocène	5	Dépôts du Pliocène le long de la partie frontale des montagnes.	514±38
Miocène-Pliocène	2	Conglomérat de dépôts d'éventail alluvial.	551±106

Basé sur les résultats antérieurs, nous avons réalisé une microzonation sismique de la zone urbaine de Port-au-Prince en fonction des valeurs de V_S³⁰ (Figure 3-20), pour son application au risque sismique local de la ville.

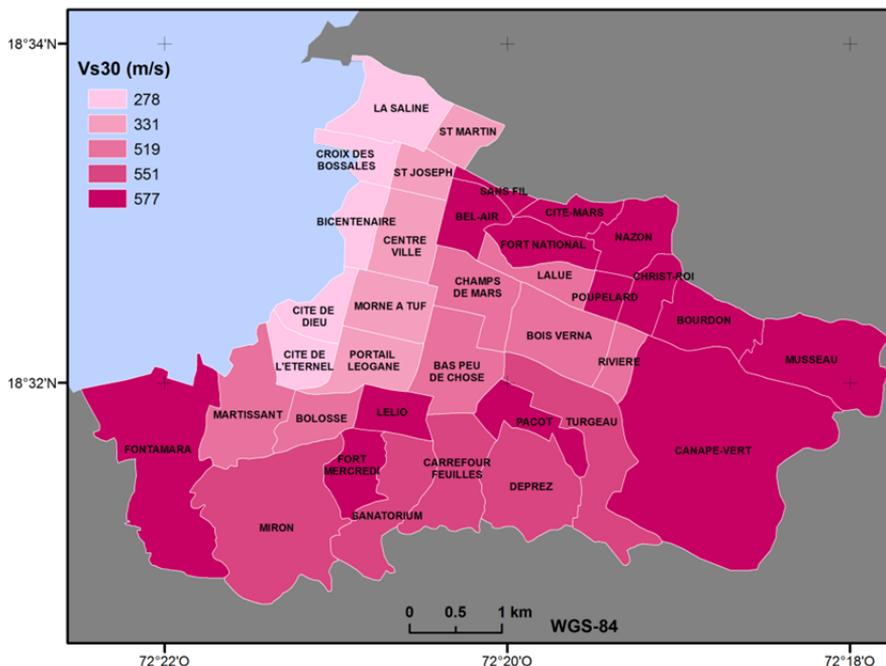


Figure 3-20 Distribution spatiale des valeurs V_{s30} sur la zone urbaine de Port Au Prince (Haïti)

3.4.2.3. Période prédominante du sol

L'existence de dépôts de matériaux sédimentaires non consolidés et superficiels localisés sur une structure géologique peut entraîner une augmentation du risque sismique, en raison de l'amplification de l'action sismique pour certaines bandes de fréquences, provoqué par le contraste de vitesse entre les matériaux peu consolidés et le socle rigide. Une situation particulièrement dangereuse se produit lorsque les périodes naturelles des bâtiments coïncident avec ces bandes d'amplification du sol et provoquent des effets supplémentaires de résonance (p. ex. Enomoto et al. 2004; Navarro et al. 2000, 2007, 2008b).

Les caractéristiques du sol sont souvent très variables, même dans des zones relativement petites comme une ville, et il est donc nécessaire de disposer de méthodes à bas coût qui permettent d'obtenir une caractérisation détaillée. L'utilisation des registres de bruit ambiant pour obtenir une classification du sol est une idée

originale de Kanai et al. (1954). Depuis lors, il existe de nombreuses études et applications dans le domaine de l'ingénierie sismique qui ont utilisé le bruit ambiant comme source d'excitation : pour déterminer la structure du terrain (p. ex. Arai et Tokimatsu, 2005; Garcia-Jerez et al., 2008) ; pour analyser le comportement dynamique du sol (p. ex. Ohmachi et Konno, 1998; Enomoto et al., 2002 ; Navarro et al, 2007) ; et pour déterminer la période naturelle et le facteur d'amortissement des édifices (p. ex., Satake et al., 2003, Oliveira et Navarro, 2010).

La méthode du rapport spectral H/V du bruit ambiant consiste à supposer que cette valeur présente un maximum absolu pour la fréquence où le sol exerce les plus grandes amplifications du mouvement sismique. Cette méthode est basée sur l'interprétation du bruit ambiant tels que les ondes superficielles qui se propagent au long d'une couche située par-dessus un demi espace élastique. De plus, cette méthode considère que l'effet d'amplification en relation avec les conditions du site est du à la couche sédimentaire situé sur le socle rocheux.

L'effet de site qui est équivalent à la fonction de transfert, $SE(\omega)$, est défini par l'expression:

$$S(\omega) = \frac{H_s(\omega)}{V_s(\omega)} \quad (3)$$

où $H(\omega)$ et $V(\omega)$ sont les intervalux d'amplitude de Fourier des composantes horizontale et verticale du mouvement, respectivement (Figure 3-21), et l'indice s correspond au mouvement superficiel.

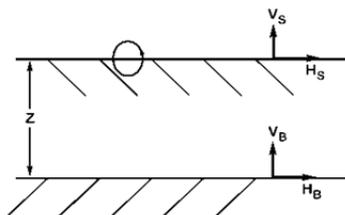


Figure 3-21 Modèle proposé par Nakamura pour interpréter la propagation du bruit ambiant sur un demi-espace d'épaisseur Z .

$S(\omega)$ présente un maximum d'amplitude à une fréquence qui est étroitement liée à la structure géologique locale et qui est très proche de la fréquence de résonance de l'onde s. La période correspondant à cette fréquence est appelée période prédominante.

Dans la pratique, puisque nous réalisons des mesures dans les trois directions, nous aurons deux directions du mouvement horizontal: l'un N-S ($HR(\omega)$) et l'autre E-W ($HL(\omega)$). Dans le cas où $HR(\omega) \neq HL(\omega)$, on a considéré que la direction de la composante horizontale est une moyenne géométrique des deux directions des composantes horizontales:

Les mesures du bruit ambiant dans la zone urbaine de Port-au-Prince ont été effectuées pendant le mois de juillet 2011. On a déterminé la période prédominante du sol sur 37 points de la ville la couvrant partiellement (Figure 3-22). La densité moyenne des points de mesure dans la zone centrale a été préparée selon une grille d'environ 500mx500m, tandis que la distance entre les points de mesure dans les zones éloignées du centre de la ville était d'environ 1000m.

L'analyse des enregistrements a été réalisée en divisant ces derniers en un ensemble d'intervalles de 20.48 s, avec un recouvrement de 2.56 s et en calculant l'intervalle des amplitudes pour chaque composante (Figure 3-23). Le rapport spectral H/V se calcule indépendamment dans tous les intervalles temporeux et se représente dans un diagramme chronologique. L'enregistrement est ensuite analysé et on trouve une moyenne pour les relations H/V des zones de bonne qualité (Figure 3-24), si l'on considère comme une composante horizontale la moyenne géométrique des composantes NS et EO. On a vérifié la stabilité du pic fondamental et la période d'amplitude maximum pour les points où cette amplitude s'identifie clairement a été représentée sur la Figure 3-25.



Figure 3-22 Distribution spatiale des points de mesure d'H/V.

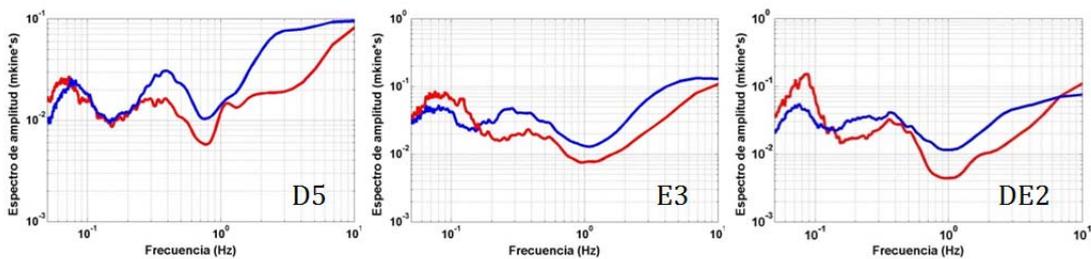


Figure 3-23 Exemples d'équations de Fourier. Composante horizontale (ligne bleue) y composante vertical (ligne rouge)

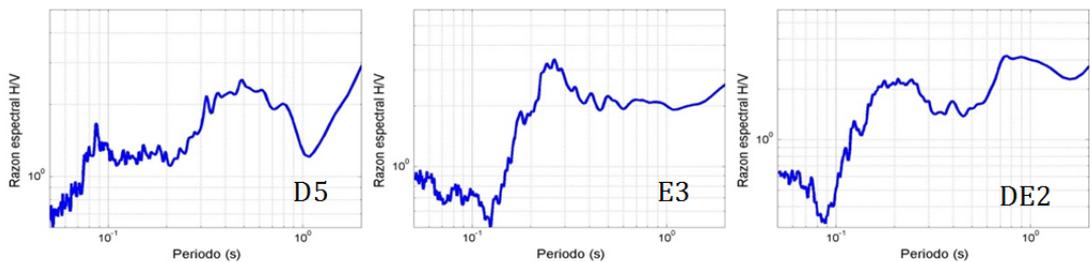


Figure 3-24 Exemples de razon espectral H/V.



Figure 3-25 Carte de distribution de périodes prédominantes du sol de Port Au Prince, obtenues à partir de mesures du bruit ambiant.

3.4.3. Fonction de transfert 1D

Les caractéristiques dynamiques du sol ont été étudiées sur le site du Palais National, à Port au Prince (Haïti) à partir de la fonction de transfert théorique 1D, afin d'obtenir la réponse théorique du terrain. Si on considère le modèle de vitesse VS (Figure 3-18), on a calculé la fonction de transfert correspondante (Figure 3-26) avec la méthode de Thomson-Haskell (Aki et Richards, 2002) dans le cas d'une incidence verticale des ondes S.

La fonction de transfert indique une période de résonance TSH = 0.33 s, qui coïncide avec la période prédominante du sol, obtenu à partir de la méthode H/V à l'aide de mesures du bruit ambiant ($T = 0.32$ s).

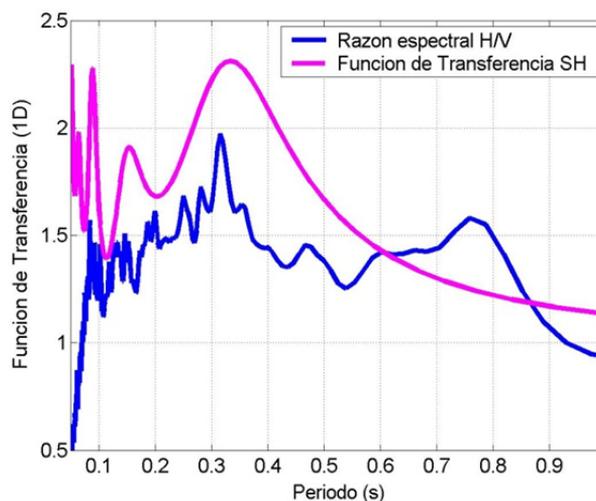


Figure 3-26 Fonction de transfert (ligne rose) sur le site du Palais Royal (Port Au Prince, Haïti). La ligne bleue représente la raison spectrale H/V sur ce site.

3.4.4. Conclusions

On a réalisé une microzonation sismique préliminaire de la zone urbaine de Port-au-Prince (Haïti) en termes de valeurs V_S^{30} et périodes prédominantes du sol, à partir des mesures du bruit ambiant.

On a déterminé la structure VS sur le site du Palais National, situé sur un sol formé par des dépôts marins et estuariens, intercalés avec des dépôts de cônes de déjection alluviaux Holocènes, jusqu'à une profondeur de 40 m, en utilisant la méthode SPAC. Ce sol présente une valeur $V_S^{30} = 331 \text{ ms}^{-1}$, ce qui le classifie comme un sol de type D selon la norme NEHRP (2003) ou bien de type III selon la norme NCSE-02. Cette valeur coïncide avec les résultats obtenus à partir des données de prospection géophysique obtenues par d'autres auteurs ($331 \pm 25 \text{ ms}^{-1}$) dans la zone d'étude (Bachhuber et al., 2010).

Les périodes prédominantes du sol présentent une distribution très irrégulière dans la région étudiée, ce qui est en accord avec l'hétérogénéité latérale du terrain dans cette région. Cependant, on observe une bonne corrélation entre l'intervalle des périodes prédominantes et des lithologies existantes. Les valeurs les plus

élevées de la période, supérieures à 0.45 s, s'observent principalement dans la zone de dépôts artificiels près du port et dans la formation de sédiments Holocènes, et son hétérogénéité est interprétée comme une conséquence de l'irrégularité de l'épaisseur des sédiments. Par contre, et en dépit de l'hétérogénéité dans la distribution observée des périodes prédominantes, la formation de dépôts et conglomérats des cônes de déjection Pliocènes-Miocènes présentent les valeurs les plus basses (valeurs inférieures à 0.15 s).

La fonction de transfert théorique 1D, calculée à partir du modèle de vitesse VS obtenu, a permis de caractériser la fréquence de la résonance théorique ($f = 3,03$ Hz) avec laquelle le cône alluvial Holocène montre une amplification supérieure. Ce résultat concorde avec celui obtenu à partir de la relation spectrale H/V.

Ces données présentent un intérêt pour l'évaluation du risque sismique à l'échelle locale dans la région urbaine de Port-au-Prince (Haïti).

3.5. Evaluation de la vulnérabilité sismique

3.5.1. Introduction

La vulnérabilité est définie comme le niveau de pertes observé dans un ou plusieurs éléments exposés à l'aléa sismique (exprimé comme le mouvement du sol dû à l'occurrence d'un événement sismique déterminé). Pour estimer les pertes dues aux mouvements du sol sur un ensemble de bâtiments donnés, qui composent un milieu urbain, il faut:

- La spécification correcte de l'aléa sismique, comme décrit dans la section 3.3.
- Une fonction de transfert, pour voir comment le mouvement du sol sera modifié en fonction des effets de site provoqués par la géologie locale (microzonage sismique), comme indiqué à la section 3.4.
- Une classification des typologies de bâtiments, en différentes classes, dont le comportement soit semblable

face à 'un tremblement de terre (autant dans la nature comme dans l'étendue des dommages)

- Une fonction qui permet de mettre en corrélation la distribution de dommages dans les typologies définies en fonction du mouvement du sol, appelée fonction de fragilité.

Il y a deux méthodes principales pour estimer la vulnérabilité sismique: empirique et analytique. Les méthodes empiriques sont basées sur les statistiques de dommages de bâtiments dus à des tremblements de terre passés, et déduites, généralement, à partir de données réelles. Les méthodes analytiques sont basées sur des fonctions mathématiques qui permettent de prédire le comportement du bâtiment en fonction de sa conception, ses matériaux, etc., et qui ont été obtenues par un calcul qui tient compte des modèles théoriques de la structure (i.e., analyse Push-over) et de l'observation expérimentale (FEMA, 2005).

3.5.2. Antécédents.

De nombreuses études au cours de ces dernières années ont analysé les typologies et la vulnérabilité des bâtiments après le tremblement de terre de 2010 en Haïti. DesRoches et al. (2011) ont réalisé une description des dommages causés par ce tremblement de terre, qui analyse les typologies de bâtiments à partir de données de l'IHSI (Institut Haïtien de Statistique et d'Informatique, 2010) et quantifie les dommages et les pertes, qualifiant l'événement de catastrophe. Goodno et al. (2011) ont analysé le dommage que les éléments non structuraux ont subi dans les bâtiments d'importance particulière, notamment ceux relatifs aux installations électriques. On en conclut qu'il est nécessaire d'améliorer les pratiques locales d'installation des éléments non structuraux critiques, en particulier dans des pays comme Haïti.

Holliday et Grant (2011) décrivent le comportement des bâtiments dans le quartier Christianville, situé 8 km à l'est de Léogâne, près de l'épicentre. Dans ce quartier, il y a un groupe de bâtiments construits au cours des 40 dernières années selon des méthodes de construction haïtiennes. On y observait une grande variabilité dans les dommages. Mix et al. (2011) ont effectué un travail de reconnaissance, pour

déterminer les modes de rupture des bâtiments résidentiels, et analysé les systèmes structurels, les matériaux de construction, et les méthodes constructives dont les limites sont imposées par le manque de connaissances techniques en ingénierie.

Marshall et al. (2011) ont observé la façon dont les bâtiments résidentiels en Haïti sont généralement construits par leurs propriétaires, qui peuvent, ou pas, avoir les compétences et les ressources pour construire une structure sûre face aux tremblements de terre. Ils indiquent que très peu de structures ont été conçues par des ingénieurs professionnels et inspectées en termes de qualité de la construction.

Lang et Marshall (2011) expliquent que les bâtiments dont les murs sont construits avant les colonnes (maçonnerie confinée) ont révélé une meilleure performance que les autres.

O'Brien et al. (2011) ont comparé les dommages dans des structures en béton armé en Haïti avec des dégâts observés dans des structures similaires en Turquie, vérifiant que les dommages étaient beaucoup plus élevés en Haïti pour ce type de construction.

3.5.3. Méthodologie:

La méthodologie à développer nécessite de:

- La collecte de données (bibliographie, bases de données des bâtiments, bases de données démographiques, etc.) pour certains environnements urbains d'Haïti (Port-au-Prince en particulier). En ce sens, la base de données doit contenir le plus de détails possibles sur les différentes structures (matériaux, nombre d'étages, utilisation, occupants, surface construite, etc.), les caractéristiques géométriques (hauteur, configuration en plan et en élévation), l'âge, le type de système résistant aux charges horizontales et verticales, le type de fondation et toit, etc.
- Le recueil d'informations de bâtiments ci-dessus est divisé en un nombre limité de typologies, qui représentent statistiquement l'ensemble du parc de logements. Chacune de ces typologies serait caractérisée par les matériaux de construction principaux, sa hauteur, sa géométrie, son année de construction, etc. Ce processus permettra également

d'établir les limites d'incertitude dans la définition de chaque typologie, ce qui sera utile lors de l'introduction de cette variabilité dans l'estimation de dommages de bâtiments. HAZUS (FEMA, 2003) et RISK-UE (Milutinovic et Trendafiloski, 2003) proposent des classifications de bâtiments qui peuvent servir comme première approximation au cas d'Haïti.

- Par la suite, et une fois définies de manière appropriée les différentes typologies, chacune d'elles sera associée à une fonction physique représentant sa vulnérabilité (un ensemble de courbes de capacité et de fragilité) qui représentera le comportement de la structure pour un degré déterminé de mouvement du sol, ce qui se traduit en la probabilité existante que dite structure atteigne un des niveaux de dommages définis (léger, modéré, important et plein).
- Finalement, on procèdera à diviser la région urbaine en différents groupes de recensement, districts ou unités minimales (géo-unités). Les informations recueillies seront groupées au niveau de la géo-unité, utilisant le barycentre comme point spatial de représentation.

3.5.4. Résultats:

Durant le mois de Juillet 2011, on a mené une campagne de reconnaissance de typologies de bâtiments dans la ville de Port-au-Prince, avec la coopération d'ingénieurs locaux de l'ONEV. Cette reconnaissance a permis une première classification des bâtiments en fonction de leur structure, matériaux principaux et utilisation. Par la suite, le Ministère des Travaux Publics, Transports et Communications (MTPTC) a fourni une base de données de bâtiments, compilée après le séisme de 2010, contenant des informations structurelles, le niveau de dommages, l'usage, etc., selon le questionnaire figurant à l'annexe 7.1.. La Table 3-4 montre le classement selon les typologies de bâtiments représentatifs du parc de logements (MBT) de la ville.

