

Le SÉISME d'HAÏTI du 12 janvier 2010

Rapport de la mission AFPS



Ressources, territoires, habitats et logement
Énergie et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

Présent
pour
l'avenir



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



Ministère
de l'Écologie,
de l'Énergie,
du Développement
durable
et de la Mer



Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer
en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le climat

Rapport de la mission AFPS effectuée du 24 mai au 1^{er} juin 2010
Organisée à la demande et avec le soutien du
Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer

Ce rapport est publié sous la responsabilité de ses auteurs
et ne saurait engager celle de l'AFPS

Septembre 2010



AFPS, 15 rue de la Fontaine au Roi, 75127 Paris Cedex 11
tél. 01 44 58 28 40 - fax 01 44 58 28 41 - E-mail : afps@mail.enpc.fr
Site internet : www.afps-seisme.org

Membres de la mission

	<i>Société d'appartenance</i>	<i>Aspect étudié pendant la mission</i>
Chef de mission : Claude Hauss	BET HAUSS	Diagnostics d'urgence - Vulnérabilité
Didier Bertil	BRGM	Sismologie et effets de site
Vincent Courtray	MEEDDM	Relations officielles
François Dunand	GEOTER	Vulnérabilité
Yves Guillemot	SETEC INDUSTRIES	Réseaux
Gérard Loustalot	DDE 971	Diagnostics d'urgence
Jean-Marc Mompelat	BRGM	Sismologie et effets de site

Remerciements

Les membres de la mission tiennent à remercier tous les acteurs qui se sont rendus disponibles pour nous faire partager leur expérience qui s'est avérée très enrichissante pour nos travaux :

Madame Viviane SAINT-DIC, directrice de cabinet du ministre des travaux publics, des transports et des communications (MTPTC) ;

Jean-Michel Maurin, ancien Directeur Départemental de l'Équipement de la Guadeloupe et actuellement conseiller auprès du premier ministre haïtien, au sein du Comité Interministériel à l'Aménagement du Territoire (CIAT) ;

Jérémy Fraissinet, coopérant auprès de l'ambassade de France, détaché au Cabinet du Ministre des Travaux Publics, des Transports et de la Communication (MTPTC) ;

Christophe Musaraganyi, chargé de la cellule informatisation SIG pour l'UNOPS au BETB (Bureau d'Évaluation Technique des Bâtiments) ;

Et tous ceux, que nous n'avons pas oubliés mais dont la liste serait trop longue à égrener : officiels et professionnels haïtiens (directeurs de port, de laboratoire des TP, d'hôpital, géologues...), coopérants de l'ambassade de France et des organismes internationaux, et bien entendu les haïtiens qui nous ont toujours volontiers ouvert leurs portes et permis de réaliser nos observations.

Une mention spéciale à nos deux guides et chauffeurs, grâce à la dextérité et au sang-froid remarquable desquels nous sommes toujours arrivés à bon port.

Sommaire

1.	L'ÉVÈNEMENT	5
2.	LE CONTEXTE GÉNÉRAL	6
2.1	Haïti avant, pendant et après le séisme	6
2.2	Faits et chiffres d'Haïti	11
3.	OBJECTIFS ET ENSEIGNEMENTS DE LA MISSION	12
4.	ASPECTS SISMOLOGIQUES ET GÉOLOGIQUES	14
4.1	Préambule	14
4.2	Cadre sismotectonique	14
4.2.1	Contexte géodynamique régional	14
4.2.2	Le système de failles d'Enriquillo	15
4.2.3	Sismicité historique et instrumentale connue	16
4.2.4	Mesures GPS	18
4.3	Contexte géologique et géotechnique de la région de Port-au-Prince / Léogane	20
4.3.1	Cadre géologique	20
4.3.2	Caractérisation lithologique et structurale	22
4.3.3	Données géotechniques disponibles	26
4.4	Événement du 12 janvier 2010	27
4.4.1	Choc principal et répliques	27
4.4.2	Mécanisme de rupture et interférométrie	29
4.4.3	Contraintes de Coulomb	31
4.4.4	Intensités et accélérations	32
4.5	Enregistrements et réseaux de mesures sismiques	35
4.5.1	Les réseaux existants	35
4.5.2	Les installations temporaires post-sismiques	35
4.5.3	Enseignements pour un réseau de surveillance permanent	38
4.6	Effets de site	38
4.6.1	Démarche suivie – cartographie des dommages au bâti	38
4.6.2	Effets de site géologiques	40
4.6.3	Effets de site topographique	49
4.6.4	Enseignement pour des microzonages sismiques à Haïti	49
4.7	Effets induits	50
4.7.1	Mouvements de terrains	50
4.7.2	Liquéfaction	64
4.8	Synthèse des enseignements et recommandations	72
4.8.1	Pour Haïti	72
4.8.2	Pour les Antilles françaises	73
4.9	Bibliographie	75
5.	DIAGNOSTICS POST-SISMIQUES D'URGENCE	77
5.1	La gestion de la crise	77
5.1.1	Un pays en état de choc	77
5.1.2	Nécessité d'inspecter les bâtiments non effondrés	77
5.2	Les inspections d'urgence : un enjeu majeur	78
5.3	Les inspections d'urgence en Haïti	80
5.3.1	Objectifs	80
5.3.2	La base de la méthode technique : l'ATC-20	80
5.3.3	La déclinaison utilisée en Haïti	84
5.3.4	L'organisation mise en place	87
5.3.5	Bilan	91
5.3.6	Perspectives	92
5.4	Démarche élaborée par l'AFPS en Guadeloupe	93
5.4.1	Objectifs	93
5.4.2	Une démarche de longue haleine	93
5.4.3	La Méthode	94
5.4.4	L'organisation envisagée	98
5.4.5	Les attentes de la mission en Haïti	98
5.5	Bilan et enseignements de la mission	98
5.5.1	Choix des bâtiments test	98

5.5.2	Résultat des inspections réalisées	99
5.5.3	Bilan technique et organisationnel.....	100
5.5.4	Exemples	104
5.5.5	Observations sur l'organisation des inspections	108
5.6	Conclusion.....	110
6.	VULNERABILITE DU BATI.....	113
6.1	Objet des observations	113
6.2	Localisation des observations	113
6.3	L'incidence de la qualité des matériaux et de la mise en œuvre	116
6.4	Analogies du bâti avec les Antilles françaises	116
6.5	Procédés et modes constructifs particuliers	118
6.6	Vulnérabilité de certains types de bâtiments	120
6.6.1	Ossatures poteaux-poutres en béton armé avec remplissage en maçonnerie a posteriori	120
6.6.2	Maçonneries contemporaine en blocs de parpaing ou en briques.....	125
6.6.3	Habitat précaire en maçonnerie de parpaings.....	129
6.6.4	Ossatures en bois.....	132
6.6.5	L'environnement, les éléments secondaires et les détails	134
6.6.6	Bâti historique en maçonnerie de pierre ou de brique.....	136
6.6.7	Les contre exemples.....	141
6.7	Quelques bâtiments parasismiques.....	143
6.8	Enseignements	145
7.	RESEAUX.....	146
7.1	Eau et assainissement.....	146
7.1.1	Eau potable.....	146
7.1.2	Assainissement.....	148
7.1.3	Les mesures d'urgence	149
7.1.4	Recommandations concernant les Antilles Françaises	150
7.2	Electricité.....	151
7.2.1	Fonctionnement	151
7.2.2	Effets du séisme	151
7.2.3	Après le séisme	153
7.2.4	Communication officielle.....	153
7.2.5	Recommandations pour les Antilles françaises.....	153
7.3	Téléphone	153
7.3.1	Fonctionnement général	153
7.3.2	Effets du séisme	154
7.3.3	Recommandations pour les Antilles françaises.....	155
8.	SYNTHESE DES ENSEIGNEMENTS POUR LES ANTILLES FRANÇAISES.....	156
8.1	Les actions de prévention	156
8.2	La préparation de l'après	157
9.	PROPOSITIONS DE L'AFPS POUR DES D'ACTIONS A MOYEN ET LONG TERME POUR LA REPUBLIQUE D'HAÏTI.....	159
9.1	Actions relatives à la prévention du risque sismique	159
9.1.1	Exemple d'analyse de guides techniques de construction parasismique	159
9.1.2	Documents à l'usage des Antilles françaises utilisables en Haïti.....	160
9.1.3	Formation technique des professionnels et formation grand public.....	160
9.1.4	Formation au sauvetage-déblaiement.....	160
9.1.5	Collaborations franco-haïtiennes.....	160
9.1.6	Aménagement du territoire	161
9.2	Actions relatives à la reconstruction du bâti.....	161
9.3	Actions relatives à la gestion de crise.....	162
9.4	Actions relatives à l'évaluation du risque.....	162
9.5	Synthèse commentée des actions envisageables.....	163
10.	RELATIONS AVEC LES AUTORITES – PERSONNALITES RENCONTREES.....	166
	Table des illustrations.....	167

ANNEXE 1 : Analyse du document « Guide des bonnes pratiques »

ANNEXE 2 : Analyse du document « Etude code de la construction »

1. L'ÉVÉNEMENT

Rédaction : Claude Hauss

Le séisme survient le 12 janvier 2010 à 21h53 TU à environ 23 km au Sud Ouest de Port-au-Prince. La durée du mouvement « fort » au rocher serait de 15 à 35 secondes dans la capitale. L'absence de matériel de mesure sur place ne permet pas plus de précision.

La Magnitude de moment Mw est estimée à 7.0 par l'USGS, 7.1 par le CSEM, et la profondeur d'environ 10 km. Ce caractère superficiel à proximité d'une zone très densément peuplée et aux caractéristiques de construction médiocres en fait un séisme meurtrier.

L'intensité macrosismique peut être évaluée à VIII et plus dans la zone la plus touchée (voire localement X), et elle est de VII à VIII dans une zone de près de 3 000 km².

Le bilan évalué 6 mois après le séisme par l'ONU est le suivant :

- 222 570 morts ;
- 300 573 blessés ;
- 2 300 000 personnes déplacées ;
- 188 000 maisons détruites ou partiellement endommagées ;
- Environ 16 % des bâtiments de Port-au-Prince seraient détruits ou proches de la ruine (dommages D4 à D5) ;
- Cette proportion passe à près de 25 % à Léogane.

Le nombre de victimes en fait, aux imprécisions près, l'un des trois séismes les plus meurtriers de l'histoire de l'humanité, avec les événements de Tangshan en Chine (28.07.1976, probablement 750 000 morts) et de Sumatra (séisme et tsunami du 26.12.2004, probablement 226 000 morts).

Les caractéristiques détaillées de l'événement sont exposées dans le chapitre dédié aux aspects sismologiques.

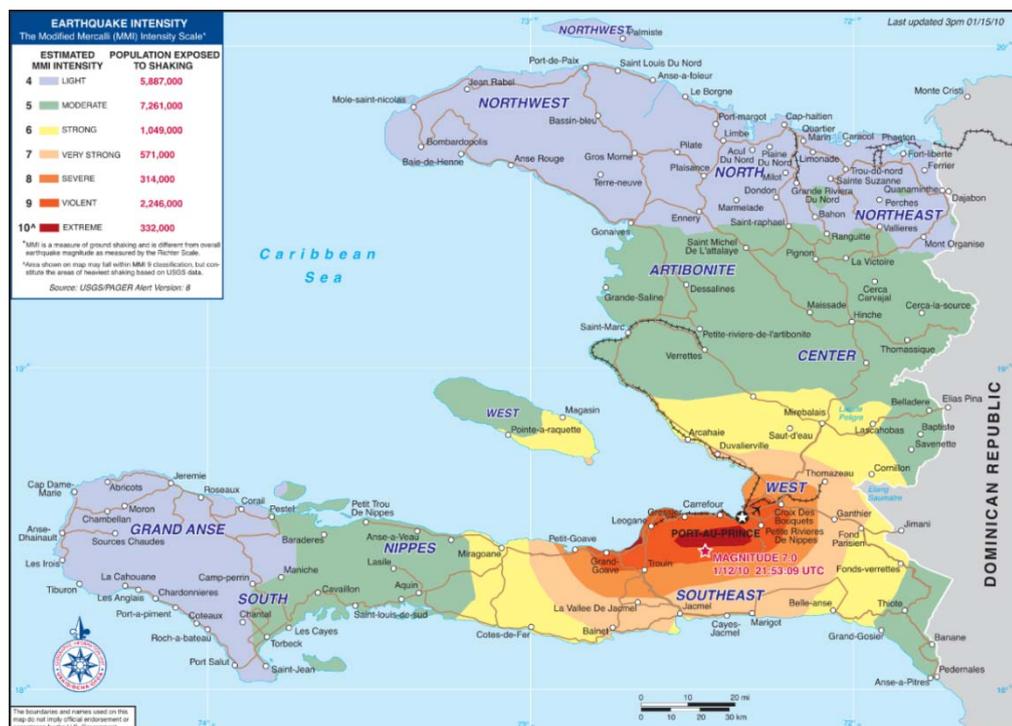


Figure 1 - Carte des intensités selon l'USGS
Coordonnées estimées de l'épicentre : 18,457°N – 72,532°W

2. LE CONTEXTE GENERAL

Rédaction : Claude Hauss

2.1 Haïti avant, pendant et après le séisme

« Quand on débarque dans cette ville, située au bord d'une mer turquoise et entourée de montagnes bleues, on se demande combien de temps cela prendra pour tourner au cauchemar. En attendant il faut vivre avec l'énergie de celui qui attend la fin du monde ». Dany Lafférière.

L'étranger arrivant à Haïti se trouve brutalement projeté dans un environnement inconnu, dans un bouillonnement et une fébrilité à faire perdre tout repère. Aucun voyage dans aucun pays du monde ne ressemble à un voyage en Haïti. Il nous a semblé utile, en guise d'introduction, de faire partager au lecteur quelques impressions et réalités de ce pays, qui ne sont pas étrangères aux conséquences dramatiques du séisme du 12 janvier 2010.

La géographie

Cette île-pays est coupée par de fortes montagnes de son hinterland devenu de surcroît un autre pays : la République Dominicaine indépendante. Haïti est située du côté le plus isolé de l'île d'Hispaniola, et tourne le dos aux grands axes internationaux. Restait cette profonde baie aux eaux abritées des alizés d'Est qui en faisait l'endroit idéal pour installer une capitale et un port. Dans toute île, le port est le centre de gravité de l'activité et le point stratégique des arrivées et départs de marchandises et de voyageurs, même si ces derniers empruntent aujourd'hui plus volontiers les airs. La capitale n'est jamais très loin. Malheureusement pour Haïti, cette géographie imposée correspond aussi à une géologie. Outre les grandes failles tectoniques lacérant le pays, le bassin de Port au Prince est constitué pour partie de terrains peu consistants, et par endroits fortement sujets à la liquéfaction. Lors de la formidable explosion démographique des dernières décennies, la population enfermée dans ce bassin a commencé à gagner les premières hauteurs, aux pentes abruptes et instables faites de calcaires friables et parfois presque sableux, tout en essayant à l'opposé d'augmenter son espace vital en gagnant sur la mer, par des matériaux et déchets déversés à même la vase de la baie.

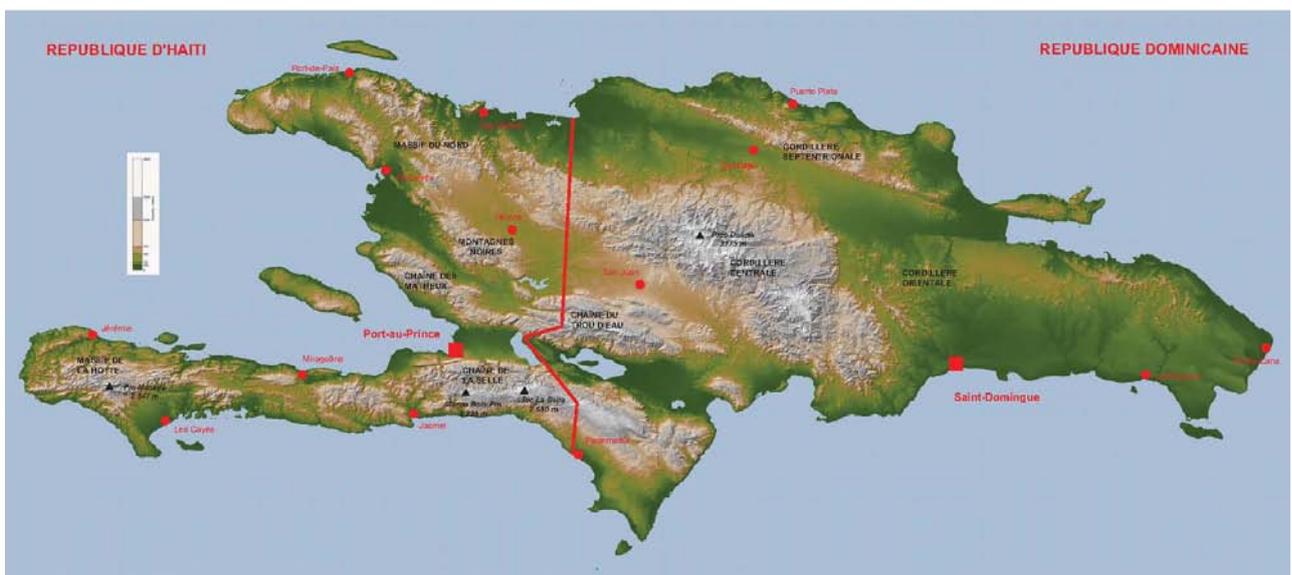


Figure 2 - Hispaniola – Carte topographique

L'histoire

La vitalité de cette ancienne colonie l'a mené à son indépendance dès 1804, profitant alors pleinement des atouts d'une géographie la plaçant très loin de sa métropole, tout en lui assurant de considérables ressources agricoles. Il a fallu au peuple haïtien survivre par ses propres moyens, et il n'a pas ménagé ses efforts. Aucune peine ne semble en effet insurmontable à ces infatigables travailleurs, et Port-Au-Prince est une perpétuelle fourmilière dans laquelle chacun s'active pour subvenir à son quotidien. Malheureusement, l'histoire d'Haïti est faite d'instabilité politique. Une forte démographie s'y ajoutant (la population a doublé en 40 ans), il s'en suit un considérable retard de développement pour un pays déjà marqué par les handicaps structurels de sa petite taille relative et de son isolement. L'émigration d'une partie des élites depuis des décennies, pour raisons économiques ou politiques, est pour le pays un facteur très pénalisant.