Table 3-4. Classement selon les typologies de construction du milieu urbain de Port-au-Prince (Haïti)

MBT	Matériaux		Nombre d'édifices	% dommages complets
	Structure	Murs		
RC-SW	Béton armé	Béton armé	1257	16%
RC-CB	Béton armé	Blocs de béton	63100	18%
RC-UM	Béton armé	Maçonnerie non armée	3273	21%
RL-BM	Maçonnerie armée	Blocs de béton	11998	23%
URM1	Maçonnerie confinée	Maçonnerie non armée	2766	22%
URM2	Ossature en bois	Maçonnerie non armée	2514	26%
W1	Ossature en bois	Bois	868	24%
ST-CB	Ossature en acier	Blocs de béton	508	22%

Les trois premières présentent une structure en béton armé et sont, par conséquent, les plus résistantes. Les deux suivantes ont une structure de maçonnerie, qu'on englobe sous la typologie RL-BM, qui représente la majorité de bâtiments de ce type. URM2 est un type de bâtiment, hérité de la colonie française, avec une structure en bois et des murs en maçonnerie non armée. Les deux dernières typologies de bâtiments (bâtiments à ossature en bois et en acier) ont été éliminées de l'étude, car ils représentent moins de 1% du parc de logements.

Pour chaque typologie de construction, on a sélectionné une courbe de capacité représentative de la performance sismique du bâtiment. La courbe de capacité permet d'exprimer la capacité de toute structure (bâtiment), ou élément de structure (un mur, une colonne, etc.), de résister aux forces sismiques de cisaillement (V_b) qui agissent sur elle, en fonction du déplacement horizontal (Δ) dans sa partie supérieure (Figure 3-27).

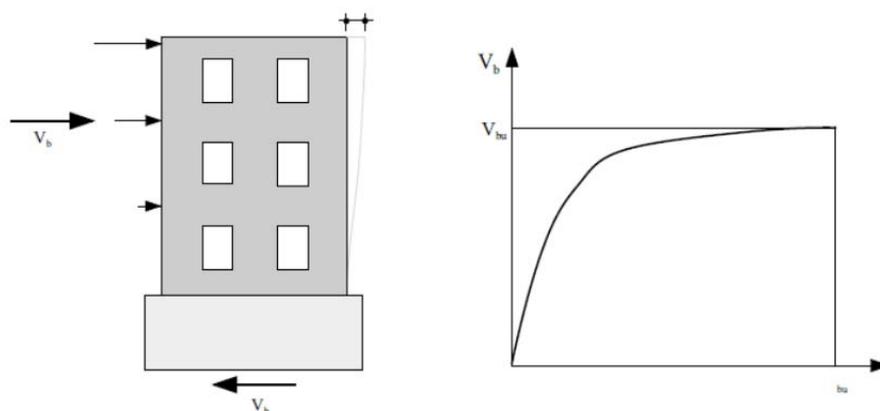


Figure 3-27. Schéma d'obtention de la courbe de capacité

Le Table 3-5 montre les différentes fonctions de dommage qui ont été attribuées au MBT, fondées uniquement sur la description de ces typologies, permettant de reproduire au mieux le comportement des bâtiments face aux séismes.

Table 3-5. Fonction de dommage assignée 'a priori' aux MBT en Port-au-Prince

MBT	Fonction de dommage (FD)
RC-SW	RC2 (Table 6, L&G, 2006).
RC-CB	RC1-(Table 6, L&G, 2006)
RC-UM	C3 - Precode (Table 5.7d, FEMA, 2003)
RL-BM	M7 (Table 5, L&G, 2006)
URM1	M6 (Table 5, L&G, 2006)
URM2	M5 (Table 5, L&G, 2006)

Ces fonctions de dommage sont issues des travaux de L&G (2006) et HAZUS (FEMA, 2003), qui ont réduit la diversité du parc de bâtiments en Europe et aux États-Unis, respectivement, à un ensemble de typologies représentatives. Grâce à des méthodes d'analyse structurale comme le montre la Figure 3-27, on a simulé de manière

analytique le comportement de ces typologies face au mouvement du sol.

Dans la Figure 3-28 on a représenté les spectres de capacité. Ils présentent deux sections: une première à forte pente, qui représente le comportement élastique de la structure sous l'action sismique, suivie d'une autre à pente douce, qui décrit son comportement lorsqu'il devient plastique. Le point de départ dans la phase plastique est appelé **limite d'élasticité** [*yield point* (D_y, A_y)], et correspond au déplacement spectral qui devrait se produire sur le bâtiment pour l'apparition des premiers dommages structurels. Le point du spectre qui correspond au plus grand déplacement spectral est appelé **point ultime** [*ultimate point* (D_u, A_u)]: lorsque le bâtiment atteint ce déplacement spectral, survient l'effondrement.

Comme on peut l'observer sur la Figure 3-28, les spectres des trois typologies les plus résistantes (RC2, RC1 et C3) indiquent qu'elles supportent de plus grands déplacements avant de commencer à subir des dommages, mais de plus petites accélérations, et sont plus ductiles.

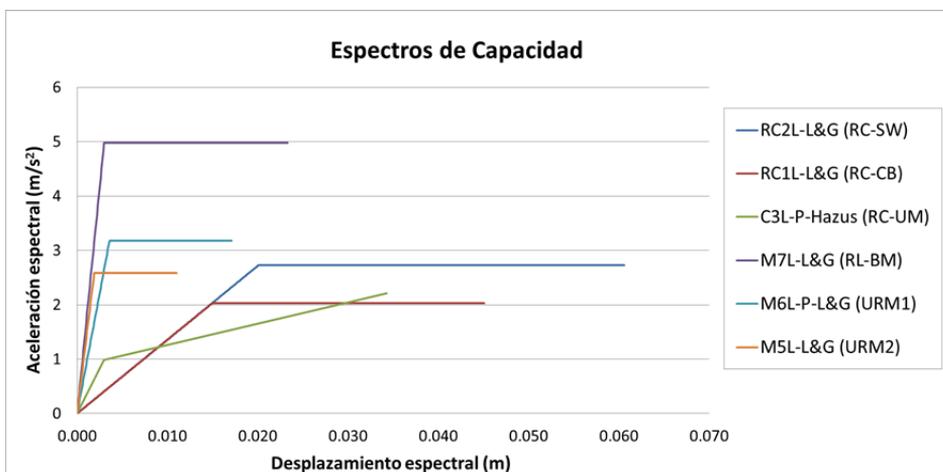


Figure 3-28. Spectres de capacité proposés pour six typologies de bâtiments de Port-au-Prince

Finalement, les constructions de la base de données sont représentées sur une carte par typologies et par districts (géo-unité), comme le montre la Figure 3-29.

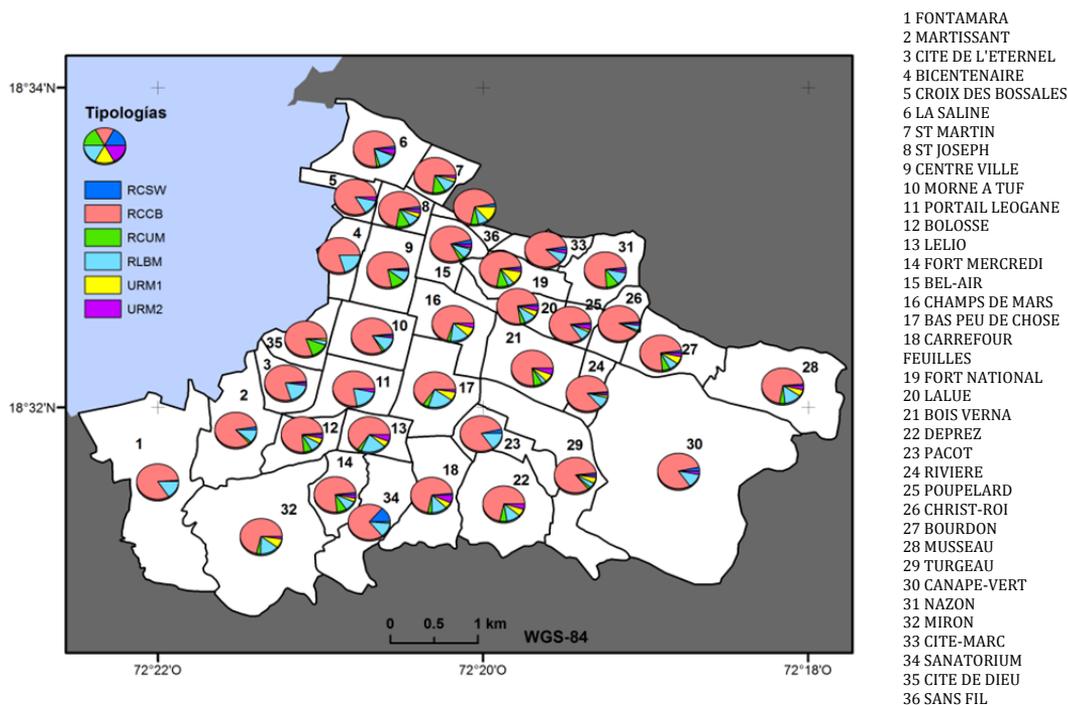


Figure 3-29 La ville de Port-au-Prince est divisée en 36 districts (géo-unités) selon les indications de CNIGS. On rassemble toutes les données pour chaque géo-unité, et les résultats sont géoréférencés au barycentre de la dite géo-unité. Sur la figure, il est possible d'observer le nom des géo-unités et la distribution des typologies les plus nombreuses.

3.6. Évaluation du risque sismique

3.6.1. Introduction

L'évaluation du risque sismique intègre la probabilité d'occurrence d'une série d'événements sismiques ou d'atteindre une valeur spécifique du mouvement du sol (aléa sismique), l'existence d'un parc de logements ainsi que d'une population donnée exposés à cet aléa, la probabilité d'occurrence de dommages sur ces bâtiments et cette population (représentée par la vulnérabilité), et le coût associé à la réparation/reconstruction des dommages et/ou l'impact social produit par le tremblement de terre.

L'aboutissement final de l'évaluation du risque sismique sera fournir aux autorités locales, et aux organisations d'intérêt, de cartes représentant les dommages espérés sur les constructions, la

répartition des pertes humaines et l'impact socioéconomique dans la région et /ou pays après du tremblement de terre.

De manière générale, les principaux objectifs d'une évaluation du risque sismique sont les suivants:

- Améliorer la prise de conscience du risque sismique, auquel nous sommes exposés, dans nos institutions et notre société.
- Promouvoir une meilleure construction de nos bâtiments, à travers de principes et conceptions parasismiques.
- Améliorer la capacité de réponse de nos institutions face à des situations d'urgence de nos sociétés.
- Améliorer l'accès à l'assurance des biens et des personnes, face au risque sismique.

3.6.2. Antécédents:

Dans la dernière année, il y a eu de nombreux travaux préliminaires mettant l'accent sur l'importance de prédire les dommages provoqués par des tremblements de terre, ainsi que l'impact qu'ils peuvent causer sur Haïti.

Rathje et al. (2011) indiquent que les zones les plus endommagées du centre-ville de Port-au-Prince sont situées sur des alluvions holocènes, avec des vitesses moyennes (V_s^{30}) de 350 m/s. Le reste de Port-au-Prince repose sur des matériaux plus anciens, avec des vitesses V_s plus élevées. Les dégâts se concentrent sur les pentes autour de Port-au-Prince. Ces foyers de dommage semblent apparaître par la combinaison d'une série de facteurs, dont l'amplification topographique, l'amplification par effets de site, et la rupture des talus à pentes raides, faiblement cimentés.

Booth et al. (2011) ont validé les dégâts, après le séisme en Haïti, comparant les données obtenues d'images aériennes verticales par pictométrie avec les observations de terrain, concluant que les techniques d'images et pictométrie ont tendance à sous-estimer les dommages réels.

Miyamoto et al. (2011) ont réalisé une évaluation des dégâts après le séisme en utilisant la méthode ATC-20 adaptée aux techniques de construction en Haïti.

Goodno et al. (2011) ont souligné l'importance d'améliorer les pratiques d'installation locale d'éléments non structuraux (notamment les équipements électriques) pour éviter les dommages.

Mix et al. (2011) ont dirigé une équipe d'enquête consacrée à la recherche des défaillances structurelles qui ont conduit aux dommages observés en Haïti ; ils conclurent que, dans de nombreux cas, ces ruptures sont dues à des colonnes de taille incorrecte ou incorrectement armées, des matériaux déficientes, des pratiques de construction inappropriées, et l'absence de considérations parasismiques dans la conception de la structure.

Hill et al. (2011) estiment le niveau de dommages sur les bâtiments et les impacts socio-économiques du tremblement de terre en Haïti.

Green et Miles (2011) font une description de l'impact social que le tremblement de terre d'Haïti provoqua sur le pays, qui a atteint un chiffre de 1,3 millions de personnes sans abri.

Ritchie et Tierney (2011) analysent les décisions et la planification des ONG en matière d'hébergement temporaire, à la suite du tremblement de terre en Haïti.

Il existe de nombreux outils de calcul d'aléa et de risque sismique, qui considèrent des codes sismiques, des codes de construction, et des paramètres, en vigueur dans chaque pays.

L'outil le plus utilisé, et est sans doute le plus connu, est HAZUS-MH (FEMA, 2003), qui fait recours aussi bien à des méthodes probabilistes qu'à des méthodes déterministes pour calculer le risque sismique aux États-Unis. Cet outil calcule, également, les dommages probables dus à des glissements de terrain, inondations et ouragans, et est intégré dans un système d'information géographique (SIG). Ses principales caractéristiques sont les suivantes:

- Calcul de dommages physiques (structurels et non structurels), de pertes économiques, de pertes humaines, et d'impact socio-économique.

- Logiciel gratuit, mais le code source n'est pas libre.
- Lié au logiciel d'ESRI appelé ArcGIS, dont la licence n'est pas libre.
- Conçu pour être utilisé aux États-Unis, ce qui rend difficile son application sur d'autres environnements, d'autres pays ou d'autres réalités.

Actuellement, il existe un autre outil informatique, avec un grand potentiel d'application à niveau mondial, appelé SELENA (SEismic Loss Estimation using a logic tree Aproach, Molina and Lindholm, 2007, Molina et al. 2010), qui calcule le risque sismique pour un site spécifique en utilisant des méthodes déterministes, probabilistes, et en temps réel. Cette méthode est unique dans le sens que l'on peut quantifier les incertitudes épistémiques à travers une méthodologie d'arbre logique, pouvant introduire de différentes valeurs d'atténuation, de magnitude, des courbes de capacité, des courbes de fragilité, et d'autres paramètres définis à volonté par l'utilisateur, ainsi que leurs poids ou probabilités correspondants. SELENA a été développé à partir de la méthodologie de base de HAZUS-M; cependant, il peut être considéré comme un logiciel indépendant de HAZUS. SELENA est conçu pour s'exécuter en langage scientifique MATLAB, même si actuellement il existe également des versions exécutables en C++ et en OCTAVE. Cet outil est celui qui s'adapte le mieux aux conditions, aux règles et aux réalités de régions où l'on veut réaliser une évaluation du risque sismique.

3.6.3. Objectifs et Méthodologie:

L'objectif du calcul du risque sismique est de connaître le scénario de pertes qui pourrait survenir à Port-au-Prince si, dans le futur, un tremblement de terre s'originait dans une faille proche. En fonction du résultat, il faudrait élaborer des mesures préventives et des plans d'urgence pour atténuer les effets négatifs de ces événements.

L'évaluation de risques nécessite de deux inputs: l'aléa sismique ou mouvement attendu selon un scénario défini (tremblement de terre d'une certaine magnitude et emplacement), et les éléments exposés à cet aléa (classification du parc de logements dans différentes typologies de construction et leur vulnérabilité). La vulnérabilité de ces typologies est décrite par des fonctions de dommage: spectres de

capacité et courbes de fragilité. Le risque serait amoindri si l'on parvenait à réduire la vulnérabilité des constructions.

L'aléa sismique est donné en termes de mouvement fort du sol. Pour cela on dispose de lois d'atténuation (aussi appelées modèles de mouvement fort ou GMPE, sigles en anglais de *Ground Motion Prediction Equations*) qui fournissent la valeur du paramètre de mouvement du sol en fonction de la magnitude du tremblement de terre et de la distance source-emplacement. Les modèles d'atténuation actuels qui s'adaptent le mieux à la zone d'étude sont: Abrahamson et Silva (2008), Boore et Atkinson (2008), Campbell et Bozorgnia (2008) ainsi que Chiou et Youngs (2008). Ces modèles requièrent la valeur de la vitesse de cisaillement dans les 30 premiers mètres de la croûte (V_S^{30}) pour étudier l'effet local de la géologie (amplification du mouvement du sol). Ces valeurs sont tirées de Cox et al. (2011), puis confrontées aux données prises par le groupe de travail lors de la campagne de terrain menée en Juillet 2011 (section 3.4). On a utilisé trois valeurs de V_S^{30} dans chaque calcul du mouvement du sol, dénommés comme suit:

- Sol 1: quand on a introduit dans le GMPE la valeur moyenne de V_S^{30}
- Sol 2: quand on a introduit dans le GMPE la valeur moyenne de $V_S^{30} - \sigma$
- Sol 3: quand on a introduit dans le GMPE la valeur moyenne de $V_S^{30} + \sigma$

Le classement du parc de logements en différentes typologies de bâtiments a été expliqué dans la section 3.5.

Ce modèle de calcul proposé (comprenant les quatre modèles de mouvement fort, les trois modèles de type de sol, et l'ensemble de fonctions de dommage) est calibré sur les données de dommage du tremblement de terre de 2010. Pour ce faire, nous avons simulé sur SELENA (Molina et al. 2010) le séisme de 2010 et comparé les dégâts estimés avec ceux observés. Dans un premier temps nous avons obtenu les GMPE les plus appropriés pour le calcul (Boore et Atkinson (2008) ainsi que Chiou et Youngs (2008)), et les valeurs de V_S^{30} correspondent à celles des sols 1 et 3. Dans une deuxième étape, les

paramètres des fonctions de dommage ont été ajustés dans un processus itératif, pour réduire les résidus de pourcentage jusqu'en dessous de 5%. Les paramètres des fonctions de dommage ajustés sont présentés sur la Table 3-6. Les spectres de capacité calibrés sont confrontés aux spectres proposés 'a priori', sur la Figure 3-30.

Table 3-6. Paramètres des fonctions de dommage calibrés dans cette étude

MBT	Dy (m)	Ay (m/s ²)	Du (m)	Au (m/s ²)
RC-SW-L	0.025	1.570	0.090	1.570
RC-SW-M	0.037	0.937	0.135	0.937
RC-CB-L	0.013	1.800	0.047	1.800
RC-CB-M	0.019	1.080	0.071	1.080
RC-UM-L	0.006	2.107	0.033	2.107
RC-UM-M	0.009	1.264	0.050	1.264
RL-BM-L	0.005	1.800	0.017	1.800
RL-BM-M	0.011	1.422	0.025	1.422
URM1-L	0.004	2.478	0.018	2.478
URM1-M	0.009	1.958	0.028	1.958
URM2-L	0.002	1.900	0.010	1.900
URM2-M	0.006	1.501	0.0156	1.501

Ce résultat sera d'une grande utilité pour calculer des scénarios de risque pour des futurs séismes à Port-au-Prince. En ce sens, avec le modèle calibré, on a simulé un scénario sismique déterministe correspondant à un éventuel tremblement de terre à l'épicentre proche de Port-au-Prince, et on a calculé les dommages structuraux qui se produiraient. Le tremblement de terre simulé est présenté dans le Table 3-7 et dans la Figure 3-32.