Figure 4 - La Tour 2004 jamais achevée, symbole du bicentenaire de l'indépendance,

Haïti le 11 janvier 2010

Le pays de 9 millions d'habitants est l'un des plus pauvres du monde, et souffre de déficiences structurelles très graves. La plus grande partie de sa population lutte simplement pour sa survie. Beaucoup d'enfants vivent dans les rues, à tout âge. Port-au-Prince est une ville de plus de deux millions d'habitants sans station dépollution et dont les eaux usées se déversent dans la mer par des canaux à ciel ouvert. L'hôpital général attend depuis plusieurs années de réunir la somme de 10 000 Dollars pour remettre en état son groupe électrogène. L'électricité n'irrigue la ville que 12 heures par jour en moyenne. La sécurité physique est un souci constant pour tout visiteur. L'Etat est faible, représenté par des infrastructures trop peu nombreuses et trop peu organisées. Il n'y a pas de règles techniques de la construction traitant des problématiques sismiques ou cycloniques. Il n'y a pas de certification ni de traçabilité des matériaux. De l'aveu même des intéressés, la recherche géologique est endormie depuis près de 20 ans, et les cartes disponibles sont anciennes et obsolètes. Le fait sismique n'est pas perçu comme une réalité, et encore moins comme une menace, tant pour la population que pour la grande majorité des décideurs et des scientifiques. Il est vrai qu'il y a déjà fort à faire pour subvenir aux récentes et récurrentes catastrophes climatiques (cyclones, pluies torrentielles, sécheresse, désertification). Pourtant, à la veille du séisme tous les témoignages concordent pour assurer qu'un certain frémissement économique est palpable depuis peu. Un espoir de voir la situation générale s'améliorer se fait jour. Le festival international du livre et du film Etonnants Voyageurs a lieu pour la seconde fois à Port-au-Prince. On lit dans la presse française : « *les écrivains d'origine haïtienne ont remporté cette année une douzaine de prix internationaux, ce qui est impressionnant pour un pays qui a la même population que le Québec* ».



Figure 5 - Port-au-Prince avant le séisme

Haïti le 12 janvier 2010

Le séisme survient à 16h53 et la nuit tombe vers 17h. La capitale qui est aussi le principal centre économique de l'île est rapidement plongée dans l'obscurité totale. La circulation est quasi impossible dans les rues encombrées de gravats. L'air chargé de poussière est irrespirable. Le téléphone est coupé. Les hôpitaux et centres de décision sont paralysés. Ministres ou infirmières, tous sont touchés personnellement, ou dans leurs familles et connaissances proches. L'ONU qui occupe le pays à travers la MINUSTAH afin de maintenir une paix civile encore précaire, est elle-même décapitée, son quartier général effondré. L'ensemble de la population passe la nuit dans les rues, dans la terreur des répliques et parmi les cris des blessés.



Figure 6 - La nuit du 12 janvier 2010

Haïti le 13 janvier 2010

Le jour se lève vers 7h sur une vision d'apocalypse. Le pays ne dispose pas de moyens de secours (quelques dizaines de pompiers pour tout Port-au-Prince). L'aide extérieure ne peut être acheminée par les airs suite à l'endommagement de la tour de contrôle, et les quais du port ont été engloutis dans la baie avec leurs grues. Port-au-Prince est un indescriptible chaos. Aucune autorité nationale ou internationale n'est en mesure de faire un point de situation. Tout ce que le pays compte de responsables encore en vie sont occupés à porter secours à leurs proches. Ils sont souvent dans l'impossibilité physique de se rendre dans des centres de décision pour la plupart détruits, et aux routes d'accès obstruées. Il faudra plusieurs semaines pour se rendre compte de l'importance de la catastrophe, et finalement admettre qu'avec environ 230 000 tués il s'agit de l'un des tremblements de terre les plus meurtriers de tous les temps. Le pays est donc devant un défi sans précédent : déjà sans infrastructures avant la catastrophe, il devrait entièrement repartir de rien, mais n'est même pas en état de faire *tabula rasa* tant les dommages humains et matériels sont importants. Il faut à la fois défaire, refaire, réparer, et envisager un développement déjà hypothétique avant la catastrophe.



Figure 7 - Le 13 janvier 2010 - le Palais National, avant et après le séisme, symbole de l'impuissance de l'Etat

Haïti le 24 mai 2010

La mission AFPS arrive sur le sol Haïtien. Quatre mois après le séisme il n'y a aucun engin de déblaiement dans les rues de Port-au-Prince. La Présidence est hébergée dans une annexe de quelques dizaines de mètres carrés de la caserne Dessalines proche du Palais effondré. Le reste de la caserne est en ruines. Le Ministère des Travaux Publics, des Transports et des Communications est hébergé dans une grande villa des hauteurs de Delmas, qu'il partage avec son occupant initial, le Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics. Les responsables et décideurs éparpillés entre Delmas, Petionville et Port-au-Prince doivent utiliser de mauvaises routes encombrées pour se rencontrer. Un port de fortune est rétabli, tout comme la tour de contrôle de l'aéroport. Les ONG ont investi l'hôpital général. En pleine ville, la place du Champ de Mars héberge un camp de réfugiés d'environ 80 000 personnes. Le téléphone mobile fonctionne. Les reconstructions sont très rares, les démolitions et déblaiements se font manuellement. Les rues de la capitale sont redevenues cette fourmilière qu'elles étaient, et n'étaient-ce les scènes de désolation des bâtiments effondrés, la vie semblerait presque normale. De nombreuses organisations et quelques entreprises étrangères s'activent sur place, dans un bouillonnement désordonné et parfois un peu farfelu.



Figure 8 - Port-au-Prince le 24 mai 2010

2.2 Faits et chiffres d'Haïti

Informations générales :

Langues Officielles	Français Créole Haïtien
Capitale	Port-au-Prince (environ 2 500 000 hab. en 2009)
Villes importantes	Cap-Haïtien (environ 250 000 hab. en 2009) Jacmel (environ 170 000 hab. en 2009)
Forme de l'Etat	République
Superficie	27 750 km ²
Population	environ 9 035 000 hab. en 2009
Densité	352,3 hab./km ²
Monnaie	Gourde haïtienne (HTG) 1 HTG = 0.02 €
Fuseau horaire	UTC -5

PIB (valeurs 2009) :

	Haïti	Guadeloupe	Europe
PIB	9,3 Milliards €	8,51 Milliards €	11 315 Milliards €
Population	9 035 000	404 000	492 387 344
PIB par habitant	1 008 €/hab.	17 930 €/hab.	22 979 €/hab.

Education et santé :

	Haïti	Guadeloupe	France
IDH (2005)	0,53	0,91	0,95
Lits d'hôpitaux (par 1000 habitants)	1,33	5,50	5,27
Nombre d'écoles primaires	4 790 ⁽¹⁾	409	55 700
Nombre d'écoles (par 1000 habitants)	0,53	1,01	0,85
Taux d'alphabétisation des personnes de plus de 15 ans	61%	90%	99%

(1)

Nombre officiel d'écoles primaires publiques : 479.

Selon les statistiques de la Fondation Haïtienne de l'Enseignement Privé (FONHEP), en 2000, seules 10% des écoles primaires sont publiques.

Le nombre total d'écoles dans le pays peut donc être évalué à 4790 écoles.

3. OBJECTIFS ET ENSEIGNEMENTS DE LA MISSION

Rédaction : Claude Hauss

Nombre de missions scientifiques, de coopération, humanitaires et commerciales, de tous pays se sont rendus en Haïti à la suite du séisme. Une importante infrastructure internationale de coopération et de maintien de l'ordre était déjà sur place auparavant, sous couvert de l'ONU notamment. Ces conditions ont permis qu'il existe aujourd'hui une abondante littérature sur ce séisme et ses conséquences. De nombreux rapports de tous niveaux techniques et de tous niveaux d'exhaustivité sont disponibles dans le domaine public, dont ceux de l'USGS et l'EERI.

L'objet de la mission de l'AFPS n'était donc pas de décrire de façon exhaustive tous les effets du séisme, au risque de plagier ce qui a déjà été fait par ailleurs, mais de se focaliser sur les sujets du moment au sein de l'association.

Ainsi par exemple, nos observations faites sur le port de commerce public, malgré tout l'intérêt qu'elles peuvent avoir pour l'ingénieur, n'ont-elles pas été développées dans le présent rapport, les conditions et le mécanisme de ruine des quais ayant déjà été observés par maints experts et décrits dans de nombreux autres documents. Nous n'avons donc pas jugé nécessaire, au vu de la faible plus-value que nous aurions pu apporter sur ce sujet, de le traiter à nouveau.

La mission post-sismique de retour d'expérience sur le séisme d'Haïti du 12 janvier 2010 s'est déroulée du 24 mai au 1^{er} juin. Cette date plutôt tardive était due aux conditions locales qui ne permettaient pas à l'AFPS une action plus proche de la date de la catastrophe. L'AFPS a estimée de son devoir de ne pas céder à la pression, et rester dans son rôle d'association scientifique, qui n'est pas celui de l'aide d'urgence, malgré l'existence d'un groupe de travail sur les méthodes de diagnostic d'urgence. Le chaos régnant sur place, dans un pays aux institutions gravement affectées, et dont la sécurité était sous contrôle d'une ONU elle-même durement touchée par le séisme, ne nous autorisait pas d'ajouter aux difficultés ambiantes celles d'une mission supplémentaire qu'il aurait fallu prendre en charge. Ces conditions ont d'ailleurs exigé la constitution d'une équipe de mission compacte, qui puisse être transportée dans deux véhicules, avec des chauffeurs professionnels et rompus aux dangers et arcanes de la circulation locale.

La mission a pu constater dès son arrivée le très faible nombre de démolitions ayant eu lieu depuis le séisme. Quasiment aucun engin de déblaiement n'œuvrait encore dans Port-au-Prince, et les bâtiments officiels étaient pour la plupart encore dans le même état que le 13 janvier au matin. Les reconstructions ou réparations de bâtiments endommagés étaient rarissimes, et nos observations donc très peu altérées par le temps écoulé depuis la catastrophe.

Les thématiques fixées par la feuille de route et leurs résultats sont exposés succinctement ci-après :

- Un volet géologique et sismologique : très fructueux, avec de nombreux enseignements et un questionnement particulier sur les effets de site et l'explication qu'ils pourraient apporter au « mystère » de la proximité de bâtiments semblables aux endommagements très différents ;
- Un volet sur les diagnostics d'urgence : très fructueux également, avec le test poussé de la méthode mise au point en Guadeloupe par le groupe de travail Diagnostics d'Urgence. La méthode technique va (encore) être améliorée, et surtout, les enseignements organisationnels extrêmement précieux ne pourront être ignorés ;
- Un volet vulnérabilité du bâti, aux enseignements intéressants sur les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité, et sur les incidences de la mauvaise qualité des matériaux et des procédés constructifs dans la genèse du risque ;
- Un volet réseaux et industrie assez limité, car assez peu d'éléments disponibles sur place, et beaucoup de difficultés d'accès ;
- Un volet risques systémiques n'ayant pu être traité, la situation du pays et de ses infrastructures ne permettant pas vraiment d'en tirer des observations en nombre suffisant ;
- Un volet retour d'expérience au profit des Antilles Françaises, zone sismique majeure du territoire national : il sera très fructueux dans les aspects sismologiques (pour les études comparatives), les diagnostics d'urgence (enseignements directement applicables) et la vulnérabilité (proximité de certains modes constructifs et de la morphologie de certains bâtiments, malgré une pondération à introduire du fait de l'absence de normalisation des règles de conception et de qualité des matériaux) ;

- Un volet retour d'expérience au profit d'Haïti : les propositions de l'AFPS pour une aide à long-terme au profit d'Haïti on pu être réajustées. En effet, seule une observation sur site permettait d'évaluer la pertinence de propositions faites a priori ;
- Contrairement à d'autres missions de l'AFPS, le volet sociologique n'a pu être traité, suite à un impondérable de dernière minute.



Figure 9 - Port de commerce public

Effets de la liquéfaction sur une mauvaise conception (absence de fondations profondes, absence de liaison entre fondations, poteaux en charpente ne reposant pas sur le sol mais sur un potelet en béton).

Le quai devant le bâtiment a totalement disparu.

Cette problématique traitée à maintes reprises n'a pas été redéveloppée dans le présent rapport.



Figure 10 - La vie reprend au milieu des ruines

Les déblaiements sont rares et souvent manuels : on fait la chaîne et on évacue pierre par pierre des bâtiments effondrés. Les observations faites près de 5 mois après le séisme sont très peu altérées par les modifications survenues depuis.

4. ASPECTS SISMOLOGIQUES ET GEOLOGIQUES

Rédaction : Jean-Marc Mompelat et Didier Bertil

4.1 Préambule

Les éléments qui suivent ont pour objet de faire un point le plus complet possible sur le séisme du 12 janvier 2010 en Haïti, en examinant le cadre sismotectonique dans lequel il s'est produit à l'échelle de la Caraïbe, de l'île d'Hispaniola et de la région de Port-au-Prince, ses caractéristiques (localisation, magnitude, accélérations au rocher, ...) et enfin ses principales manifestations (effets directs, effets de site, mouvements de terrain induits).

Ce travail de synthèse résulte d'investigations spécifiques conduites en Haïti dans le cadre de la mission AFPS, complétées par l'exploitation de diverses sources documentaires. Un des objectifs de la mission est précisément de caractériser les effets de site et les effets induits et d'apprécier dans quelle mesure ils contribuent à la répartition et à l'importance des dégâts sur le bâti.

Pour des raisons pratiques (durée de la mission, contraintes logistiques sur place), toute l'étendue de l'aire affectée par le séisme n'a pas été visitée. Les reconnaissances ont concerné les zones les plus accessibles et susceptibles d'être visitées dans la même journée depuis Port-au-Prince (Figure 11). Il s'agit donc d'une majorité de Port-au-Prince (jusqu'à l'aéroport au nord), de Pétionville et de la zone littorale jusqu'à Grand Goâve (incluant Carrefour et Léogane). Cette zone représente à peine 10% de l'aire la plus affectée par le séisme (correspondant à des intensités macrosismiques de VII à VIII, estimée grossièrement à 3000 km², cf. carte d'intensité Figure 31). Il s'agit en revanche des zones les plus sévèrement touchées (intensités supérieures ou égales à VIII).

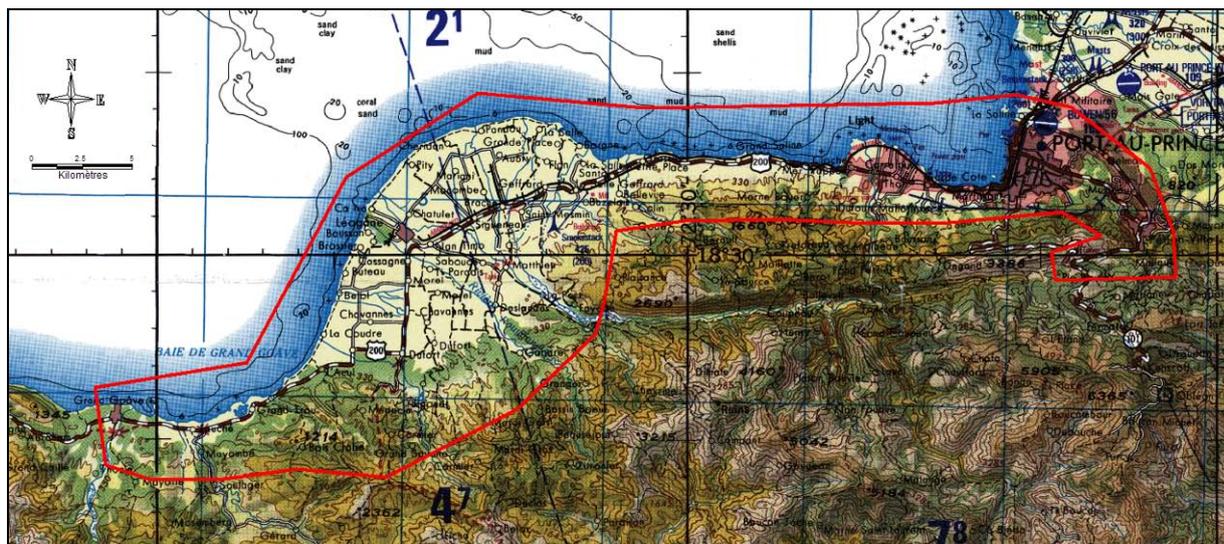


Figure 11 - Localisation approximative des zones ayant fait l'objet d'observations pour les aspects sismologiques et géologiques

4.2 Cadre sismotectonique

4.2.1 Contexte géodynamique régional

La tectonique régionale est gouvernée par un déplacement relatif latéral de la plaque Nord Américaine vers l'ouest par rapport à la plaque Caraïbe à une vitesse d'environ 2 cm/an (Figure 12). Ce déplacement est distribué sur plusieurs structures régionales qui bordent les plaques tectoniques et des microplaques distinctes comme la microplaque Gonave sur laquelle se situe Haïti. Le séisme s'est vraisemblablement produit sur le système de failles Enriquillo-Plantain Garden (EPGFZ) en bordure sud-est de cette microplaque.