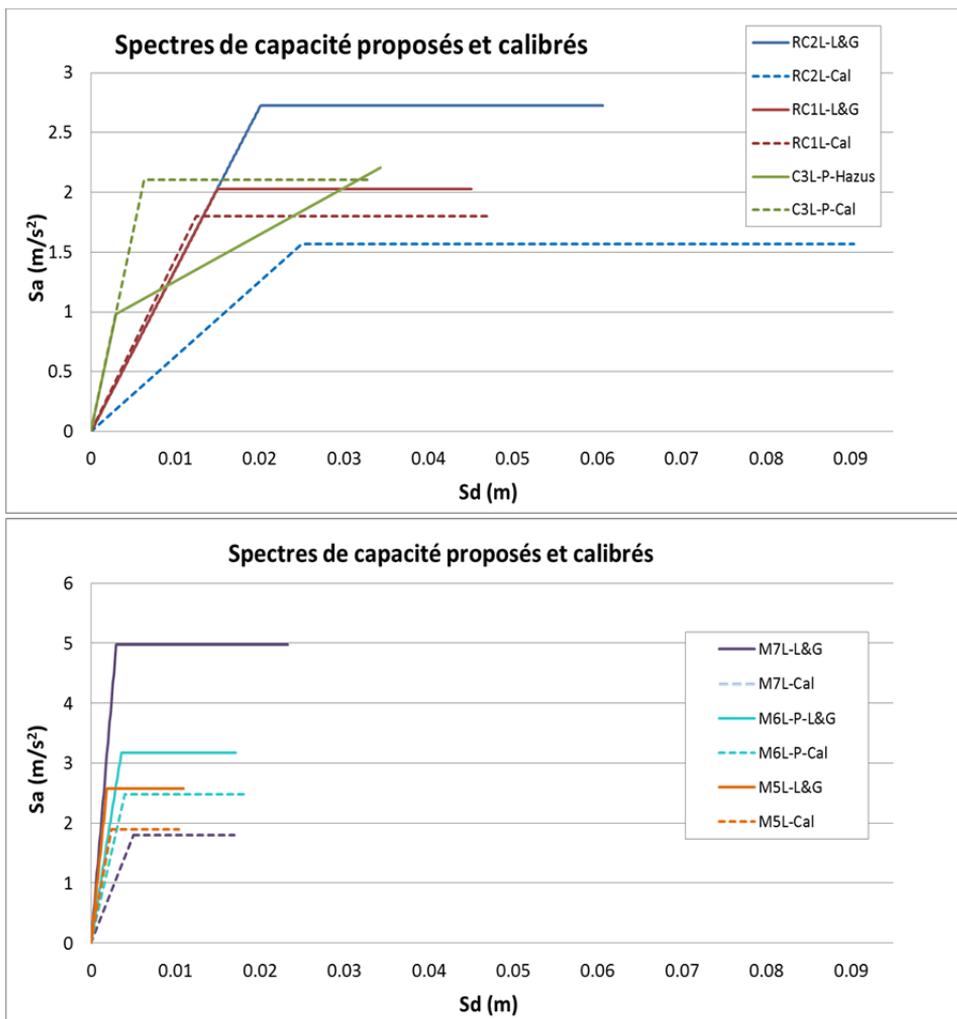


Figure 3-30. Spectres de capacité proposés (lignes continues) et calibrés (lignes discontinues)

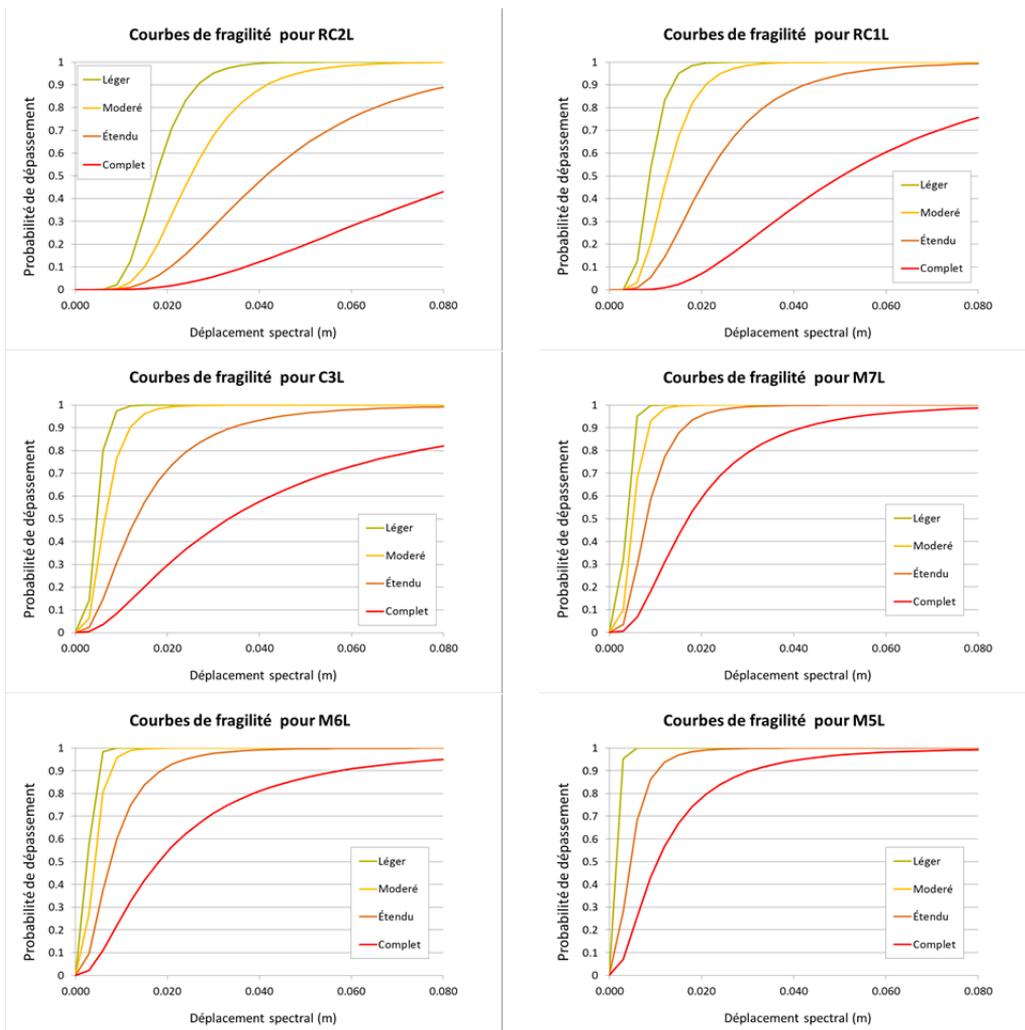


Figure 3-31. Courbes de fragilité calibrées

Table 3-7. Paramètres du scénario sismique défini pour cette étude

Nom	Position		Mw	Profondeur	Mécanisme		
	Longitude	Latitude			Azimut	Buz.	Deloc.
Matheux-Neiba	-71.952	18.623	7.0	10 km	291°	55° N	90°

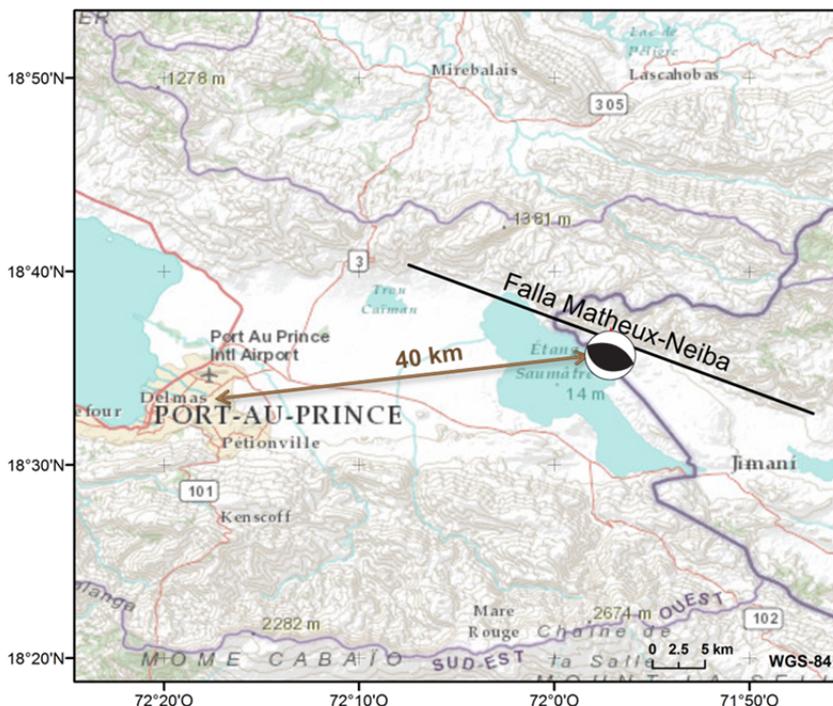


Figure 3-32. Scénario sismique simulé dans cette étude

3.6.4. Résultats

Un résumé des résultats est présenté dans la Table 3-8, qui montre la moyenne \pm l'écart-type du nombre de bâtiments supposés atteindre chaque niveau de dommage, et le pourcentage, sur le total des bâtiments, de la typologie correspondante (sur la Figure 3-33 on représente ces pourcentages). En outre, les résultats les plus intéressants sont également représentés sur des cartes afin de faciliter leur lecture (section 4.4).

Table 3-8. Résumé des dommages du scénario. Matheux-Neiba: nombre de bâtiments de chaque typologie supposés atteindre chaque niveau de dommage.

TYPOLOGIE							
Dommage	RC-SW	RC-CB	RC-UM	RL-BM	URM1	URM2	TOTAL
Nul	359±27 (41%)	14.582±907 (34%)	740±26 (38%)	1.897±114 (26%)	682±21 (39%)	494±23 (33%)	18.754
Léger	206±4 (24%)	10.613±84 (24%)	291±3 (15%)	1.697±32 (23%)	289±4 (17%)	276±10 (18%)	13.372
Modéré	108±9 (12%)	6.111±150 (14%)	273±8 (14%)	899±13 (12%)	225±7 (13%)	208±4 (14%)	7.824
Important	85±13 (10%)	4.825±220 (11%)	170±6 (9%)	912±28 (13%)	158±6 (9%)	155±8 (10%)	6.305
Complet	116±19 (13%)	7.282±610 (17%)	469±21 (24%)	1.817±107 (25%)	386±23 (22%)	367±23 (25%)	10.437

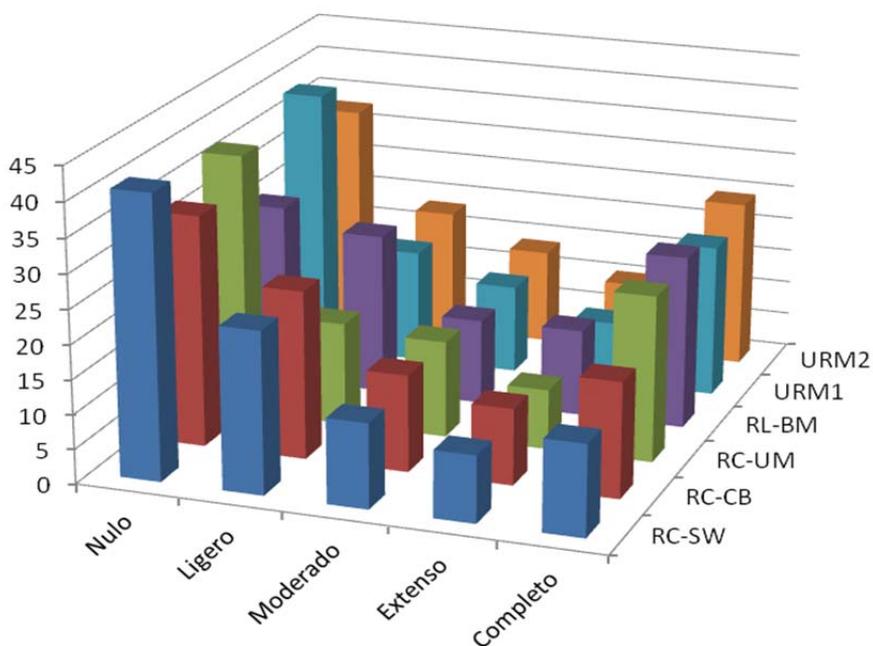


Figure 3-33. Graphique de pourcentages de dommage

En analysant le Table 3-8 (et la Figure 3-33) on peut comparer le comportement de différentes typologies. On observe que la RC-SW est celle qui répond le mieux, suivie de près par la plus représentative, la RC-CB. La même tendance a été observée lors du tremblement de terre de 2010, mais avec des taux de dommage un peu plus élevés parce que l'épicentre était plus proche. Toutes les autres typologies subissent des dommages importants, en particulier des effondrements oscillant autour de 20-25%. La RL-BM et la URM2 sont les moins résistantes (comme on l'a vu déjà en 2010).

En général, compte tenu du scénario Matheux-Neiba, toutes les typologies suivent un schéma similaire: la fréquence du niveau de dégât *nul* est la plus grande, puis elle diminue jusqu'à *important*, et remonte brusquement pour le niveau d'effondrement *complet* (Figure 3-33).

Quant aux cartes, leur principale contribution est de permettre la vue spatiale des dommages. La Figure 4-15 montre la répartition de dommages sur la typologie prédominante (celle qui représente près de 75% des bâtiments de la ville), et on peut observer que le plus grand nombre de dégâts importants et complets se produisent sur les géo-unités de la zone portuaire et du centre-ville, où l'on s'attend aux plus grandes amplifications locales à cause de la géologie. Ces résultats excluent l'effet topographique, de sorte que les dommages obtenus sur des zones montagneuses pourraient avoir été sous-estimés.

La Figure 4-16 montre le dommage moyen, ce qui donne une idée générale de l'ampleur des dégâts. Le maximum est 2, soit un dommage modéré.

Les Figure 4-17 et Figure 4-18 montrent les bâtiments qu'on s'attend qu'ils deviennent inhabitables, et les valeurs varient entre 30% et 50%. En outre, on a représenté les systèmes de santé et d'urgence, et, comme on peut le voir, ils sont situés dans des quartiers où les amplifications locales sont attendues par effet géologique. Par conséquent, ces structures devraient être renforcées pour résister aux grands chocs et se maintenir opérationnelles après un séisme.

3.6.5. Conclusions

- Se référant aux dommages causés par le tremblement de terre de 2010, l'explication de la catastrophe se trouve, principalement, dans la **mauvaise qualité des constructions en Haïti**.

- On a réalisé une étude de **l'effet local** possible, et identifié les districts de la ville où convergent de graves dommages. Ces zones sont considérées de haut risque et ont été signalées pour être prises en compte lors de la définition des plans d'urbanisme de reconstruction.

- Nous avons étudié le parc de logements de Port-au-Prince. Cela a permis d'identifier les bâtiments les plus caractéristiques de la ville afin d'élaborer la classification de typologies. Le résultat de cette phase a été une description des six typologies identifiées, accompagnée de photographies, et les spectres de capacité et courbes de fragilité.

-Le **modèle de calcul de risque sismique proposé** pour Port-au-Prince (extrapolable à d'autres villes de caractéristiques de construction et géotechniques similaires) issu de cette étude est le suivant:

- Modèles de mouvement fort du sol: Boore et Atkinson (2008) et Chiou et Youngs (2008)
- Valeur de V_S^{30} : la moyenne, et la moyenne + l'écart-type, extrait de Cox et al (2011).
- Typologies (Table 3-4):
 - RC-SW
 - RC-CB
 - RC-UM
 - RL-BM
 - URM1
 - URM2
 - W1 et ST-CB: on a besoin de davantage de données pour pouvoir réaliser une calibration fiable.

- **Vulnérabilité:** les fonctions de dommage calibrées, dont les paramètres sont présentés dans la Table 3-6.

En appliquant le modèle de calcul calibré, nous avons estimé le risque sismique dans la ville de Port-au-Prince simulant le scénario Neiba-Matheux (tremblement de terre de surface de Mw 7.0, à 40km au nord-est de la ville). Le parc actuel de bâtiments présente une **grande vulnérabilité**, de sorte que ledit scénario, ou un autre similaire, affecterait de manière significative la ville, donnant lieu à des dommages importants sur le 30% à 50% des bâtiments, qui deviendraient en conséquence **inhabitables**.

Cette estimation de dommage suppose un seuil inférieur à ce qui se passerait dans la réalité, car elle **sous-estime les dommages** dans les zones montagneuses, du fait que les modèles de mouvement fort utilisés dans cette étude ne tiennent pas compte de l'effet topographique.

Si on ne travaille pas dans le renforcement des structures et la reconstruction des villes touchées, en suivant des normes parasismiques et un plan d'aménagement du territoire, de façon à réduire la grande vulnérabilité des bâtiments en Haïti, le risque de séisme reste élevé et la catastrophe peut se reproduire à l'avenir.

3.7. Mesures d'atténuation du risque sismique existant

Le tremblement de terre de Janvier 2010 a révélé le grave problème que supposent les catastrophes naturelles pour Haïti, ce qui s'explique principalement par:

- La persistance de la vulnérabilité, à la fois structurelle et sociale.
- L'absence d'une culture de la prévention.
- L'existence d'un personnel qui agit en cas de catastrophe et principalement dans les situations d'urgence, caractérisé par une formation insuffisante, et du manque d'engagement et de motivation ; d'ailleurs, il ne pratique aucune gestion de risque.

- La faible résilience existante, due à la pauvreté, à l'exclusion économique, sociale et culturelle, à la position géographique et à la perspective socio-culturelle.
- L'existence d'une mentalité pour laquelle les risques de désastres sont compétence exclusive des institutions de l'état, et, en conséquence, la population ne s'y implique qu'à la suite d'un désastre, lorsqu'elle en subit les conséquences.

Par ailleurs, les résultats obtenus dans cette étude montrent qu'en Haïti l'accent devrait être mis sur la gestion de risques, la promotion d'une culture de la prévention, de l'éducation et de la communication sur les risques. Cette gestion du risque doit être comprise comme un processus planifié, concerté et global, orienté vers la prévention et la réduction de risques, et au développement de la capacité de réponse. On doit inculquer une culture de la prévention à la population d'Haïti, de manière à ce qu'elle s'intègre et fasse enfin partie de la perception, la pensée, l'action sociale et le savoir local, et à ce qu'elle soit liée à la notion de développement durable. C'est uniquement en étant perçue comme formant partie de la culture locale qu'elle sera acceptée et intégrée, en aboutissant au succès des mesures de prévention qui sont proposées ci-dessous.

Enfin, afin que des mesures préventives puissent être mises en œuvre avec succès, il faut d'abord commencer par éduquer la société, aussi bien les enfants comme les adultes. L'éducation aide à comprendre les relations entre l'être humain et l'environnement. Elle permet de prendre conscience des différents scénarios de risque qui peuvent surgir, des menaces et des vulnérabilités existantes. L'éducation permet aussi d'apprendre à adopter des décisions collectives ainsi que des mesures de sécurité et de protection. Mais pour que le message soit reçu et diffusé, il faut savoir communiquer correctement ; il faut mettre en place un procédé interactif d'échange d'informations et d'opinions collectif, de façon à réduire l'anxiété et partager des informations sur des risques ignorés.

Avec tout cela, on réussira à faire participer l'ensemble de la population à l'identification de risques, la recherche, la planification et la gestion en général, résultant ainsi une plus grande résilience et réduisant la grande vulnérabilité qui existe actuellement.

Le tremblement de terre en Haïti a été l'occasion de démontrer que la prévention des situations d'urgence et des catastrophes sera toujours une priorité. Ce fait sert à souligner que des pays comme Haïti sont exposés à des menaces à la fois d'origine naturelle et anthropique. Et que, même quand ils disposent de personnel pour les cas de catastrophe, celui-ci est principalement engagé dans les interventions d'urgence, incapable de travailler spécifiquement sur la gestion de risques. À cela il faut ajouter un aspect important de la réduction de risques, qui est la formation et l'engagement des ressources humaines à tous les niveaux.