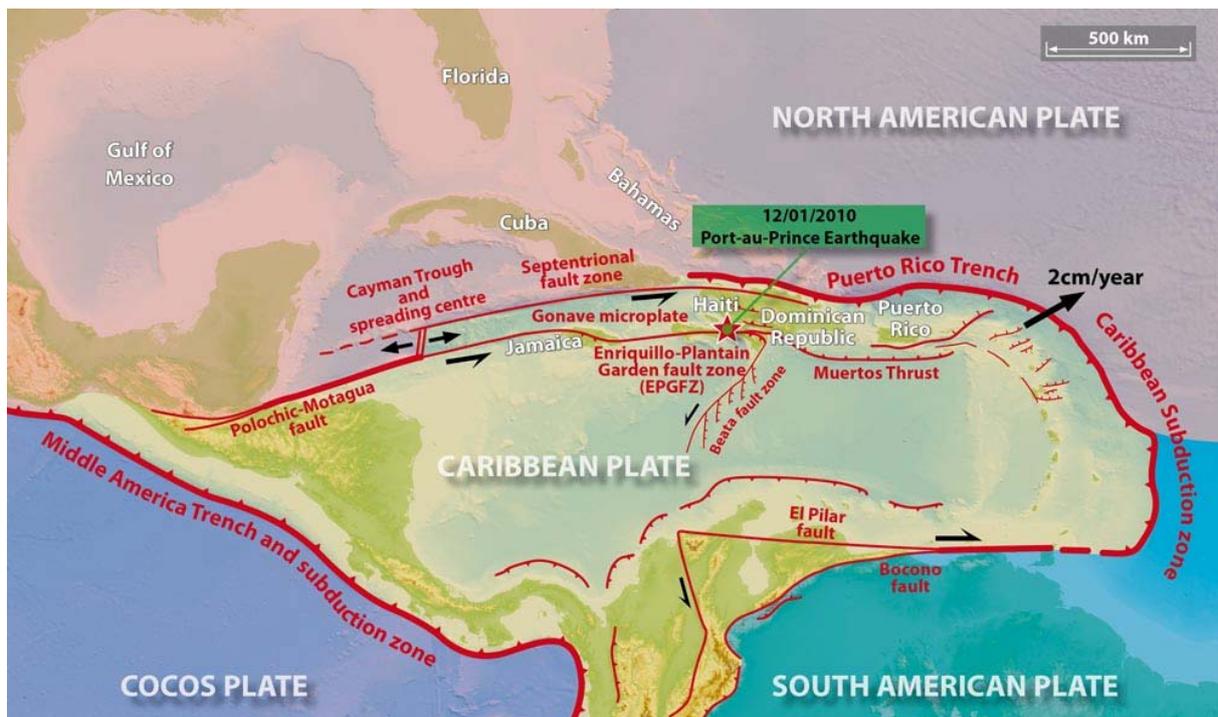


Figure 12 - Schéma simplifié des plaques tectoniques et principales failles. (Source : P. Tapponnier and Liow Hong San, EOS-Singapour, d'après N. Feuillet, Thèse, 2000. sur site www.ipgp.fr)

4.2.2 Le système de failles d'Enriquillo

Le système de failles EPGFZ traverse toute la partie Sud d'Haïti sur plus de 300 km entre Tiburon (à l'extrémité Ouest de la presque-île du Sud) et le lac Enriquillo en République Dominicaine. Vers l'Est, EPGFZ se prolonge en mer jusqu'à l'île de la Jamaïque (plaine de Plantain Garden). Vers l'Ouest de la frontière entre Haïti et la République Dominicaine, dans la plaine d'Enriquillo, la faille EPGFZ vient se terminer contre un front chevauchant, le front de Muertos qui passe ensuite en mer, au Sud de la République dominicaine.

La segmentation du système de failles EPGFZ est marquée par la présence de formations structurales complexes : bassins d'étirement (en pull-apart) comme dans la région Miragoane-Petit Goave, structures compressives (ou push up) comme le pic Macaya, plis et failles en échelon (Figure 13).

Entre Léogane et Pétionville, la faille EPGFZ est fortement marquée dans la topographie (Figure 14). A l'Est de Pétionville jusqu'au Lac Saumâtre, le tracé de la faille n'est plus aussi net, les structures en échelon sont plus prédominantes.

Le mouvement global sur ce système de faille est un mouvement décrochant sénestre accompagnant le glissement de la microplaque Gonave par rapport à la plaque Caraïbe. Le décalage des structures géologiques associé à ce mouvement décrochant serait de 30 à 50 km (Mann et al., 1995).

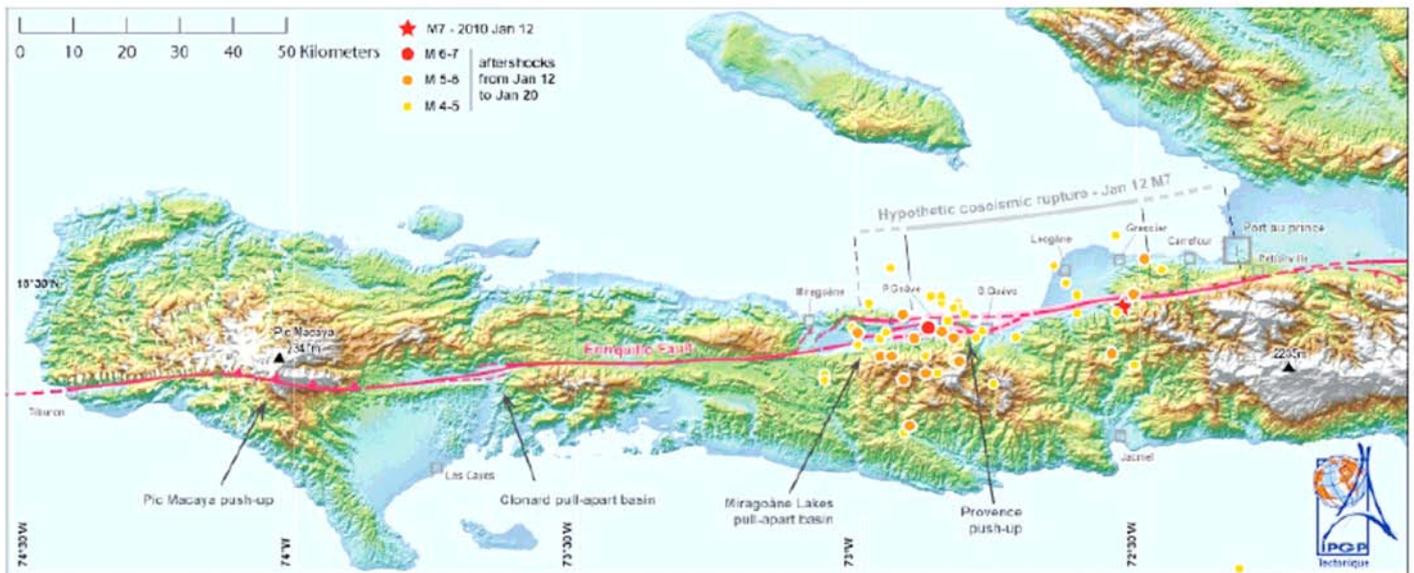


Figure 13 - Le système de failles EPGFZ sur la presqu'île du Sud.
Localisation du choc principal et des répliques d'après l'USGS
(Source : rapport IPGP de Lacassin et al., 2010 avec carte en partie d'après Mann et al. 1995)



Figure 14 - La faille EPGFZ entre Carrefour et Pétionville
Ce segment de faille n'a pas bougé lors du séisme du 12 janvier

4.2.3 Sismicité historique et instrumentale connue

La région d'Haïti a déjà connu des séismes majeurs capables d'engendrer des dégâts significatifs : destruction de Port au Prince en 1751 et 1770, destruction de Cap Haïtien en 1842 (Intensité IX-X, 5000 tués à Cap-Haïtien) accompagné de raz de marée, séismes de 1887 et 1904 dans le nord du pays avec dégâts majeurs à Port de Paix et Cap Haïtien, séisme de 1946 (magnitude 8.1) dans le nord-est de la République Dominicaine accompagné d'un tsunami dans la région de Nagua (Figure 15).