La gestion des risques est un processus planifié, concerté, participatif et global qui est orienté à la prévention et réduction de risques, et au développement de la capacité de réponse face aux catastrophes [ressource en ligne 1]. Ainsi, elle priorise des stratégies liées à l'éducation, la santé, le logement et la sécurité alimentaire, tout en favorisant l'accès et l'utilisation de l'information et des connaissances nécessaires de la part de la population et des autorités locales. Elle impulse la planification et la gestion locale participative, alliant des stratégies de développement à la réduction de risques. En dirigeant ce type d'actions vers l'investissement dans la prévention, on contribue à améliorer les conditions des gens les plus pauvres et plus vulnérables, tout en diminuant les pertes de vies humaines.

Ainsi, les capacités des personnes et des institutions sont considérées essentielles pour réduire les facteurs de risque, et il est donc nécessaire de les renforcer. Ceci implique donc la participation de tous dans l'identification des risques, la recherche, la planification et la gestion en général.

Par conséquent, la culture de la prévention de risques doit transcender l'action purement informative et institutionnelle, afin de devenir une ressource promotrice d'un nouveau sentiment, pensée, action sociale, ainsi qu'un moyen de parvenir à un développement durable. Ce changement de paradigme exige de processus pédagogiques, participatifs et contextualisés dans de différents scénarios de risque, qui mettent en valeur les connaissances locales, renforcent les capacités communautaires, et impulsent la création de partenariats entre les différents acteurs impliqués.

L'enseignement de la gestion des risques est nécessaire pour promouvoir une culture de la prévention, ainsi que pour renforcer la connaissance des facteurs et des causes de risques auxquels sont exposées les communautés. Mais le développement de cette culture de prévention repose sur le changement d'attitude chez les gens. La pauvreté, l'exclusion économique, sociale et culturelle, la position géographique et la perspective socio-culturelle des différents peuples sont des causes profondes du développement humain limité, qui agissent sur la vulnérabilité et l'insuffisante résilience aux catastrophes.

Par conséquent, la réduction du risque de catastrophes doit se centrer sur la capacitation de la société à faire face aux menaces, en insistant sur la nécessité de réduire la vulnérabilité de la population et d'accroître sa capacité de gestion.

En lignes générales, la population tend à considérer que les risques de catastrophes sont une question qui doit être résolue par les institutions publiques ; elle ne se sent concernée que lorsqu'elle en est victime. De ce fait, la communauté a bien peu de connaissances sur tous ces aspects relatifs au risque, et, même en cas contraire, elle n'exprime nullement l'intérêt nécessaire [ressource en ligne 1].

C'est pourquoi les hommes et les femmes devraient participer plus activement à la prise de décisions relatives à la gestion de risques, ce qui conduirait à un renforcement du système local. Cela implique, avant tout, d'avoir accès à l'information sur les risques de catastrophes, et d'être conscients des capacités et des droits des individus et des institutions.

L'implication des citoyens dans la réduction des vulnérabilités passe par la création de conditions culturelles et de participation politique capables de convertir l'habitat en patrimoine social et politique, préservé et constamment ravivé par tous les citoyens.

Un moyen de développer la gestion de catastrophes est de fournir à chaque habitant les capacités de se préparer soi-même, à travers d'activités communautaires. Pour ce faire, on peut organiser des ateliers de sensibilisation, élaborer des manuels, construire des systèmes d'alerte précoce, promouvoir l'éducation pour la gestion et

la préparation face aux catastrophes, ou impliquer les citoyens de manière efficace et participative dans la planification territoriale.

L'éducation est la stratégie principale, et la plus efficace, dans la protection et le développement de la résilience face aux risques. Elle doit être orientée vers la promotion d'une culture de la sécurité et de la résilience [ressource en ligne 2]. Cela nécessite du développement de stratégies éducatives qui contribuent à:

- Une meilleure compréhension de la relation entre les êtres humains et leur environnement, et comment cette interaction construit différents scénarios de risque.
- La connaissance des menaces et des conditions de vulnérabilité.
- La prise de décisions collectives afin de mettre en œuvre les mesures de sécurité et de protection.
- L'élaboration de plans scolaires, familiaux et communautaires de sécurité ou d'urgence.

Pour développer ces stratégies, des ressources financières devraient être allouées à la mise en œuvre de programmes pédagogiques formels, non formels, et communautaires sur la gestion de risques, ainsi que pour l'élaboration et la diffusion de matériel de prévention nécessaire pour sensibiliser sur l'autoprotection. Les mesures d'autoprotection sont des mesures simples, qui peuvent être prises par la population elle-même, et sont un complément indispensable aux mesures prises par les institutions dans le plan de gestion de risques. En cas d'urgence, la connaissance de quelques règles d'autoprotection aide à prendre des décisions qui peuvent être profitables, à la fois, à la sécurité de chaque individu et à celle des autres.

Il ne faut pas oublier que l'éducation en matière de gestion de risques a un caractère complexe et systémique ; ce n'est pas un sujet dont il faut uniquement débattre, mais une dimension de la vie quotidienne qui exige la formation complète de l'être humain. Il faut promouvoir des valeurs éthiques telles que la solidarité, la coopération, le respect des personnes et de l'environnement, afin de conscientiser la

population face aux conséquences de l'action humaine et de son interaction avec l'environnement, car la vulnérabilité croît avec la population et la pollution.

Considérant que les enfants et les jeunes constituent la base du développement d'une société, ils doivent être impliqués dès le début, avec les enseignants, dans le processus pédagogique mentionné. Cela devrait également conduire à la diffusion de l'information à l'intérieur des foyers, par le biais des enfants, puis de là à l'ensemble de la communauté.

Ainsi, il est normal que les thèmes de la gestion de risques s'insèrent et s'appliquent comme axes transversaux au programme d'enseignement du pays, du niveau de formation générale de base, passant par le moyen, jusqu'au niveau supérieur. En outre, au moment de la mise en œuvre de programmes d'autoprotection dans les écoles, des programmes similaires devraient être réalisés dans les lieux de travail et de loisir, y compris des exercices de simulation. Cela contribuerait de manière importante à l'amélioration de la sécurité des citoyens et au développement d'une culture de la prévention.

Pour mener à bien cette éducation sur le risque, il existe diverses pratiques de communication, dont on propose de réaliser les suivantes:

- Émissions radio, CD de musique et des vidéos traitant les questions de la prévention des catastrophes et des mesures d'autoprotection.
- Document sur les Technologies pour la prévention.
- Document sur la perception du risque du point de vue des communautés autochtones
- Matériels et jeux éducatifs.
- Défilés et parades avec des affiches contenant des messages didactiques relatifs à la préparation et à la prévention, avec également des haut-parleurs pour transmettre ces messages oralement.

- Entretiens et conférences avec démonstrations de mesures de protection personnelles.
- Réalisation de vidéos qui seront utilisées dans des activités de formation et / ou de sensibilisation.

De plus, on doit considérer différentes stratégies afin de développer l'éducation de gestion de risques, telles que celles énumérées ci-dessous [ressource en ligne 2]:

- Contextualisation et régionalisation de la pédagogie dans la gestion de risques. Il faut aussi considérer la diversité des aspects linguistiques et culturels des différentes populations, lors de l'élaboration des matériels didactiques et du développement d'exercices pratiques (dans le cas d'Haïti, ces langues sont le français et le créole).
- L'institutionnalisation de l'éducation dans la gestion de risques.
- Renforcement des capacités des acteurs pédagogiques et sociaux.
- La recherche dans la pédagogie en gestion de risques.
- Renforcer la coordination intersectorielle et multisectorielle.
- Promotion de la participation communautaire, des questions de droits, de genre, intra et interculturelles.
- Communication pour le changement social.

Mais, il ne faut pas oublier que la mise en marche de tous types de programmes d'éducation et de participation communautaire, doit, avant tout, favoriser la formation et la spécialisation des ressources humaines. On devrait organiser une formation commune à tous les professionnels de la prévention et de l'intervention en cas d'urgence, ainsi que la réalisation d'exercices de simulation conjoints, qui facilitent la coopération et l'aide mutuelle.

Par ailleurs, au niveau pédagogique, les universités devraient également être impliquées, dans ce cas, dans l'approche scientifique et technique des divers aspects de la gestion du risque.

Pour accomplir cette tâche pédagogique avec succès, il est important de savoir transmettre l'information relative au risque. La communication des risques est un processus interactif d'échange d'informations et d'opinions entre individus, groupes et institutions. Il s'agit d'un dialogue dans lequel plusieurs messages sont discutés.

Ainsi, les processus de communication doivent toujours viser les objectifs suivants [ressource en ligne 2]:

- Assouvir les inquiétudes et les préoccupations de la population, donc réduire l'anxiété, informer le public pour qu'il se prépare et participe à sa minimisation et prévention.
- Informer la population de risques inconnus, afin de favoriser une perception selon ses besoins de protection sanitaire. Cela contribue à obtenir la collaboration de la population en danger, afin de rendre plus efficace et plus rapide l'intervention, ou la réponse, des autorités.

Pour cela, on devrait prendre en compte les 7 règles de communication de risques proposées dans le document [ressource en ligne 3]:

- Accepter le public comme agent collaborateur.
- Écouter le public.
- Être honnête et flexible dans l'écoute des opinions.
- Coordonner et collaborer avec d'autres organismes / groupes de crédibilité.
- Répondre aux besoins des médias.
- Parler clairement et avec empathie.
- Planifier soigneusement et évaluer les actions.

Nous ne devons pas oublier combien important est l'aménagement du territoire et l'occupation du sol de manière planifiée et adaptée aux prévisions décrites sur les cartes de risque. La planification ou l'aménagement du territoire est un élément qui contribue considérablement au développement durable. Il peut aider à atténuer les catastrophes, et réduire le risque, en décourageant la prolifération de bidonvilles et la construction d'installations stratégiques dans les zones menacées, y comprises les considérations relatives aux voies de service pour le transport, l'énergie, l'eau, les eaux usées et les installations et services vitaux [ressource en ligne 4].

Le processus d'aménagement du territoire permet l'incorporation de critères de réduction du risque, en précisant des conditions viables et sûres d'usage et occupation, en harmonie avec les objectifs environnementaux, sociaux et économiques de la collectivité locale concernée. Par conséquent, l'analyse du risque se présente comme l'un des principaux intrants que les responsables municipaux doivent inclure dans la définition des plans de développement territorial. L'anticipation des conséquences négatives que les phénomènes naturels peuvent avoir sur les établissements humains ou les éléments d'infrastructure locaux, permet de définir les zones du territoire où l'occupation et l'exploitation se font en conditions de sûreté. L'inclusion de ces analyses dans les processus d'aménagement du territoire entraîne la protection et l'amélioration de la qualité de vie des habitants, ainsi que la protection économique, environnementale, sociale et politique commune. [Principaux éléments de l'analyse des risques, Ressources en ligne 5].

Pour ce faire, on ne doit pas arrêter de perfectionner les mécanismes de participation communautaire efficace dans les plans d'aménagement du territoire. Il faut toujours accorder une attention prioritaire aux infrastructures essentielles, car ces secteurs, lorsqu'ils sont gravement touchés par des catastrophes, augmentent la vulnérabilité.

En ce sens, on doit s'inculquer un nouveau concept de construction qui puisse porter le peuple haïtien à changer ses habitudes de construction traditionnelles, mal adaptées à la sismicité de la région, par d'autres plus sismorésistantes. Il faut aussi lui enseigner que ces nouvelles pratiques de construction ne nécessitent que quelques

changements sur la construction traditionnelle qui, dans la plupart des cas, n'implique aucun investissement de capital supplémentaire dans la construction de leurs maisons.

Quelques pratiques de construction appropriées, à enseigner et à diffuser au sein de la population haïtienne, sont ([ressource en ligne 6]; Blondet, 2005):

- Concernant le renforcement de logements:
 - Insérer des écrous de serrage en fer pour fortifier les murs.
 - Réparer ou renforcer les toits.
 - Réparer et renforcer les appuis.
 - Renforcer les murs.
 - Renforcer les fondations.
- Concernant la construction de maisons sismorésistantes:
 - Il est préférable de construire des maisons régulières en plan et en élévation.
 - Ne pas mélanger des matériaux ayant des caractéristiques différentes (par exemple, des briques et des blocs).
 - Ne pas construire dans des zones géologiquement instables.
 - Compter sur les conseils et les recommandations d'un ingénieur spécialisé en structures.

4. RÉSULTATS

Les résultats obtenus dans les successives étapes de travail sont présentées dans cette section.

On obtient, à partir de l'étude morphotectonique, une carte de failles quaternaires actives de l'Île d'Hispaniola (Figure 4.1).

L'étude de microzonation aboutit à l'obtention d'une carte de distribution de la V_s^{30} à Port-au-Prince, dont les valeurs oscillent entre 278 et 577, et qui met en valeur les sols les plus mous et, donc, une plus grande amplification dans ces zones où la vitesse est moindre. La Figure 4.2 présente cette carte, sur laquelle on peut observer que les amplifications les plus importantes se produisent dans la partie ouest de la ville.

L'étude de l'aléa sismique conclut avec des cartes d'accélération maximale du sol (PGA) attendue pour des périodes de retour de 475, 975 et 2475 ans, correspondantes à des probabilités de dépassement du 10%, du 5% et du 2%, sur 50 ans, respectivement. On montre ces cartes de la Figure 4-3 à la Figure 4-14.

Représentant les résultats d'aléa sismique, on expose des cartes de dommage attendu dans la topologie dominante, de moyennes de dommages, de nombre de constructions inhabitables, et de services d'urgence, de la Figure 4-15 à la Figure 4-18.

Toutes les cartes produites ont été intégrées dans un SIG. Finalement, on a créé un outil web pour exploiter et diffuser tous les résultats, qui peut être facilement utilisé par de non-experts. Ceci est expliqué dans la section 4.5.

4.1. Carte morphotectonique de failles actives quaternaires de l'Île d'Hispaniola

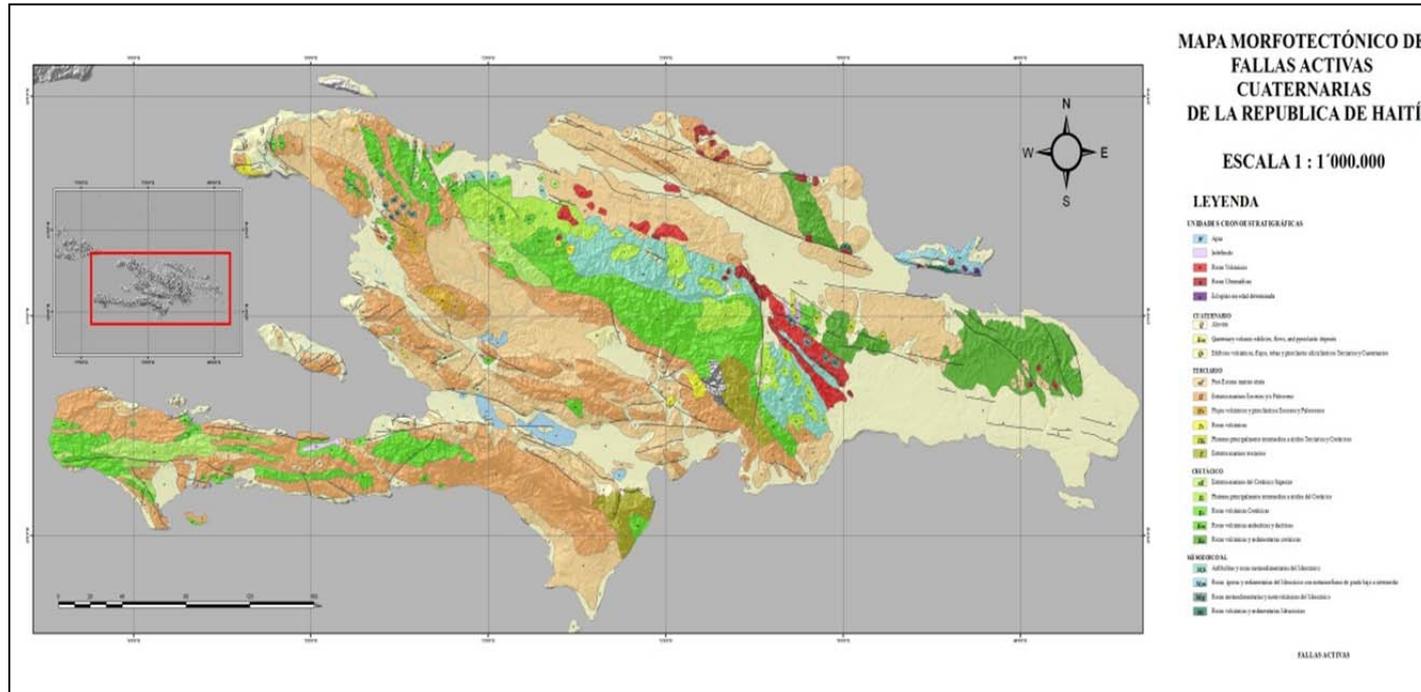


Figure 4-1. Carte morphotectonique de failles actives quaternaires de l'Île d'Hispaniola, à l'échelle 1:1.000.000