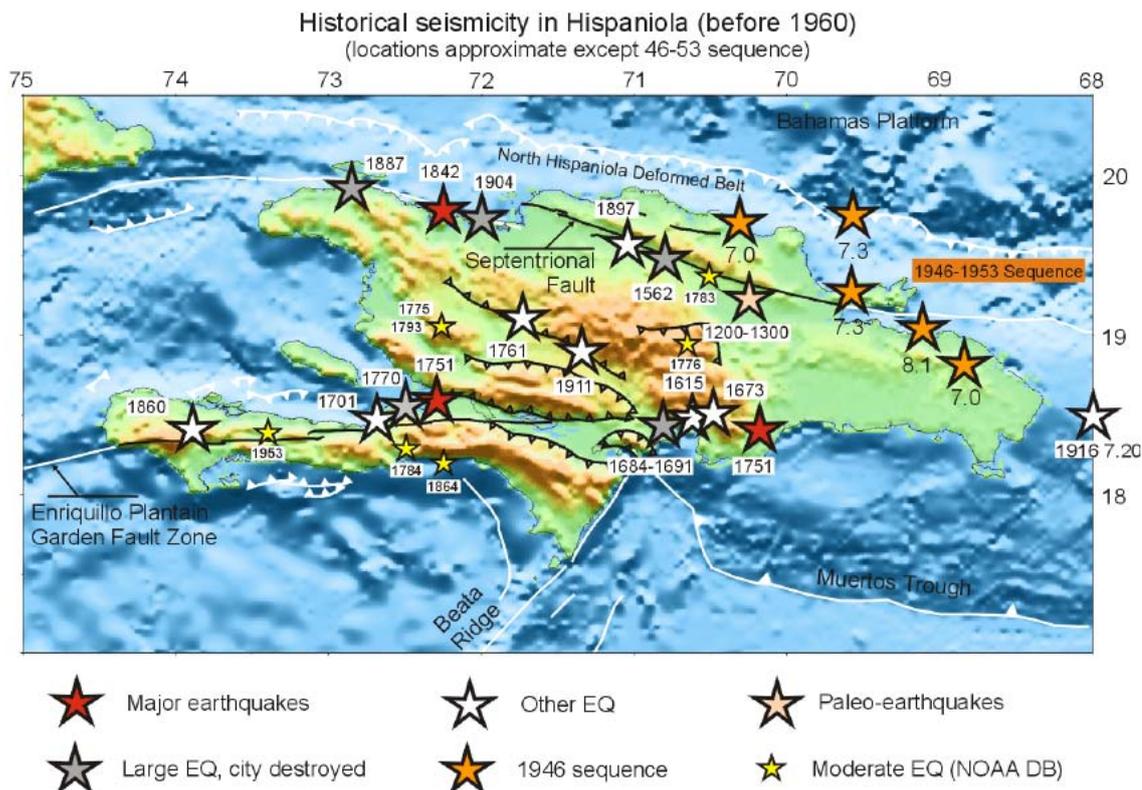


Figure 15 - Sismicité historique de l'île d'Hispaniola
Source : Eric calais (2002)

La partie Sud d'Haïti est aussi affectée par des séismes ressentis avec de fortes intensités. Les séismes historiques importants dans la région de Port-au-Prince et la presqu'île du sud sont représentés dans le Tableau 1: (Source : <http://www.sisfrance.net/Antilles/>) :

Date	Intensités maximales observées
9 novembre 1701	VIII Léogane VIII Plaine du Cul-de-Sac
21 novembre 1751	VIII Port-au-Prince VII-VIII Léogane
3 juin 1770	VIII Port-au-Prince VIII Carrefour VIII Léogane VIII Petit Goave
29 juillet 1784	VIII Petit Goave VII Léogane
8 avril 1860	VIII Anse à Veau VII-VIII Miragoane, Léogane VII Port-au-Prince
25 janvier 1953	VII-VIII Sault du Bord VII Anse à veau

Tableau 1 - Principaux séismes historiques sur la partie sud d'Haïti

La région de la Plaine de Cul-de-Sac, Port-au-Prince Léogane a été particulièrement affecté par de forts séismes au XVIIIème siècle avec des intensités VIII en 1701, 1751, 1770, 1784. Le séisme de 1770, plus fort que celui de 1751, aurait fait 250 morts à Port-au-Prince et 50 morts à Léogane. Le séisme de 1860 affecte plus la partie Ouest de la presqu'île. Le séisme de 1953 est le dernier séisme avec des victimes à Haïti (6 tués).

La sismicité instrumentale montre peu de séismes en Haïti depuis 1964 (Figure 16). Il y a d'une part peu de secousses ressenties :

- 2 séismes de magnitude mb 4.7 et 4.8 dans la région de Petit Goave/Port Royal le 28 avril 1990 ;

- 1 séisme de magnitude $m_b=4.3$ largement ressenti à Port-au-Prince le 11 mai 2005 (épicentre proche de Port au Prince).

D'autre part les séismes faibles à modérés (magnitudes inférieures à 4.5) ne sont pas captés du fait de l'absence de stations sismiques permanentes à Haïti.

En septembre 2008, plusieurs secousses sont ressenties à Port-au-Prince, non détectées par l'USGS et sans information ni sur la localisation ni sur la magnitude.

(source : <http://newsgroups.derkeiler.com/Archive/Soc/soc.culture.haiti/2008-09/msg00063.html>)

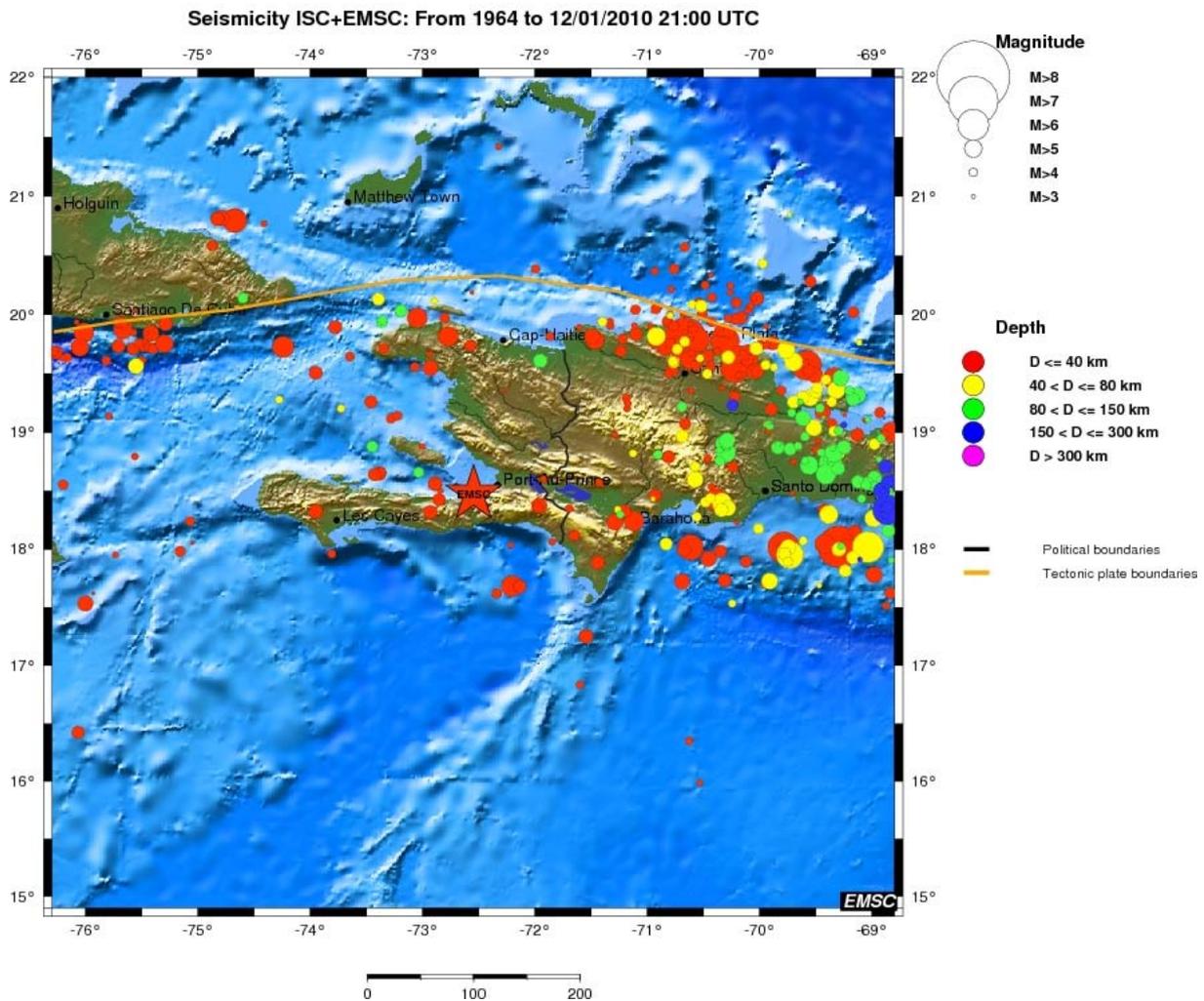


Figure 16 - Sismicité instrumentale de la région d'Haïti 1964-2009
(Source : CSEM, données ISC/CSEM)

Le risque sismique élevé à Haïti était connu du fait des nombreux témoignages historiques. Mais l'absence depuis le XIXème siècle de sismicité forte occasionnant des dommages ou des victimes a effacé la mémoire du risque auprès des populations.