4.2. Carte de microzonation sismique de Port-au-Prince

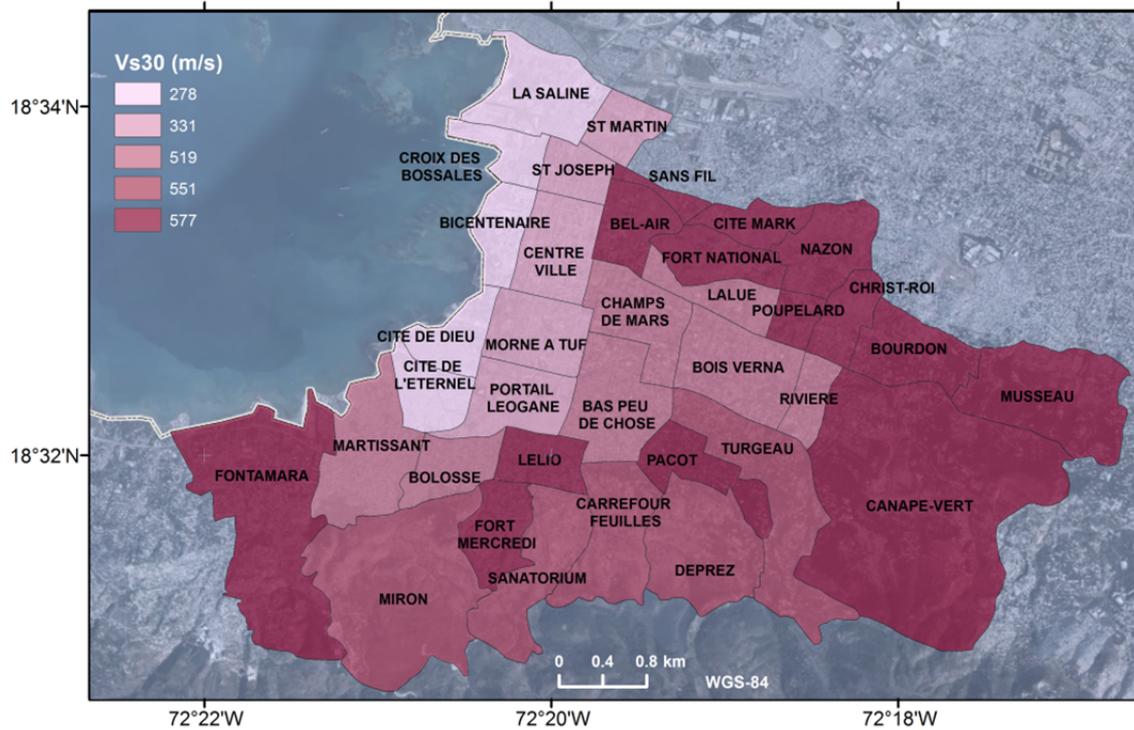


Figure 4-2. Distribution de valeurs de V_{s30} dans la ville de Port-au-Prince

4.3. Cartes de l'aléa sismique en termes de PGA et SA (T) et plusieurs PR



Figure 4-3. Carte de l'aléa sismique en termes de PGA pour PR de 475 ans



Figure 4-4. Carte de l'aléa sismique en termes de PGA pour PR de 975 ans



Figure 4-5 Carte de l'aléa sismique en termes de PGA pour PR de 2475 ans



Figure 4-6. Carte de l'aléa sismique en termes de SA (0.1s) pour PR de 475 ans

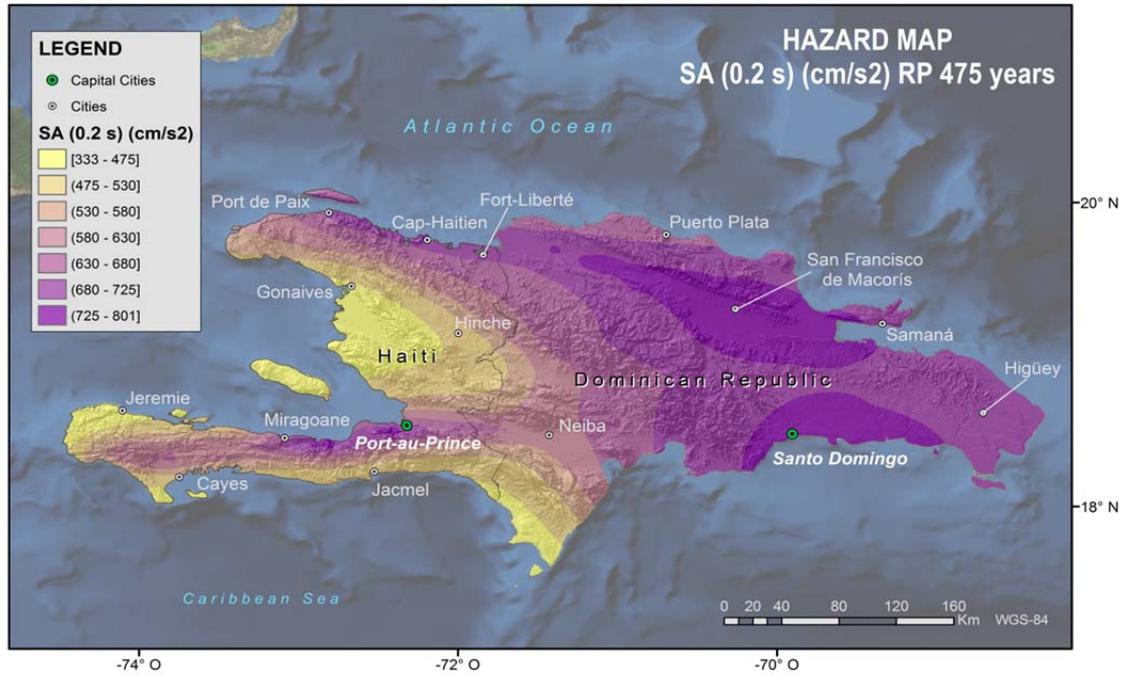


Figure 4-7. Carte de l'aléa sismique en termes de SA (0.2s) pour PR de 475 ans



Figure 4-8. Carte de l'aléa sismique en termes de SA (0.5s) pour PR de 475 ans



Figure 4-9. Carte de l'aléa sismique en termes de SA (1s) pour PR de 475 ans



Figure 4-10. Carte de l'aléa sismique en termes de SA (2s) pour PR de 475 ans

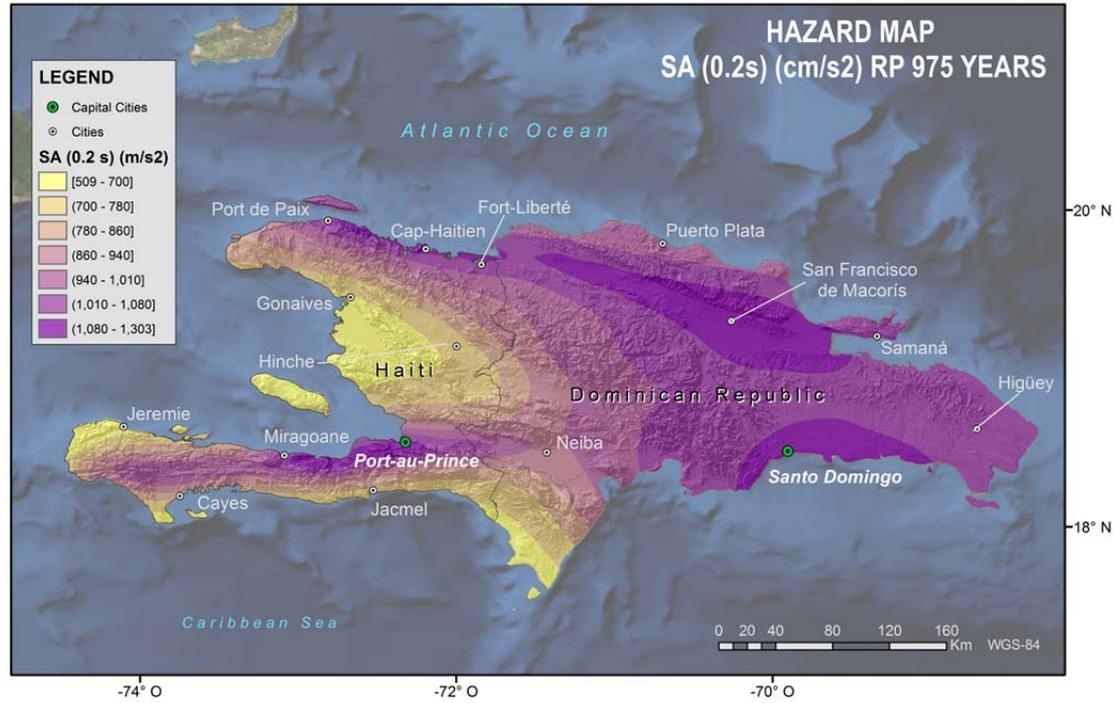


Figure 4-11. Carte de l'aléa sismique en termes de SA (0.2s) pour PR de 975 ans

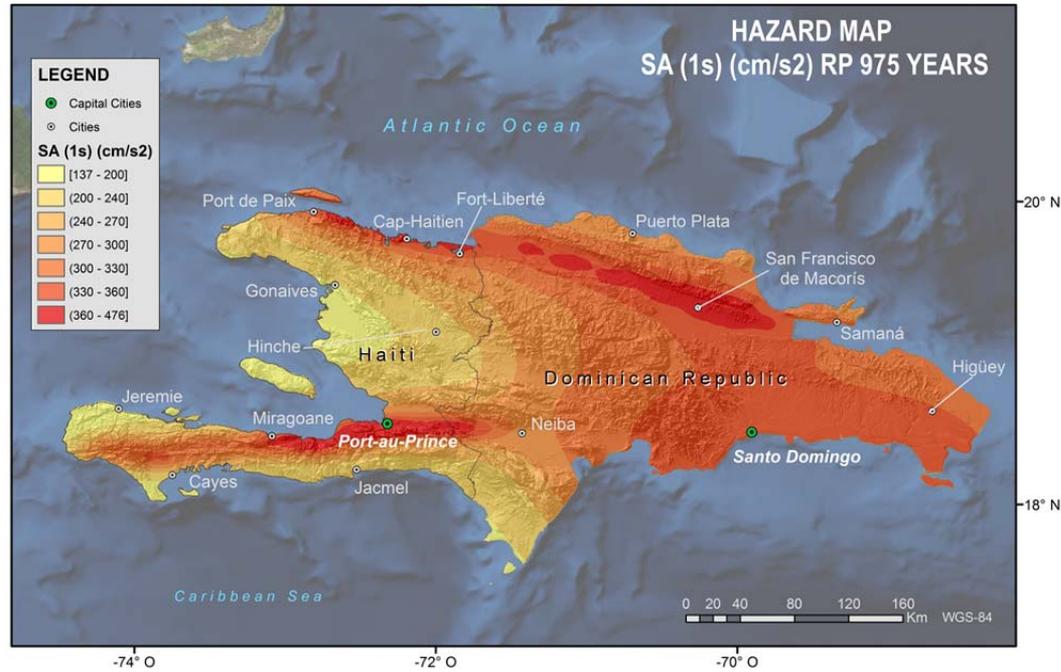


Figure 4-12. Carte de l'aléa sismique en termes de SA (1s) pour PR de 975 ans

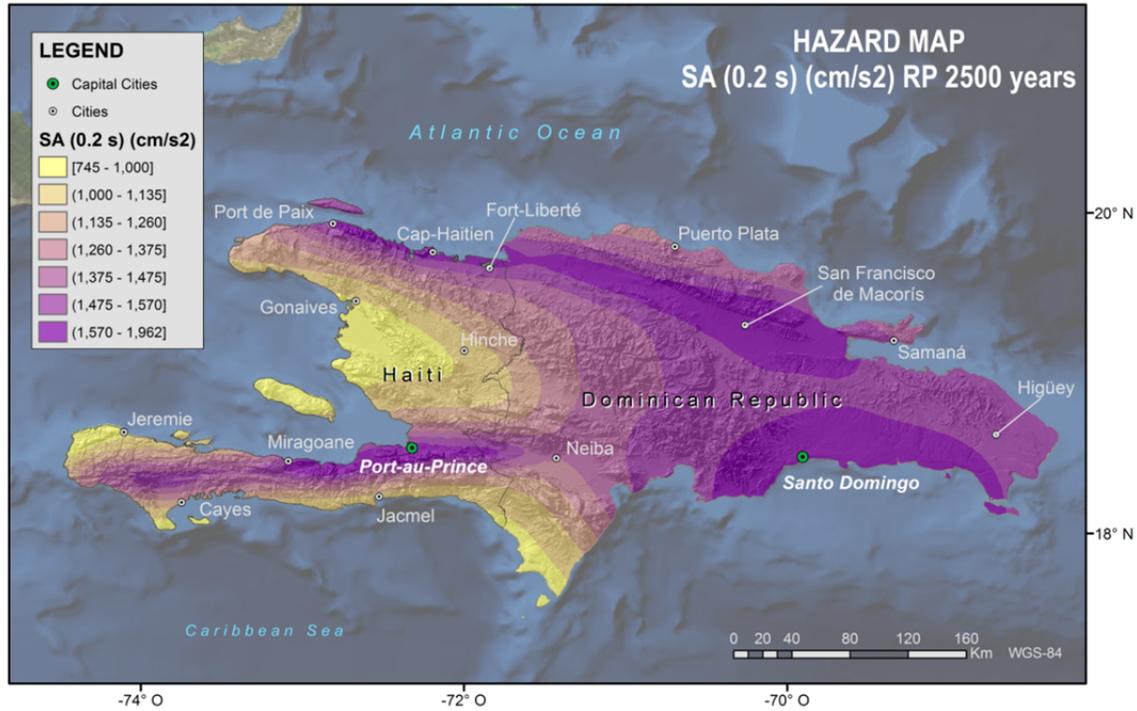


Figure 4-13. Carte de l'aléa sismique en termes de SA (0.2s) pour PR de 2475 ans

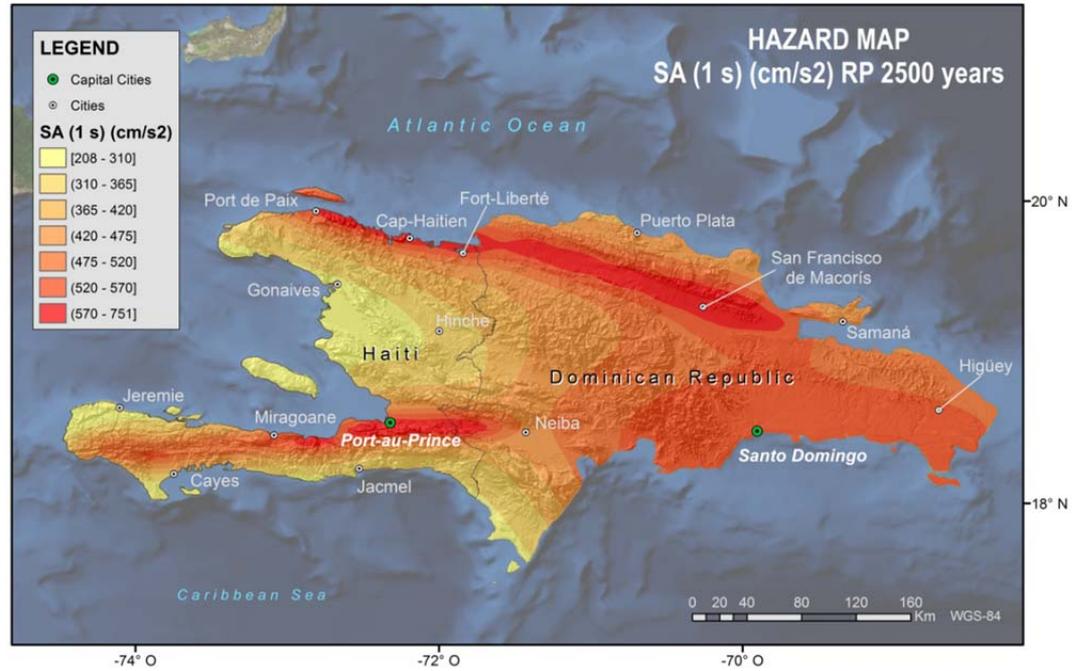


Figure 4-14. Carte de l'aléa sismique en termes de SA (1s) pour PR de 2475 ans

4.4. Cartes de risque sismique de Port-au-Prince

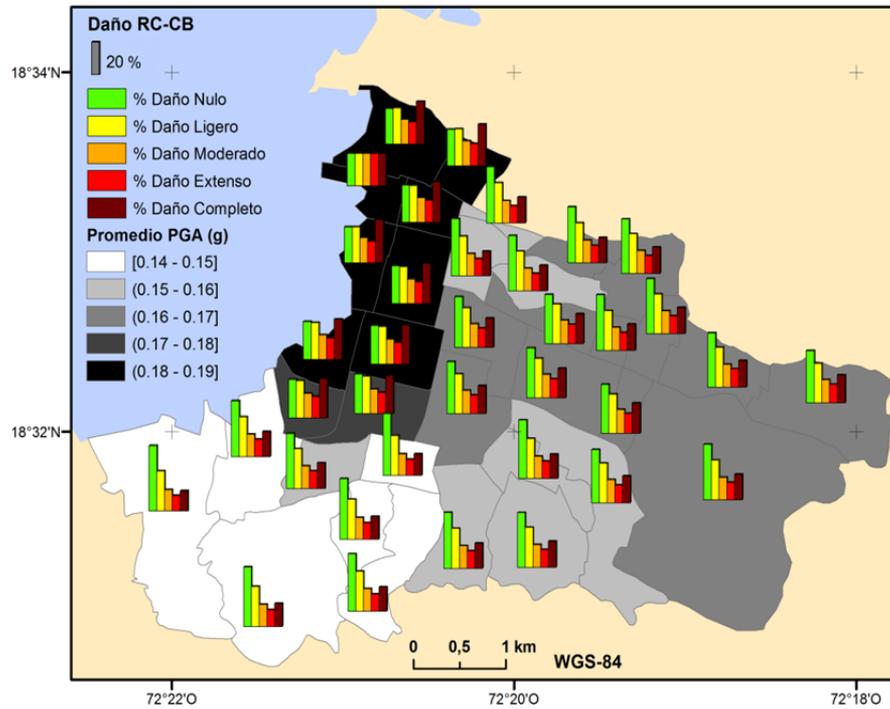


Figure 4-15. Carte de dommages prévus pour la typologie RC-CB

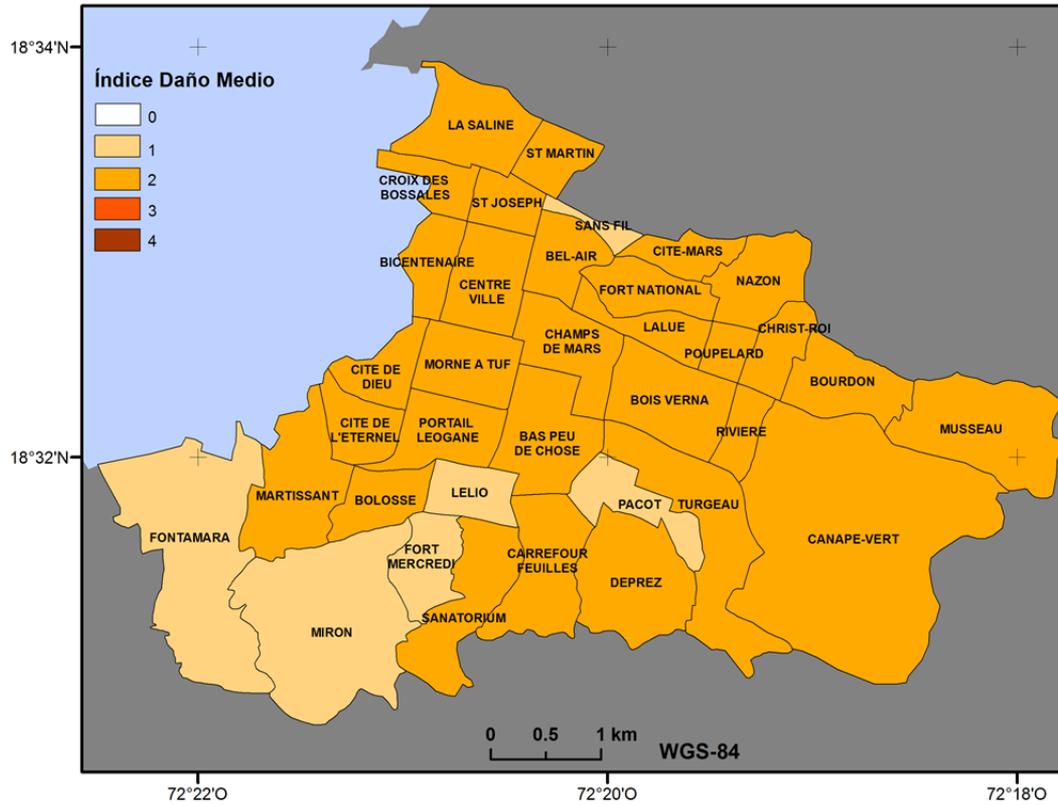


Figure 4-16. Carte du taux moyen de dégâts

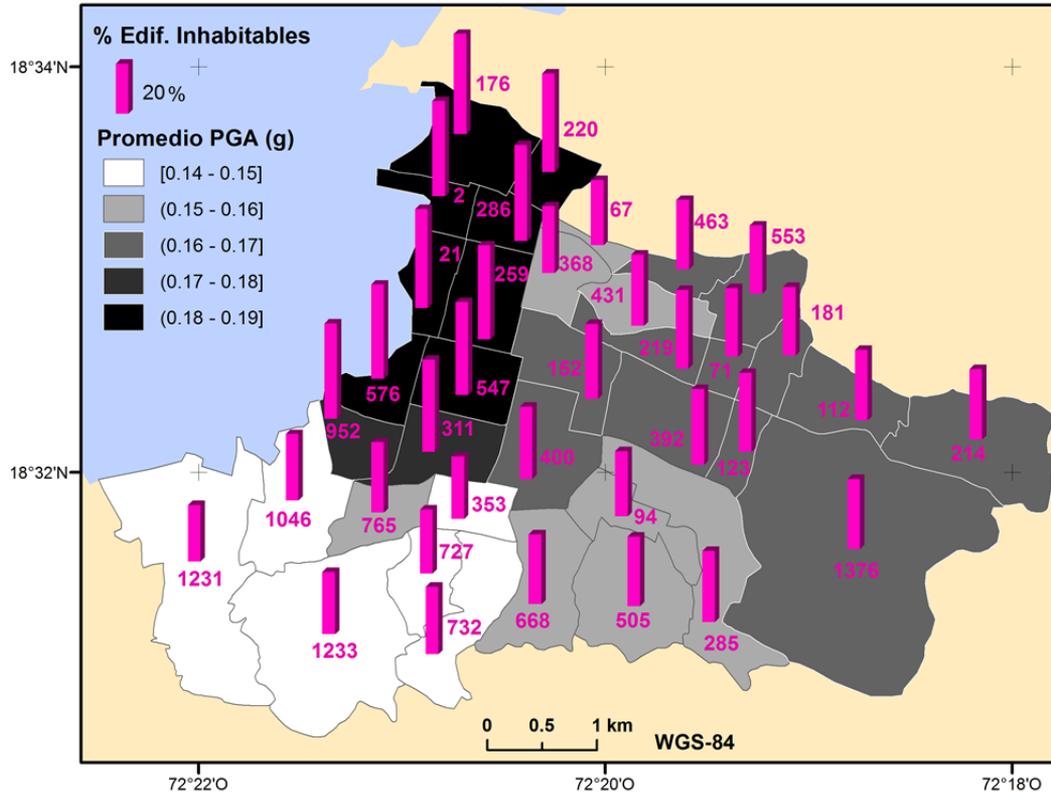


Figure 4-17. Nombre de bâtiments inhabitables

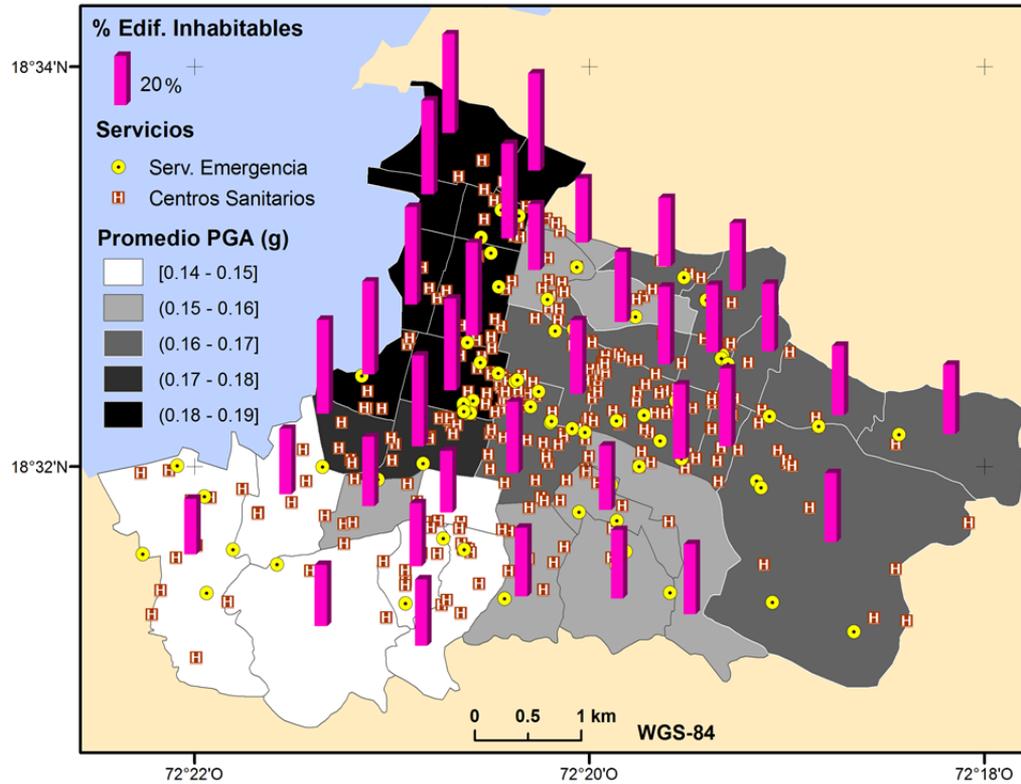


Figure 4-18. Localisation des services d'urgence et des centres de santé par rapport aux dommages

4.5. Outil Web

Dans le but de diffuser et exploiter les résultats du projet, on a développé un outil web dirigé aux utilisateurs non-experts en systèmes d'information géographique (SIG).

Pour cet outil web, on a implémenté toute l'information contenue dans le SIG du projet, ainsi que les cartes précédentes d'aléa sismique, exprimées en termes de PGA pour des périodes de retour de 475, 975 et 2475 ans. Dans de prochaines phases, on inclura les résultats de risque sismique de Port-au-Prince.

Grâce à cet outil, on peut visualiser par internet toute l'information géographique, ainsi que consulter les données alphanumériques associées. Un outil spécifique a été créé pour l'exploitation du catalogue sismique, sur lequel on peut faire des recherches suivant des critères d'intervalle de temps ou de magnitude.

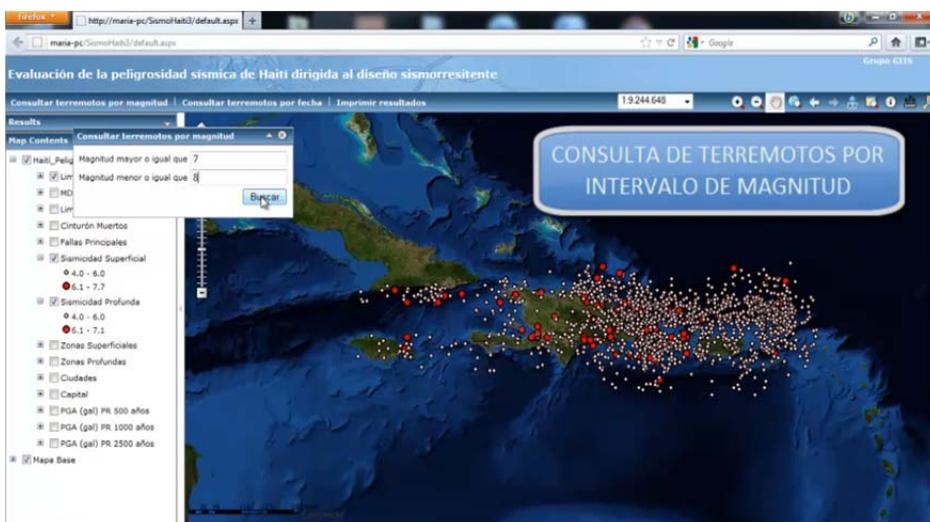


Figure 4-19 Recherche par intervalle de magnitude

Un autre aspect remarquable est la possibilité de consulter les valeurs d'accélération (PGA) sur n'importe quel point du territoire pour une période de retour donnée.

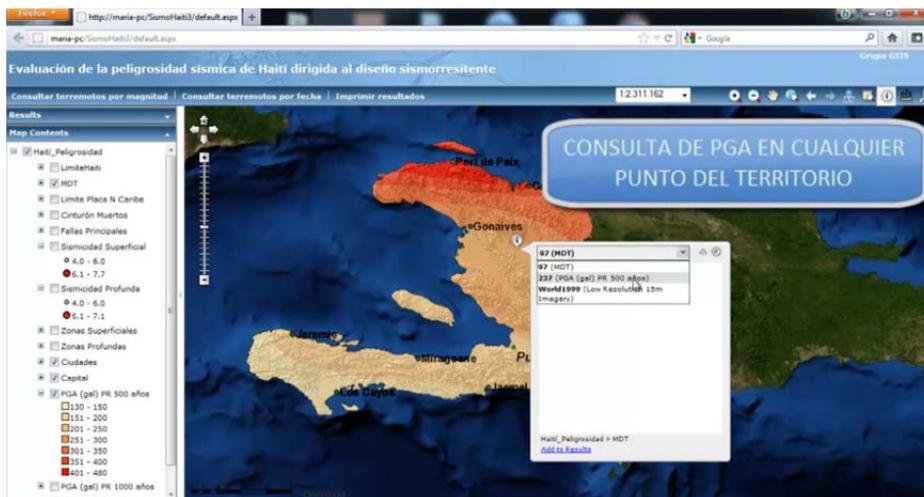


Figura 4-20 Recherche de PGA sur un point concret du territoire, pour une période de retour de 475 ans.

Cet outil web est un projet qui est encore en procès d'implémentation, afin d'y assurer l'accès par internet depuis tout point du globe.

Suivant l'avancement du projet, on introduira de nouveaux résultats et informations d'intérêt, de manière à ce que l'ensemble du SIG puisse être consulté et exploité par internet, à l'aide d'outils spécifiques, sans avoir à installer de logiciel et en absence de connaissances d'expert.

5. DIFFUSION DES RÉSULTATS

5.1. Publiés

5.1.1. 10^{ème} Congrès TopCart, Madrid, Octobre 2012

Ce congrès de Géomatique a eu lieu du 16 au 19 Octobre 2012 à Madrid. On a présenté le SIG du Sismo-Haiti comme outil d'aide pour cette étude, en particulier dans la phase de calibration du modèle de calcul.

Aplicaciones SIG en riesgos naturales: Cálculo del riesgo sísmico de Puerto Príncipe (Haiti). Y. Torres, S. Molina, B. Benito.

5.1.2. 33^{ème} Assemblée Générale de la Commission Sismologique Européenne (Aout 2012)

La conférence a eu lieu du 19-24 Août 2012, à Moscou. Deux travaux ont été présentés:

- L'étude de l'aléa sismique avec toutes ses phases et des cartes d'aléa obtenues comme résultat:

An evaluation of seismic hazard in La Hispaniola, after the 2010 Haiti earthquake. B. Benito, D. Belizaire, Y. Torres, J.J. Martinez-Diaz, V. Huérfano, E. Polanco, R. Garcia, P. Crende, A.R. Serna, F. Zevallos.

- Le processus de calibration du modèle de calcul du risque sismique détaillé et son utilité pour des applications futures:

Using 2010 Haiti earthquake data for calibration of future seismic risk scenarios in Port-au-Prince (Haiti). S. Molina, Y. Torres, M. Navarro, B. Benito, J. Moise, E. Erduran

5.1.3. Assemblée Hispano-Portugaise de Géodésie et Géophysique (Juin 2012)

Cette assemblée a eu lieu du 25 au 29 Juin 2012 à San Sébastian. Une présentation qui décrit le nouveau calcul du risque avec le modèle calibré:

Estimación del riesgo sísmico en Puerto Príncipe (Haití) como base para la elaboración de planes de emergencia. Y. Torres, S. Molina, M. Navarro, B. Benito, D. Belizaire

5.1.4. Rencontre d'Automne de l'Union Géophysique Américaine (Déc. 2011)

Du 5 au 9 Décembre 2011 a eu lieu à San Francisco (États-Unis) le congrès de l'Union Géophysique Américaine où on a présenté l'étude du risque sismique à Port-au-Prince qui a été réalisé dans ce projet. Le travail a été présenté sous forme d'affiche, dirigée par le Dr Sergio Molina, qui aura également à coordonner la rédaction de l'article relatif à ce travail dans les prochains mois.

Seismic risk scenarios in Port-au-Prince (Haiti). A tool for reconstruction and emergency planning. S. Molina, Y. Torres, J. Moise, B. Benito

5.1.5. 4^e Congrès National du Génie Parasismique (Mai 2011)

Du 18 au 20 mai 2011 s'est tenu à Granada le 4^e congrès national de génie parasismique (4CNIS), où l'on a fait une présentation et organisé une table ronde.

La table ronde a été organisée et dirigée par Belén Benito, chercheur principal du projet SISMO-HAÏTI et directeur du groupe GIIS, et se composait des membres suivants: M. Dwinel Belizaire (directeur de l'ONEV), le Dr. Jose Jésus Martinez-Diaz (coordinateur du Groupe de Recherche de Géodynamique UCM), le Dr. Miguel de las Doblas (chercheur au Centre Supérieur de Recherche Scientifique) et l'Arc. Sandra Martinez Cuevas (membre du groupe GIIS). Il y a eu une grande affluence de public, compte tenu de l'intérêt que le sujet de la coopération pour la reconstruction d'Haïti a suscité dans la

communauté scientifique. Après l'intervention de chacun des composants, qui ont expliqué l'état d'avancement de leurs activités au sein du projet, on a ouvert une série de questions de la part du public concerné qui, en plus de s'informer, partagèrent leurs expériences et fournirent des conseils et des recommandations. En conséquence, on a identifié de nouveaux domaines de coopération qui pourraient être pris en compte dans des projets futurs.

La présentation est intitulée «SISMO-HAITI: Projet de coopération pour le calcul de l'aléa sismique et du risque sismique en Haïti» et les auteurs sont Y. Torres, B. Benito, D. Belizaire et le Groupe de Travail du projet SISMO-HAITI. On a présenté les avancements du projet, jusqu'à ce jour, à travers des diverses activités prévues: la collecte d'information et la création de la base de données et du système d'information géographique d'appui à l'étude, l'analyse de la tectonique active régionale, l'élaboration du catalogue sismique, l'étude des effets sismo-géologiques découlant du tremblement de terre de Janvier 2010, l'étude de viabilité des profils sismiques dans la faille Enriquillo, le microzonage et la quantification de l'effet de site, et l'analyse préliminaire des dommages causés par le séisme de 2010.

5.2. [Projet de Fin de Carrière et Travaux de Fin de Master](#)

5.2.1. [Projet de Fin de Carrière: Projet d'évaluation de l'aléa sismique en Haïti \(Raúl García\)](#)

Raul Garcia Martinez, un étudiant de Génie de Géodésie et de Cartographie, a défendu son Projet de Fin de Carrière en Juillet 2011, dont l'objectif principal était de développer, dans le détail, la planification nécessaire pour procéder à une évaluation de l'aléa sismique en Haïti.

Pour ce faire, la région a été étudiée en profondeur, on a analysé les variables qui constituent les inputs du calcul de l'aléa sismique et on a proposé une méthodologie de calcul basée sur une analyse de l'état des connaissances dans les projets qui ont été développés jusqu'à ce jour, dans cette thématique et à une échelle similaire.

5.2.2. Projet de Fin de Carrière: L'évaluation de l'aléa sismique en Haïti dirigée vers la conception parasismique (Ana Rita Serna)

En Février 2012, l'étudiante en Génie de Géodésie et de Cartographie, Ana Rita Serna, a défendu son Projet de Fin de Carrière (PFC) de l'E.T.S.I Topographie, Géodésie et Cartographie de l'Université Polytechnique de Madrid (UPM). L'objectif du PFC était de réaliser la phase de calcul de l'aléa sismique en Haïti s'inscrivant dans le projet SISMO-HAITI. Les résultats de cette phase seront dirigés à établir des critères de conception parasismique qu'on appliquera dans la reconstruction du pays.

Les cartes d'aléa sismique ont été préparées pour des périodes de retour de 475, 975 et 2475 ans en termes de PGA SA(T) pour des périodes de 0.1, 0.2, 0.5, 1 et 2 secondes. En outre, on a calculé des courbes d'aléa sismique et des spectres d'aléa sismique uniforme pour la capitale, Port-au-Prince, et pour Cap Haïtien.

5.2.3. Projet de Fin de Master: Estimation du risque sismique à Port-au-Prince, Haïti (Yolanda Torres)

En Juillet 2012, l'étudiante en Génie de Géodésie et de Cartographie, Yolanda Torres, a défendu son Projet de Fin de Master (PFM) de l'E.T.S.I Topographie, Géodésie et Cartographie de l'UPM. L'objectif de la PFM était d'estimer le risque sismique à Port-au-Prince avec un modèle de calcul calibré à partir des leçons tirées du séisme de Janvier 2010. Les résultats de cette étude peuvent être fournis aux institutions compétentes d'Haïti pour être utilisés dans la reconstruction et la définition de plans d'urgence face au risque sismique à Port-au-Prince.

5.2.4. Projet de Fin de Master: Recommandations dirigées à la réglementation parasismique d'Haïti

En septembre de 2012, l'étudiant en Master de Génie Parasismique: Dynamique des Sols et Structures, Gaspard Pierristal, a défendu son Projet de Fin de Master (PFM) d'E.T.S.I. Industrielles de l'UPM. G. Pierristal est diplômé en Génie Civil à la Faculté des Sciences de

l'Université d'État d'Haïti et a étudié ce master en Espagne via une bourse octroyée par l'UPM. Dans son PFM, il formule des recommandations visant à établir une réglementation parasismique en Haïti. En utilisant les résultats du calcul de l'aléa sismique d'Haïti obtenus dans des travaux antérieurs, inscrits dans le cadre du projet Sismo-Haiti, et en comparant différentes normes parasismiques, il a fait une étude du spectre de réponse à proposer pour le pays. Ensuite, en comparant les classifications des sols et des types de bâtiments avec leurs coefficients, il propose des classifications correspondantes pour Haïti. Enfin, il propose une méthodologie pour le calcul de forces, dont certains paramètres sont déduits des comparaisons entre différentes normes.

5.3. Plan de publication

5.3.1. *Article: Evaluation du risque sismique à Port-au-Prince (Sergio Molina et al.)*

On a l'intention d'écrire un article pour son éventuelle publication dans une revue internationale indexée, dans lequel on analysera les dommages du séisme en Haïti ainsi que les informations sur les typologies de bâtiments à Port-au-Prince, définissant ainsi la vulnérabilité des constructions en Haïti. On inclura également la calibration du comportement des bâtiments face aux tremblements de terre et on définira des scénarios de risque sismique dans le milieu urbain, en analysant la sensibilité aux paramètres de la source sismique, les relations d'atténuation, etc.

5.3.2. *Article: Estimation de l'aléa sismique de l'île d'Hispaniola (Belén Benito et al)*

On prévoit de publier un article dans les prochains mois sur le calcul de l'aléa sismique mené dans ce projet qui compile la méthodologie suivie, les données générées (carte de zones sismogénétiques, catalogue sismique, etc.), la gestion des données et des résultats obtenus, ainsi que leur analyse et les conclusions correspondantes. On

inclura également les principes proposés pour l'élaboration de la première réglementation parasismique du pays.

5.3.3. Thèse de Doctorat: Réduction de la Vulnérabilité à Port-au-Prince. Solutions urbanistiques et constructives (Sandra Martínez-Cuevas)

Avec toutes les données recueillies dans le projet *Évaluation de l'aléa et du risque sismique en Haïti dirigée vers la conception parasismique*, cette thèse va enquêter sur la réduction de la vulnérabilité à Port-au-Prince et les solutions urbanistiques et constructives possibles.

Cette recherche a deux modes de travail. L'un consiste en la collecte et l'analyse des données, et l'autre se base davantage sur des propositions.

L'objectif principal de la thèse est de faciliter et de fournir les outils nécessaires à la population de Port-au-Prince pour reconstruire leur ville, en tenant en compte la vulnérabilité actuelle, après le tremblement de terre du 12 Janvier 2010.

La principale motivation qui a mené à formuler cette thèse est la volonté de pallier des problèmes qui se produisent avec une certaine fréquence dans le domaine de la vulnérabilité et de la coopération au développement:

- Établissements sans aménagements urbains antérieurs, qui manquent d'un système local d'infrastructures d'évacuation urbaine en cas de catastrophe.
- Situation du bâtiment sur un terrain vulnérable.
- Provision d'édificiations non appropriables par les affectés, ou qui reposent sur des technologies non appropriables.

Cette thèse vise à atteindre les résultats suivants: courbe calibrée d'intensité par rapport au pourcentage de dommage à Port-au-Prince, manuel de classification des différents facteurs de vulnérabilité de Port-au-Prince (sismogéologie, microzonage, dommage ...) et un glossaire de solutions urbanistiques et constructives pour Port-au-Prince.