4.2.4 Mesures GPS

A partir de 2003, un réseau GPS de 26 stations a été progressivement installé dans le sud d'Haïti sous la direction d'Eric Calais (Université de Purdue, USA), avec la collaboration de Bureau des Mines et de l'Energie (BME) et de la Direction de la Protection Civile d'Haïti. L'objectif était de mesurer la vitesse à laquelle l'énergie élastique, susceptible d'être libérée lors de séismes à venir, s'accumule au voisinage de la faille.

Une première analyse des vitesses sur ce réseau est effectuée après les relevés de mesures en 2007 (Cf. Figure 18 au niveau régional et Figure 17 vers Port-au-Prince, d'après Calais (2007)). Elle montre:

- une vitesse de déplacement de 17 mm/an vers l'Est de la côte sud d'Haïti par rapport à l'Amérique du Nord ;

- une diminution des vitesses de déplacement du sud vers le nord de Marigot à Cabaret (Figure 17). Le système EPGFZ de la Presqu'île du Sud accommode cette différence de déplacement soit un mouvement de 8 mm/an.

Calais en déduit que si le déficit de mouvement depuis le dernier séisme majeur en 1751 ($250 \text{ ans} \times 0.8 \text{ mm} \rightarrow 2 \text{ m}$) est rattrapé par un seul séisme, cela correspondrait à un événement de magnitude de l'ordre de 7.2. Le séisme du 12 Janvier 2010 ($M_w=7.0$) comble ce déficit mais sur un segment de faille de 40 à 50 km de long. **Sur les portions de faille qui n'ont pas joué, il faut supposer qu'il existe encore un déficit de mouvement aussi important à combler.**

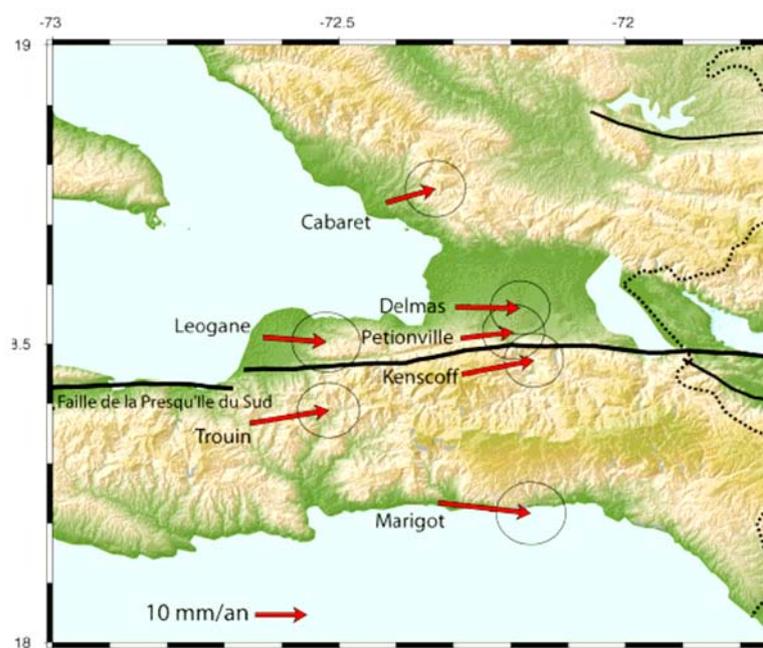


FIG. 3.1: Visualisation des vitesses de déplacement de sites GPS en Haïti. La longueur des flèches est proportionnelle à la vitesse mesurée, leur direction indique la direction du déplacement. Les ellipses indiquent l'intervalle de confiance de 95%. Les vitesses sont mesurées par rapport à la plaque Amérique du Nord (non visible sur la figure). Le trait noir montre la localisation de la faille de la Presqu'île du Sud.

Figure 17 - Vitesse de déplacement de sites GPS en Haïti
(Source Calais (2007))

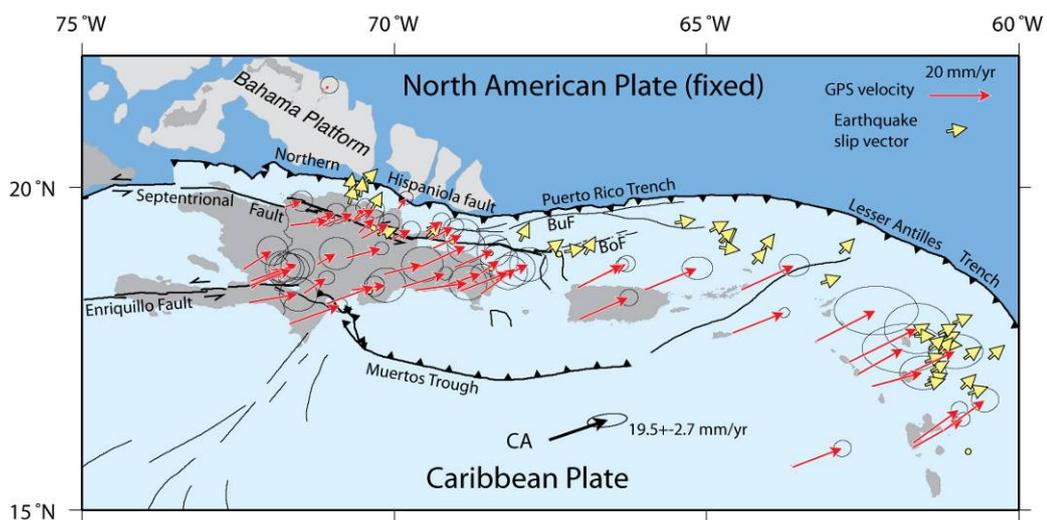


Figure 18- Vitesse de déplacement des plaques tectoniques
(Source E. Calais. <http://web.ics.purdue.edu/~ecalais/haiti/>)

4.3 Contexte géologique et géotechnique de la région de Port-au-Prince / Léogane

4.3.1 Cadre géologique

Différents ensembles morphostructuraux forment le territoire d'Haïti. Les quatre ensembles les plus méridionaux ont été plus ou moins directement affectés par le séisme. Du sud vers le nord, il s'agit de :

- la **Presqu'île du Sud**. Elle s'étend selon une direction générale est-ouest et est constituée d'une série d'anticlinaux déversés vers le nord. L'ensemble est parcouru par un réseau de failles qui souligne la direction structurale majeure de l'ensemble. La principale faille de cet ensemble morphostructural, est celle sur laquelle le séisme du 12 janvier s'est produit. Elle sépare deux sous-ensembles de part et d'autre d'un axe allant de Tiburon (à l'extrême ouest) à Pétionville (à l'est de Port-au-Prince) ;
- L'**anticlinal de l'île de la Gonave**, également de direction est-ouest ;
- La **Plaine de Cul-de-Sac**, à l'entrée de laquelle se trouve la ville de Port-au-Prince. Il s'agit d'un vaste synclinal comblé par des formations détritiques ;
- La **Chaîne de Matheux – Montagne du Trou d'eau**. Elle forme les reliefs limitant au nord la baie de Port-au-Prince et la Plaine du Cul-de-Sac, selon une direction générale nord-ouest / sud-est.

D'après la carte géologique d'Haïti à 1/250.000 (cf. extrait Figure 19) et sa notice (Bureau des Mines et de l'Energie, 2005), les principales formations géologiques présentes au sein de ces différents ensembles morphostructuraux et plus particulièrement au sein des zones les plus affectées sont les suivantes :

- le complexe tholéitique et sédimentaire de la Presqu'île du Sud (formation **Cb** de la carte dite « complexe de Dumisseau »), d'âge crétacé, avec une interstratification de coulées de lave et de formations sédimentaires diverses. Ce complexe forme la partie centrale de la presqu'île et n'affleure pas dans les zones les plus touchées du littoral et de Port-au-Prince. Il se présente sous la forme d'un faciès de remaniement à blocs (formation **Ca** de la carte), au sud de Léogane, notamment le long de la route nationale 4 menant vers la ville de Jacmel.
- Les calcaires du Paléocène supérieur – Eocène inférieur à moyen (**Ep**). Ils sont cartographiés au sud et au sud-est de Port-au-Prince. Il s'agit de calcaires blancs massifs ou stratifiés en bancs décimétriques.
- Les calcaires de l'Eocène moyen à supérieur (**Ems**). Il s'agit de calcaires massifs suivis de faciès en plaquettes. Ils arment les reliefs qui dominent la ville de Port-au-Prince ainsi que la région de Carrefour vers le sud.
- Le Miocène inférieur (**Mi**), essentiellement constitué de calcaires dans la Presqu'île du Sud. Il n'est pas cartographié aux abords immédiats de Port-au-Prince.
- Le Miocène supérieur (**Ms**) qui, dans la Presqu'île du Sud (et le Massif de la Selle plus précisément), est constitué de calcaires crayeux recouverts par des formations argilo-gréseuses. Cet ensemble forme le piémont constitué de reliefs « mous » présents à la base des pentes au sud de Port-au-Prince, jusqu'aux environs de Léogane vers l'ouest.
- Les formations détritiques du Pliocène (**P**). Elles occupent la quasi-totalité de Port-au-Prince où elles sont connues sous l'appellation « formation de Delmas ». Il s'agit d'un vaste cône d'épandage de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur alimenté depuis le secteur de Pétionville, avec des faciès plus ou moins grossiers.
- Les ensembles récents du Quaternaire (**Qa**), constitués pour l'essentiel d'alluvions fluviales et marines (l'essentiel de la Plaine du Cul-de-Sac notamment ainsi que la plaine littorale entre Port-au-Prince et Léogane) et de cônes d'épandage comme ceux de Carrefour et de Léogane.