5.3.4. *Effets sismogéologiques dérivés du séisme de Janvier 2010 (Miguel de las Doblas Lavigne)*

Miguel de Doblas Lavigne, chercheur à l'Institut de Géosciences de Madrid (Centre mixte du CSIC et de l'UCM), prépare un article scientifique avec quelques-uns des résultats de ses recherches sur ce sujet, pour l'envoyer à la revue *Natural Hazards*. En outre, en fonction de la disponibilité du Département des Publications de l'UPM, il est entrain de préparer un volume monographique sur les déformations géologiques causées par le séisme et les risques potentiels qui y sont associés.

6. RÉFÉRENCES

Abrahamson N., y W. Silva, (2008). Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations. *Earthquake Spectra*, 24, 1, 67-98.

Ali, S. T., Freed, A. M., Calais, E., Manaker, D. M. & McCann, W.R. (2008). Coulomb stress evolution in northeastern Caribbean over the past 250 years due to coseismic, postseismic, and interseismic deformation. *Geophys. J. Int.* 174, 904-918

Aki K (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*; 35: 415–456.

Aki, K. y Richards, P.G. (2002). *Quantitative Seismology*. University Science Books. ISBN : 0-935702-96-2, USA.

Arai H, Tokimatsu K. S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum. *Bull Seismol Soc Am* 2004;94:53–63.

Bard, P.Y. (1999). Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?. *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*. Vol. 3, 1251-1279, Balkema.

Bachhuber, J.L., Rathje E.M., Cox, B.R., Dulberg, R.A., Kottke, A., Wood C. & GEER team (2010). Carte Géologique de Port-au-Prince, Haiti. Bureau des Mines et de l'Energie, Haiti, Rev. 1, 15 décembre 2010.

Bakun, William H., Claudia H. Flores and Uri S. ten Brink (2012). Significant Earthquakes on the Enriquillo Fault System, Hispaniola, 1500–2010: Implications for Seismic Hazard. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 102 no. 1, pp. 18-30

Benito M.B., M. Navarro, F. Vidal, J. Gaspar-Escribano, M J. García, JM Martínez-Solares (2010a). A New Seismic Hazard Assessment in the Region of Andalusia (Southern Spain). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8, Issue 4, 739- .

Benito, B., C. Lindholm, E. Camacho, Á. Climent, G. Marroquín, E. Molina, W. Rojas, E. Talavera, J. J. Escobar, G. Alvarado, Y. Torres, y M. Perez Escalante (2010b). Amenaza sísmica en América Central, Benito Oterino, M. B., and Y. Torres Fernández (Editoras), Entimema, Madrid, Spain, 371 pp.

Benito, B., C. Lindholm, E. Camacho, Á. Climent, G. Marroquín, E. Molina, W. Rojas, J. J. Escobar, E. Talavera, G. Alvarado, Y. Torres (2012). A New Evaluation of Seismic Hazard for the Central America Region. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 102 N°2. pp. 504-523 (Abril 2012)

Blondet, M. (2005): Construcción y mantenimiento de viviendas de albañilería. Para albañiles y maestros de obra. Pontificia Universidad Católica del Perú – SENCICO. Versión 3.0. Lima, enero de 2005.

Booth Edmund, Keiko Saito, Robin Spence, Gopal Madabhushi, and Ronald T. Eguchi (2011). Validating Assessments of Seismic Damage Made from Remote Sensing, *Earthquake Spectra* **27**, S1, 157-177, DOI:10.1193/1.3632109

Boore, D. and G. Atkinson (2008). Boore-Atkinson NGA Ground motion relation for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters. PEER 2007/01 Report, 242 pp.

Bozzoni, F., M. Corigliano, G. Lai, W Salazar, L. Scandella, E. Zuccolo, J. LATCHMAN, L. Lynch AND R. Robertson (2011): Probabilistic Seismic Hazard Assessment at the Eastern Caribbean Islands. Bolletín of the Seismological Society of America, Vol 101, No. 5, pp 2499-2521, October 2011.

Campbell, K.W. y Y. Bozorgnia, (2008). NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra*, 24, 1, 139-172.

Calais, E., A.Freed, G. Mattioli, F. Amelung, S. Jónsson, P. Jansma, S. Hong, T. Dixon, C. Prépetit and R. Momplaisir, (2010). Transpressional rupture of an unmapped fault during the 2010 Haiti earthquake, *Nature Geosciences*, 3, 794-799.

Caselles, J. O., Pérez-Gracia, V., Franklin, R., Pujades, Ll. G., Navarro, M., Clapes, J., Canas, J. A. and García, F. (2010). Applying the H/V Method to Dense Cities. A Case Study of Valencia City. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 14: 2, pp. 192-210.

Chiou, B. S.-J y R.R. Youngs, (2008). An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 24, 1, 173-216.

Cox, B., J. Bachhuber, E. Rathje, C. Wood, R. Dulberg, A. Kottke, R. Green y S. Olson (2011). Shear Wave Velocity- and Geology-Based Seismic Microzonation of Port-au-Prince, Haiti. *Earthquake Spectra*, Vol. 27, No. S1, pag. S67-S92

DesRoches R., M. Comerio, M. Eberhard, W. Mooney, and G. J. Rix (2011) Overview of the 2010 Haiti Earthquake, *Earthquake Spectra* **27**, S1, 1-21, DOI:10.1193/1.3630129

Engdahl, E.R., and A. Villaseñor (2002). Global Seismicity: 1900–1999, in W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger (editors), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A*, Chapter 41, pp. 665–690, Academic Press.

Engdahl, E.R., R. van der Hilst, and R. Buland (1998), Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination, *Bull. Seism. Soc. Am.* 88, 722–743.

Enomoto, T., K. Kuriyama, M. Navarro, T. Iwatate (2002). Site-effects evaluation by H/V spectra comparing microtremor with strong motion records observed at ground surface and basement using borehole. 12th European Conference on Earthquake Engineering, paper 596. Londres.

Enomoto, T.; J. Lermo, M. Navarro, N. Abeki, K. Masaki (2004). Site effect characteristics of damage concentrated area due to the 2003 Colima earthquake (M7.6), Mexico. 13th World Conf. on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, (paper 2151)

Enomoto T., Hashimoto M., Ochiai T., Kuriyama T., Yamamoto T. and Navarro M. (2010). Preparation of Seismic Disaster Hazard Maps due to Future Scenario Type Big Earthquakes. International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management (ISRERM2010). Sept. 23-26, 2010, Shanghai, China.

Eurocode No.8 (1998). Design of structures for earthquake resistance. Commission of the European Communities. Doc CEN/TC250/SC8/N335,

FEMA (2003) HAZUS-MH: Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., United States. Federal Emergency Management Agency

FEMA (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, FEMA 440, Prepared by Applied Technology Council (ATC-55 Project), Washington, D.C., United States, June 2005.

Frankel, A., Mueller, C., Barnhard, T., Perkins, D., Leyendecker, E., Dickman, N., Hanson, S., and Hopper, M., 1996. National Seismic Hazard Maps: Documentation June (1996). USGS Open File Report 96-532, U.S. Geological Survey, Reston, VA.

Frankel, A., S. Harmsen, C. Mueller, E. Calais and J. Haase (2011): Seismic Hazard Maps for Haiti. *Earthquake Spectra*, vol 27, S23-S24 pp.

García-Jerez A., Navarro M., Alcalá F.J., Luzón F., Pérez-Ruíz J.A., Enomoto T., Vidal F. & Ocaña E (2007). Shallow Velocity Structure Using Joint Inversion of Array and H/V Spectral Ratio of Ambient Noise: The Case of Mula Town (SE Spain). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 27, pp. 907-919.

García-Jerez A., Luzón F., Navarro M (2008). Determination of the elastic properties and the depth of shallow sedimentary deposits applying a spatial autocorrelation method. *Geomorphology* 93: 74-88.

García-Jerez, A., Luzón, F., Navarro, M., Santoyo, M. A. (2010) Assessing the Reliability of the Single Circular Array Method for Love-Wave Ambient-Noise Surveying. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 100 (5), 2230-2249.

García-Mayodormo J. y A. Suarez (1999): Sismicidad y peligrosidad sísmica de la República Dominicana. UPM. Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno.

Goodno B. J., N. C. Gould, P. Caldwell, and P. L. Gould (2011). Effects of the January 2010 Haitian Earthquake on Selected Electrical Equipment, *Earthquake Spectra* **27**, S1, 251- 276, DOI:10.1193/1.3636415

Granja, J.L. (2008): Geodinámica del borde Sur de las Antillas Mayores oriental. Universidad Complutense de Madrid (UCM). Facultad de Ciencias Geológicas. Departamento de Geodinámica.

Green Rebekah and Scott Miles (2011). Social Impacts of the 12 January 2010 Haiti Earthquake, *Earthquake Spectra* **27**, S1, 447-462, DOI:10.1193/1.3637746

Gutenberg B. y C.F. Richter (1954). "Seismicity of the Earth and Associated Phenomena" Princeton University Press, Princeton

Hayes, G. P., R. W. Briggs, A. Sladen, E. J. Fielding, C. Prentice, K. Hudnut, P. Mann, F. W. Taylor, A. J. Crone, R. Gold, T. Ito and M. Simons (2010). Complex rupture during the 12 January 2010 Haiti earthquake, *Nature Geosciences*, 3, 800-805.

Henstridge D.J (1979). A signal processing method for circular arrays. *Geophysics* 44, 179-184.

Hill Arleen, John Bevington, Rachel Davidson, Stephanie Chang, Ronald Eguchi, Beverley Adams, Susan Brink, Dilnoor Panjwani, Robin Mills, Sarah Pyatt, Matthew Honey, and Paul Amyx (2011). Community-Scale Damage,

Disruption, and Early Recovery in the 2010 Haiti Earthquake, *Earthquake Spectra* **27**, S1, 431-446, DOI:10.1193/1.3624964

Holliday, Lisa y Hank Grant (2011). Haiti Building Failures and a Replicable Building Design for Improved Earthquake Safety, *Earthquake Spectra* **27**, S1, 277-297, DOI:10.1193/1.3636386

Kanai, K., Tanaka, T., And Osada, K. (1954): «Measurement of microtremor. I. », *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 32, 199-209.

Kanno T, Narita A, Morikawa N, Fujirawa H, Fukushima (2006) *Bull Seismol Soc Am* 96:879-897.

Konno K, Ohmachi T. (1998) Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bull Seismol Soc Am.* 88(1):228-41.

Lagamarsino, S. y S. Giovinazzi (2006). Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bull. Earthq. Eng.*, 4,4, 415-443.

Lang, A. y J. Marshall (2011). Devil in the Details: Success and Failure of Haiti's Nonengineered Structures. *Earthquake Spectra*, Vol 27, No. S1, pp S345-S372

Lang, D.H., Molina, S., and Lindholm, C.D. (2008). Towards near-real-time damage estimation using a CSM-based tool for seismic risk assessment, *Journal of Earthquake Engineering* 12 (S2): 199-210

Lin P-S y Lee C-T (2008). Ground-motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes in northeastern Taiwan. *Bull Seismol Soc Am* 98:220-240

Lin J., R. Stein, V. Sevilgen, S. Toda (2010). USGS-WHOI-DPRI Coulomb Stress-Transfer Model for the January 12, 2010, MW=7.0 Haiti Earthquake. U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1019

Manaker, M., E. Calais, A. M. Freed, S. T. Ali, P. Przybylski, G. Mattioli, Jansma, C. Prépetit and J. B. de Chabaliér, (2008). Interseismic Plate coupling and strain partitioning in the Northeastern Caribbean, *Geophysical Journal International*, 174, 889-903.

Mann P., E. Calais, J.-C. Ruegg, C. DeMets, P. E. Jansma and G. S. Mattioli (2002).. Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS

measurements and geological observations, *Tectonics*, VOL. 21, NO. 6, 1057, doi:10.1029/2001TC001304, 2002.

Marshall, J., A. Lang, S. Baldrige y D. Popp (2011) Recipe for Disaster: Construction, Methods, Materials, and Building Performance in the January 2010 Haiti Earthquake. *Earthquake Spectra*, Vol 27, No. S1, pp S323–S343.

McCann, W.R. in *Caribbean Tsunami Hazard* (eds Aurelio, M. & Philip, L.) 43-65 (World Scientific, 2006).

Mercier de Lépinay, B. Anne Deschamps, Frauke Klingelhofer, Yves Mazabraud, Bertrand Delouis, Valérie Clouard, Yann Hello, Jacques Crozon, Boris Marcaillou, David Graindorge, Martin Vallée, Julie Perrot, Marie-Paule Bouin, Jean-Marie Saurel, Philippe Charvis, and Mildor St-Louis (2011). The 2010 Haiti earthquake: A complex fault pattern constrained by seismologic and tectonic. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL.38, L22305, doi:10.1029/2011GL049799, 2011

Milutinovic, Z.V., and Trendafiloski, G.S. (2003) RISK-UE, An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Report to WP4: Vulnerability of current buildings. September 2003, 109 pp.

Miyamoto, H. Kit, Amir S. J. Gilani, and Ken Wong (2011). Massive Damage Assessment Program and Repair and Reconstruction Strategy in the Aftermath of the 2010 Haiti Earthquake. *Earthquake Spectra: Special Issue on the 2010 Haiti Earthquake*. Vol 27. pp. S219-S237

Mix Dustin, Tracy Kijewski-Correa, and Alexandros A. Taflanidis (2011). Assessment of Residential Housing in Léogâne, Haiti, and Identification of Needs for Rebuilding after the January 2010 Earthquake, *Earthquake Spectra* 27, S1, 299-322, DOI:10.1193/1.3637942

Molina, S., Lang, D.H., and Lindholm, C.D. (2010). SELENA: An open-source tool for seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure. *Computers & Geosciences* 36(2010): 257–269

Molina, S., and Lindholm, C.D. (2007). Estimation the confidence of earthquake damage scenarios: examples from a logic tree approach, *Journal of Seismology* 11(3): 399–310

Nakamura, Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface. *Q. Rep.RTRI* 30, 25–33.

Navarro M., Corchete V., Badal J.I., Pujades L., Canas J.A. & Vidal, F (1997). Inversion of Rg waveforms in southern Spain. Bull. Seism. Soc. Am. 87, 847-865.

Navarro M., Sánchez F.J., Enomoto T., Vidal F.& Rubio S (2000). Relation between the predominant period of soil and the damage distribution after the Mula 1999 earthquake. Sixth International Conference on Seismic Zonation (6ICSC). November 12-15, 2000, Palm Spring, California, USA.

Navarro, M. T. Enomoto, F.J. Sánchez, I. Matsuda, T. Iwatate, A. Posadas, F. Luzón, F. Vidal, K. Seo (2001). Surface Soil Effects Study Using Short-period Microtremor Observations in Almeria City, Southern Spain. Pure appl. Geophys, 158, 2481-2497.

Navarro, M., F Vidal, T. Enomoto, F.J. Alcalá, F.J. Sánchez and N. Abeki (2007). Analysis of site effects weightiness on RC building seismic response. The Adra (SE Spain) example. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 3, 1363-1383.

Navarro M., García-Jerez J.A., Alcalá F.J., Vidal F., Enomoto T., Luzón F., Creus C. (2008a) Vs30 Structure of Lorca town (SE Spain) from Ambient Noise Array Observations. Proceeding 31st General Assembly of the European Seismological Commission ESC 2008, Hersonissos, Crete, Greece, 7-12 September 2008.

Navarro, M.; Enomoto, T.; Yamamoto, T.; García-Jerez, A.; Vidal, F.; Bretón, M. (2008b). Analysis of Site Effects and Their Correlation with Damage Distribution Observed During the Colima (Mexico) Earthquake of January 21, 2003. Proc. Of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, 8 pp., October 12-17, 2008, Beijing, China

Navarro M., García-Jerez JA., Vidal F., Enomoto T, Feriche M (2010). Vs30 structure of Granada town (southern Spain) from ambient noise array observations. 14th European Conf. on Earthquake Engineering, Macedonia, 30th August – 3rd September, 2010. 8 pp.

NCSE-02 (2002). Normativa de Construcción Sismorresistente Española. Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes, Real Decreto 997/2002. Boletín Oficial Del Estado No. 244, 11 Octubre, 2002, Spain.

NEHRP (2003). Recommendation provision for seismic regulation for new buildings and other structures, Building Seismic Safety Council, Washington, D. C Federal Emergency. FEMA.

O'Brien Patrick, Marc Eberhard, Olafur Haraldsson, Ayhan Irfanoglu, David Lattanzi, Steven Lauer, and Santiago Pujol (2011). Measures of the Seismic Vulnerability of Reinforced Concrete Buildings in Haiti, *Earthquake Spectra* **27**, S1, 373-386, DOI:10.1193/1.3637034

Oliveira C.S. & M. Navarro (2010). Fundamental periods of vibration of RC buildings in Portugal from in-situ experimental and numerical techniques. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol.8, pp. 609–642.

Parolai S., Picozzi M., Richwalski S.M. & Milkereit C (2005). Joint inversion of phase dispersion and H/V ratio curves from seismic noise recordings using a genetic algorithm. *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L01303.

Pérez-Estaún, A., P. P., Hernaiz Huerta, E., Lopera, M., Joubert, Grupo Sysmin (J., Escuder-Viruete, A., Diaz De Neira, J., Monthel, J., García-Senz, P., Ubrien, P., Contreras, E., Bernárdez, G., Stein, I., Deschamps, J. L., García-Lobón, C. Ayala,) 2007. Geología de la República Dominicana: de la construcción de arco-isla a la colisión arco-continente. *Boletín Geológico y Minero*, 188(2):157-174.

Prentice, C.S., Mann, P., Pea, L.R. y Burr, G., (2003). "Slip rate and earthquake recurrence along the central Septentrional fault, North American-Caribbean plate boundary, Dominican Republic". *Journal of Geophysical Research*, 108, doi:10.129/ 2001JB000442.

Prentice, C. S., P. Mann, A. J. Crone, R. D. Gold, K. W. Hudnut, R. W. Briggs, R. D. Koehler and P. Jean, (2010). Seismic hazard of the Enriquillo–Plantain Garden fault in Haiti inferred from palaeoseismology, *Nature Geosciences*, 3, 789-793.

Rathje Ellen M., Jeff Bachhuber, Ranon Dulberg, Brady R. Cox, Albert Kottke, Clinton Wood, Russell A. Green, Scott Olson, Donald Wells, and Glenn Rix (2011). Damage Patterns in Port-au-Prince during the 2010 Haiti Earthquake, *Earthquake Spectra* **27**, S1, 117-136, DOI:10.1193/1.3637056

Ritchie Liesel Ashley and Kathleen Tierney (2011). Temporary Housing Planning and Early Implementation in the 12 January 2010 Haiti Earthquake, *Earthquake Spectra* **27**, S1, 487-507, DOI:10.1193/1.3637637

Satake, N.; Suda, K.; Arakawa, T; Sasaki, A.; Tamura, Y. (2003) "Damping evaluation using full-scale data of buildings in Japan", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 129(4):470-477.

Tokimatsu K. (1997). Geotechnical site characterization using surface waves. In: Ishihara (Ed.), Earthquake Geotechnical Engineering. Balkema, Rotterdam, pp. 1333-1368

Zhao, J. X., J. Zhang, A. Asano, Y. Ohno, T. Oouchi, T. Takahashi, H. Ogawa, K. Irikura, H. K. Thio y P. G. Somerville (2006): Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 96,

Ressources en ligne

[1] “Preparados contra los desastres (Una experiencia de prevención y respuesta a emergencias en comunidades nativas y mestizas en la región amazónica del Perú)”, <http://www.eird.org/publicaciones/lista.html>, acceso: octubre 2011

[2] Uruguay. Ministerio de Educación y Cultura. Dirección General de Gestión Social y Equidad Educativa Montevideo; UR. Ministerio de Educación y Cultura. Dirección General de Gestión Social y Equidad Educativa: “Plan Nacional de Educación para la gestión de riesgos. “, 2011
<http://www.crid.or.cr/digitalizacion/pdf/spa/doc18686/doc18686.htm>, acceso octubre 2011

[3] Organización Panamericana de la Salud. Oficina Regional de La OMS. Área de desarrollo sostenible y salud ambiental: “Comunicación de Riesgos: Introducción.” http://www.ataonline.org.ar/stop/pdf/6_jcastro.pdf, acceso noviembre 2011

[4] Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR): “Terminología sobre reducción del riesgo de desastres.”, (2009) http://www.eduriesgo.org/eduriesgo/documentos/modulo_i/unisdr_terminologia_sobre_reduccion_del_riesgo_de_desastres.pdf

[5] “Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales. Componentes principales del análisis de riesgos. Informe técnico ERN-CAPRA-T1-1.”

http://www.ecapra.org/capra_wiki/es_wiki/images/6/66/Componentes_Principales_del_Analisis_de_Riesgos.pdf, acceso noviembre 2011.

[6] Centro de Operaciones de Emergencia de República Dominicana: “Yo sé qué hacer en caso de terremotos, ¿y tú?”, 2010 http://www.coe.gov.do/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=26&Itemid=68, acceso octubre 2011

7. ANNEXES

7.1. Formulaire de prise de données du MTPTC

Ceci est le modèle de formulaire utilisé pour compléter la base de données du MTPTC. On observe qu'on prélève des données relatives aux matériaux structurels, à l'usage du bâtiment, au niveau de dommages dus au tremblement de terre, ainsi qu'aux facteurs affectant à la vulnérabilité de la construction, tels que sa géométrie, ses fondations, etc.

MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS TRANSPORTS ET COMMUNICATIONS
Evaluation rapide de bâtiments



DTP-BE #1

Inspection

Id. Inspecteur : _____ Date et Heure d'inspection : _____ AM PM
Affiliation : _____ Zone inspectée: Extérieur uniquement Extérieur et intérieur

Description du bâtiment

Type de construction

Nom du bâtiment : _____

Adresse : _____

Contact/Téléphone : _____

Coordonnées GPS: _____

<p>Structure</p> <p><input type="checkbox"/> Structure en béton</p> <p><input type="checkbox"/> Structure en béton armé</p> <p><input type="checkbox"/> Structure en acier / tôles</p> <p><input type="checkbox"/> Structure en bois / tôles</p> <p><input type="checkbox"/> Murs porteurs</p>	<p>Dalle</p> <p>Plancher</p> <p><input type="checkbox"/> En béton</p> <p><input type="checkbox"/> En béton armé</p> <p><input type="checkbox"/> En bois</p>	<p>Murs</p> <p><input type="checkbox"/> Murs en béton armé</p> <p><input type="checkbox"/> Murs de blocs non armés</p> <p><input type="checkbox"/> Murs de blocs armés</p> <p><input type="checkbox"/> Maçonnerie de roches</p> <p><input type="checkbox"/> Murs de briques</p> <p><input type="checkbox"/> Bois + maçonnerie</p>
<p>Nombre d'étage : _____</p> <p>Nombre de sous-sol : _____</p>	<p>Toiture</p> <p><input type="checkbox"/> En béton armé</p> <p><input type="checkbox"/> En bois / tôle</p> <p><input type="checkbox"/> En acier / tôle</p>	

Autre type:

Spécification du bâtiment

Type d'occupation

Superficie approximative (mètre carré) : _____	<input type="checkbox"/> Résidentiel- section unique	<input type="checkbox"/> Commerce	<input type="checkbox"/> Gouvernement
Nombre de résidences : _____	<input type="checkbox"/> Résidentiel- section multiple	<input type="checkbox"/> Bureaux	<input type="checkbox"/> Historique
Nombre de locaux non habitables : _____	<input type="checkbox"/> Assemblée publique	<input type="checkbox"/> Industriel	<input type="checkbox"/> Ecole
	<input type="checkbox"/> Santé	<input type="checkbox"/> Services d'urgence	<input type="checkbox"/> Autre
	<input type="checkbox"/> Hôtel	<input type="checkbox"/> Bâtiment religieux	

Evaluation

Etudiez les bâtiments pour vérifier leur état et cochez la colonne appropriée ci-dessous

Etat observé	Mineur/Aucun	Modéré	Grave	Dommage estimé
Bâtiment effondré, partiellement effondré ou déplacé Bâtiment ou étage penché	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> aucun <input type="checkbox"/> 0-1% <input type="checkbox"/> 1-10% <input type="checkbox"/> 10-30% <input type="checkbox"/> 30-60% <input type="checkbox"/> 60-100% <input type="checkbox"/> 100%
Murs intérieurs et extérieurs fissurés	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Murs intérieurs et extérieurs effondrés	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Colonnes, pilastres et corbeaux fissurés et émiettés	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Dalles, poutres, solives fissurées et écaillées	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Parapets, fermes, terrasses et escaliers endommagés	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Détérioration du bâtiment	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Fissures ou mouvement du sol	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Autre (spécifier)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Difficulté de la démolition :

Aucun/mineure Simple Moyenne Complexe

Observations :

SIGNALISATION

Choisissez une signalisation basée sur l'évaluation et le jugement d'équipe. Les conditions graves mettant en danger tout le bâtiment sont des raisons pour interdire l'accès par la signalisation ACCES NON AUTORISE. Les états modérés et peu graves peuvent permettre une signalisation Utilisation restreinte. signalisation INSPECTÉ doit être affichée à l'entrée principale. Les signalisations ACCES LIMITE et ACCES NON AUTORISE doivent être placés toutes les entrées.

Inspecté (fiche verte) accès limité (fiche jaune) accès non autorisé (fiche rouge)

Le bâtiment est-il vert mais taggé jaune / rouge due au martèlement du bâtiment adjacent

Enregistrez toutes les restrictions telles qu'indiquées: _____

AUTRES VERIFICATIONS. Cochez les cases ci-dessous seulement si d'autres actions sont nécessaires

Barricades nécessaires dans la zone: _____
 Expertise détaillée recommandée : Structurale Géotechnique Autre _____
 Autres recommandations ou restrictions tel qu'inscrit sur la pancarte : _____

Observations: _____

Facteurs de vulnérabilité (cochez tout ce qui s'applique) :

Date de début de construction 1 – 10 années 11 – 25 années 26 – 50 années plus de 50 années

Date de travaux importants de rénovation 1 – 5 années 6 – 10 années plus de 10 années

Sols de l'emplacement :

Sable de plage Sol mou Sol ferme Roches

Inclinaison de construction :

Plate Modérée Abrupte

Emplacement du bâtiment :

Plage Rivière Vallée Plaine Colline Flan de coteau Sommet

Fondation :

Dalle/pose sur Grade élevé sur Post Piles profondes

Forme en plan :

O E H L T U Rectangulaires Autres

Irregularités verticales :

Etage mou Dénivelés Murs de cisaillement couplés Colonnes raccourcies Martèlement de bâtiment adjacent

7.2. Principales réussites des projets de coopération réalisés

Conception, Implantation, observation et calcul d'un réseau géodésique à Jocotan, Chiquimula, Guatemala, ayant pour but de créer un système de référence spatial, sur lequel soutenir les différents travaux d'ingénierie en cours dans la région.

Conception et implémentation d'un système d'information de la santé et la nutrition pour la population de San José de Cusmapa, Nicaragua, mis en place à travers de la réalisation d'un Projet de Fin de Carrière encadré dans la Programme de Communautés Rurales du Millénaire de l'Université Polytechnique de Madrid, auquel participe activement ce groupe de recherche. Un an après la révision des Objectifs de Développement du Millénaire (ODM) des Nations Unies, en l'an 2005, surgi le programme cité précédemment, qui inclut le Projet Villages du Millénaire dans le Groupe de Coopération de l'UPM Contre la Faim.

Le principal objectif de ce projet a été de contribuer à l'amélioration des capacités locales, relatives à la santé et la nutrition, de la population de San José de Cusmapa. Le Système d'Information Géographique mis en marche, géré par le personnel du Centre de Santé, permet analyser la distribution de la population en danger et adopter, de manière raisonnée, des décisions en matière d'assistance, d'urgences, d'épidémies, de formation, de nouveaux projets, etc.

La représentation des valeurs des indicateurs de santé et nutrition, des communautés et des secteurs, permettra d'analyser la distribution de la population materno-infantile en danger, ainsi que la distribution de maladies, aboutissant à une étude épidémiologique. D'autre part, on relie les personnes affectées avec leurs logements correspondants, ce qui permet d'analyser la relation existante entre l'état de santé de l'individu et les caractéristiques du bâtiment qu'il habite (matériaux du toit, du sol, des murs, accès à l'eau potable, dépôts de résidus, etc.).

Élaboration de cartes d'aléa sismique en Amérique Centrale, comme résultat de la première phase du projet RESIS II financé par le

gouvernement norvégien, coordonné par l'Agence de Coopération de la Norvège (NORSAR), et gestionné par le Centre de Coordination pour la Prévention des Désastres Naturels en Amérique Centrale (CEPRENAC), pour la réduction du risque sismique en Amérique Centrale. Cette première phase a abouti, cette année, à la publication du livre "Aléa sismique en Amérique Centrale", coédité par CYAN Editores S.L., B. Benito y Y. Torres. Dans celui-ci on explique la méthodologie utilisée pour le calcul du risque, tant à niveau régional qu'à niveau national, et on présente les résultats obtenus à la suite de la réalisation d'un atelier à la ETSITGC, coordonné par le prof. Belen Benito, et auquel ont participé des représentants de tous les pays centre-américains. Les cartes de risque sismique régional générées ne présentent aucune discontinuité aux frontières, et les cartes de risque sismique national servent déjà aux spécialistes des différents pays pour établir des conceptions parasismiques, ou pour l'élaboration d'une première réglementation parasismique.

Calcul du risque sismique pour les capitales de six pays centre-américains. Les travaux aboutissant à ce calcul ont été menés à la ETSITGC pendant le mois de Février 2010, et ont compté avec la participation de chercheurs des six pays concernés et du NORSAR. Actuellement, des ateliers locaux sont en préparation dans chaque pays de la région, afin de répartir le travail et d'optimiser les résultats.

Déduction de modèles de prédiction du mouvement fort pour des séismes de subduction et de la chaîne volcanique au Salvador, par analyse de régression des enregistrements accélérométriques des tremblements de terre du 13 Janvier et du 13 Février 2001, ainsi que des séries de répliques (Cepeda et al , 2004). Ces modèles fournissent un point de référence pour de futures études d'aléa sismique dans la région.

Analyse de la distribution spatiale et temporelle des séries sismiques du 13 Janvier et 13 Février au Salvador, qui a conduit à expliquer l'intense activité, qui a eu lieu au début de 2001 dans le pays, causée par deux séismes, de subduction et de chaîne volcanique respectivement. L'interaction entre les deux séries et l'existence d'un mécanisme de déclenchement entre des événements d'origines différentes ont été démontrées, ce qui peut être décisif dans les

évaluations futures du risque sismique et le danger de glissements de terrain dans la région (Benito et al., 2004). Ce résultat a apporté une contribution significative en termes de transfert de contrainte, ce qui peut également avoir de l'intérêt dans le cas de l'Espagne, où des tremblements de terre proches, et très peu séparés dans le temps, ont été documentés historiquement ; ceci pourrait correspondre à des mécanismes de déclenchement (Benito et al. , 2007).

Interprétation tectonique globale du Salvador. Les résultats des tremblements de terre de 2001 suggèrent que le transfert de contrainte statique aurait pu être un mécanisme important dans la région aussi dans le passé. Pour vérifier ceci, on réalisa une évaluation plus approfondie des contraintes statiques de Coulomb (CFS) en incluant des événements antérieurs à 2001, qui confirma que ceux de magnitude supérieure à 7,0, générés dans la plaque du Coco, étaient responsables de la réactivation des failles le long de la chaîne volcanique dans la plaque du Caraïbe. L'étude a été complétée par l'analyse de données géologiques locales et d'images satellite, détectant l'existence d'une zone majeure de faille décrochante, de plus de 100 km de long, identifiée pour la première fois en tant que telle ; on l'a dénommée Zone de Faille du Salvador (ZFES). Dans le ZFES on a identifié une région subissant une variation d'efforts positive ($> 0,15$ MPa) à l'est de la rivière Lempa, ce qui augmente sa probabilité de futurs séismes de chaîne volcanique (Martinez-Diaz et al, 2004).

Numérisation de la carte géologique du Salvador (1:100.000) et création d'un SIG avec toute l'information disponible: cartographique, topographique, tectonique, sismique, etc. Ce SIG a été transféré au SNET et est utilisé actuellement dans sa politique d'aménagement du territoire.

Mise en œuvre d'une méthodologie d'analyse du risque de glissements de terrain au niveau régional, qui permet de quantifier la menace de glissements provoqués par des séismes en termes de géologie, topographie, pluviométrie et action sismique. Cette méthodologie a été appliquée au scénario du séisme du 13 janvier, pour calibrer un modèle de menace de glissements de terrain au Salvador, le confrontant avec les données de l'inventaire de

glissements de terrain existant. Ce sujet a fait l'objet de la thèse de doctorat de Maria Jose Garcia, dirigée par le professeur Belen Benito et le professeur Malpica, dont la lecture et la défense s'est tenue à l'Université d'Alcalá en Février 2009. Qualification: excellente Cum Laude par unanimité.

Identification de zones à haut risque de glissements de terrain dus à des tremblements de terre futurs, qui exigent d'autres études détaillées et de mesures correctives (Garcia et al, 2008). Segmentation de la zone identifiée au Salvador (ZFES) et définition de zones sismogènes, face à des scénarios de chaîne volcanique et de subduction.

Caractérisation sismique de la ZFES par des études paléosismiques développées en collaboration avec le Département de Géodynamique de la Faculté de Géologie de l'Université Complutense de Madrid.

Elaboration de cartes d'aléa sismique en Amérique Centrale, à l'échelle régionale et nationale.

Publications générées:

Benito, B. C. Lindholm, E. Camacho, Á. Climent, G. Marroquín, E. Molina, W. Rojas, E. Talavera, J. J. Escobar, G. Alvarado, Y. Torres y M. Pérez-Escalante (2010): Amenaza sísmica en América Central, Ed. Entimema. Madrid, enero 2010.

García-Rodríguez, MJ, Benito, B; Rodríguez, CE (2008). "A Multidisciplinary GIS-Based Approach to Earthquake-Triggered Landslide Hazard Analysis with an Application to the 13th January 2001 El Salvador Earthquake". Enviado a: Natural Hazards.

Benito, B; Pullinger, C., Cepeda, J, Hernandez, D, Marroquin, G; Hasbun, P (2005), Caracterización del movimiento del suelo y sus efectos en la infraestructura durante los terremotos del 2001, El Salvador; monografía, 120 pp; ed. UCA.

Cepeda, JM; Benito, B; Burgos, EA (2004). Strong Motion Characteristics of January and February, 2001 Earthquakes in El

Salvador. Geological Society of America GSA Special Paper 375-25: Natural Hazards in El Salvador. ISBN: 0-8137-2375-2, pp 405-423.

Benito, B.; Cepeda, J.M y Martínez Diaz, J.J. (2004) Analysis of the Spatial and Temporal Distribution of the 2001 Earthquakes in El Salvador. Geological Society of America GSA Special Paper 375-25: Natural Hazards in El Salvador. ISBN: 0-8137-2375-2, pp 339-356.

J. Bommer, M. Benito, B., Ciudad-Real, A. Lemoine, M.A. López-Menjívar, R. Madariaga, J. Mankelow, P. Méndez de Hasbun, W. Murphy, M. Nieto-Lovo, C.E. Rodríguez-Pineda, H. Rosa (2002). The El Salvador earthquakes of January and February 2001: context, characteristics and implications for seismic risk. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, V 22; n 5, pp 389-418.

M.J.García Rodríguez, B. Benito, C.Rodríguez. (Niza, 2004). Multidisciplinary methodology for hazard assessment of triggered landslide. Application to the 2001 earthquakes in El Salvador. Poster. 1st General Assembly of European Geosciences Union. Geophysical Research Abstracts, vol. 6.

Benito, B; Contreras, M; Bravo, M; Barrero, G; Jiménez, ME (2002). "Aplicación de un Sistema de Información Geográfica al Estudio de la Distribución Espacio-Temporal de los Sismos de 2001 en El Salvador", Capítulo Libro: Los Sistemas de Información Geográfica en la Gestión de los Riesgos Geológicos y el Medio Ambiente, Publicación del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Medio Ambiente Riesgos Geológicos, No. 3, pp. 21-42.

Benito, B. y Laín, L. (2001). Metodología para la Evaluación de la Peligrosidad Sísmica en Guatemala. Aplicación al Diseño Sismorresistente. En: Mitigación de Desastres Naturales en Centroamérica. Vol 1., editado por AECI y e Instituto Tecnológico Geominero de España, pp 125-159.

En plus, les suivants Projets de Thèse, de Fin de Carrière, et de Fin de Master ont été réalisés:

Thèse Doctorale: "Méthodologies d'évaluation du risque de glissements de terrain induits par des séismes". Auteur: María

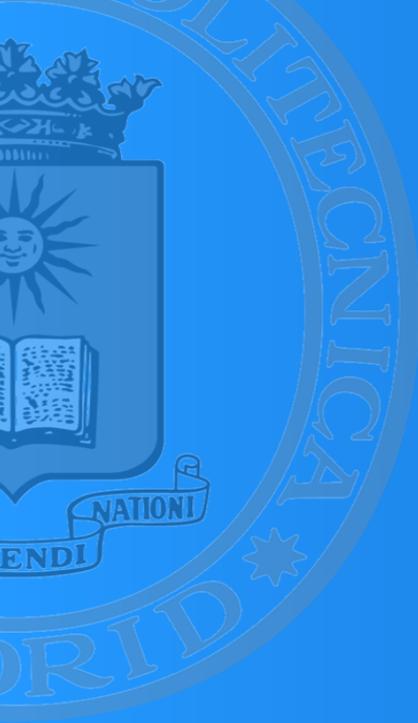
José García Rodríguez; directeurs: B. Benito, J. A. Malpica. Date de lecture: 09/02/2009. Qualification: Très Bien.

Projet de Fin de Master: "Calibration de modèles de mouvements forts par des données accélérométriques en Amérique Centrale". Auteur: Rosey Piedra; Tuteurs: B. Benito; Date de lecture: 19/09/2011.

Projet de Fin de Carrière: "Étude de solutions et exécution des travaux topographiques du projet de coopération Pawaga en Tanzanie". Auteur: P. Crende; Tuteurs: R. Caturla, Y. Torres; Date de lecture: 07/05/2010 Qualification: Très Bien

Projet de Fin de Carrière: "Conception d'un modèle de données visant à l'analyse du risque de glissements de terrain en zones volcaniques". Auteur: M. Pérez-Escalante; Tuteurs: P. Moreno, B. Benito, M. J. García-Rodríguez, D. Ballari; Date de lecture: 18/07/2008 Qualification: Très Bien

Projet de Fin de Carrière: "Conception, Implantation, observation et calcul d'un réseau géodésique à Jocotan, Chiquimula, Guatemala". Auteurs: Luis Arenas, Carmen García; Tuteurs: R. Caturla, J. Prieto, M. Arrivillaga, Y. Torres; Date de lecture: mars 2011 Qualification: Très Bien



Université Polytechnique de Madrid
Observatoire National de l'Environnement et de la Vulnérabilité de Haïti



Université Complutense de Madrid
Centre Supérieur de Recherches Scientifiques
Université d'Alicante
Université d'Almeria
Réseau Sismique de Puerto Rico
Institut Sismologique Universitaire de la République Dominicaine