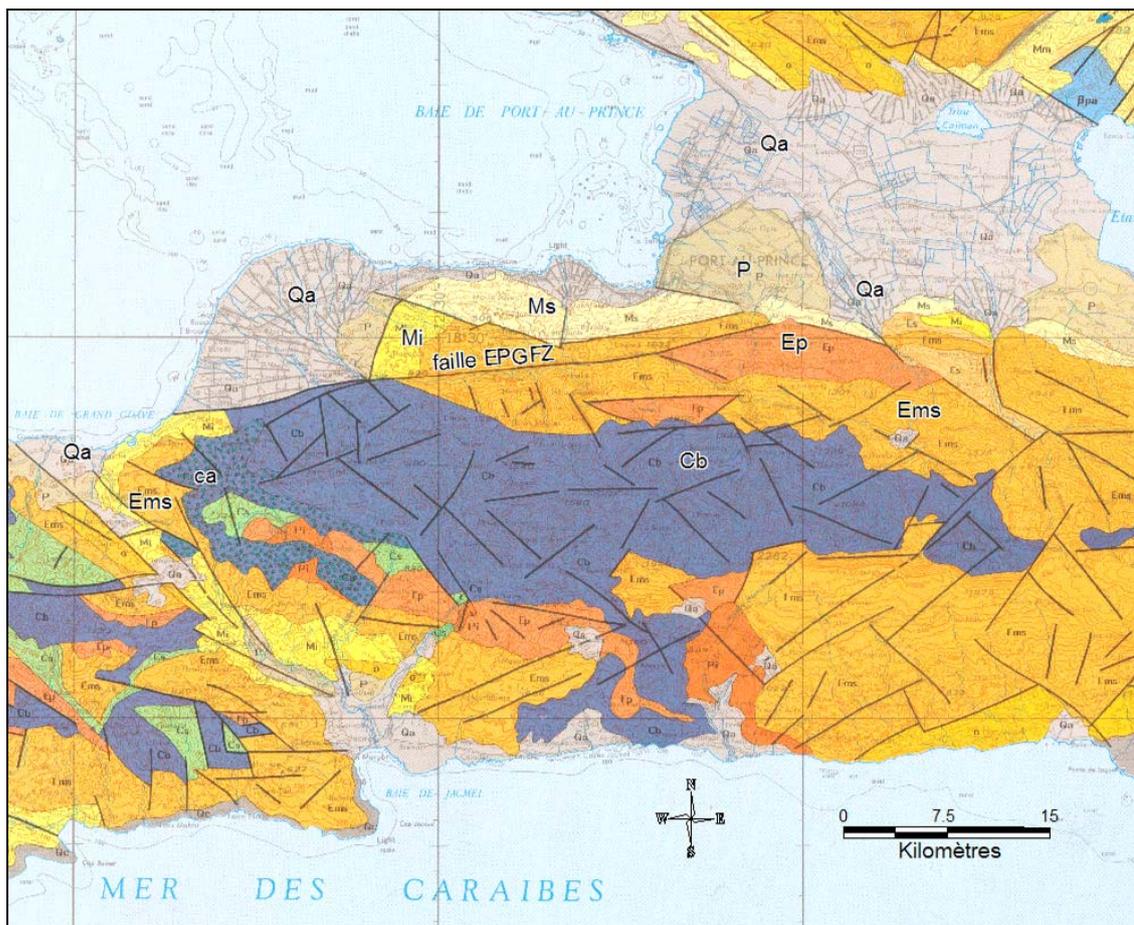


Figure 19 - Extrait de la carte géologique d'Haïti à 1/250000
(Légende dans le texte)

La Figure 20 permet d'apprécier l'organisation spatiale des différentes formations géologiques selon une coupe schématique N-S passant par Port-au-Prince, tirée de la notice de la carte géologique à 1/250.000.

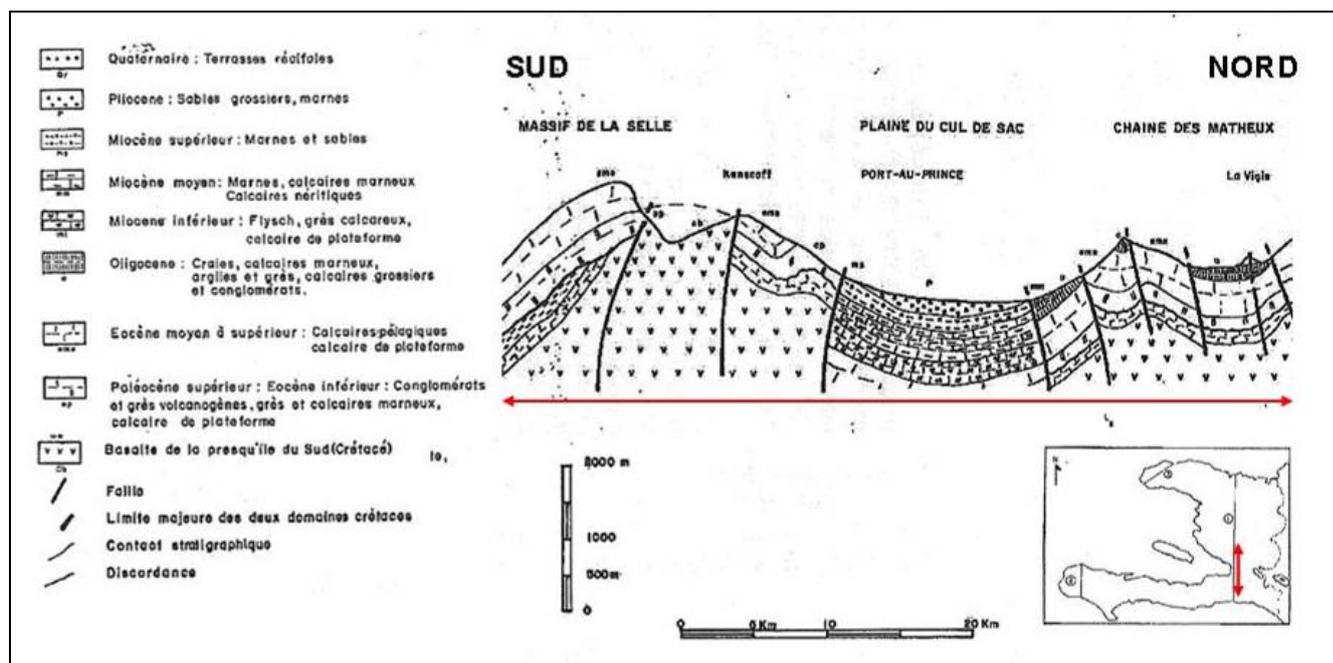


Figure 20 - Coupe géologique nord-sud passant par Port-au-Prince
(Recomposée d'après la notice de la carte géologique de Port-au-Prince à 1/250.000)

4.3.2 Caractérisation lithologique et structurale

Les zones les plus affectées par le séisme du 12 janvier concernent Port-au-Prince ainsi que la zone littorale allant de Port-au-Prince à Petit Goâve et Grand Goâve (à l'ouest de Leogane). Les formations géologiques concernées sont :

- les calcaires de l'Eocène moyen à supérieur (sur les hauteurs de Pétienville) ;
- les formations de piémont du Miocène ;
- la formation détritique de Delmas (Pliocène) ;
- les alluvions et cônes d'épandage du Quaternaire.

Il faut également considérer les remblais récents sur lesquels reposent une partie de la ville de Port-au-Prince.

Afin d'apprécier dans quelle mesure le sous-sol a pu moduler l'importance et la répartition de dégâts, il convient de caractériser autant que possible ces différentes formations du point de vue structural, lithologique et géotechnique.

La carte géologique d'Haïti au 250.000^{ème}, est la seule disponible dans la région de Port-au-Prince. La nature géologique des différents ensembles cartographiés de même les descriptions fournies dans la notice, traduisent une hétérogénéité lithologique intrinsèque. Un cône d'épandage par exemple peut présenter de grandes variations latérales et verticales de faciès, avec une géométrie des unités lithologiques conditionnée par le mode de mise en place de ces dépôts. Mais en raison de l'échelle de la carte, seuls les grands ensembles sont délimités. Aussi, aucune donnée détaillée n'est disponible sur les contours d'éventuels sous-ensembles lithologiques et structuraux.

Les investigations de terrain, menées lors de la mission AFPS, permettent d'apprécier en première approche cette hétérogénéité lithologique supposée. Dans un premier temps, une reconnaissance des principales formations et faciès géologiques de la zone de Port-au-Prince a été effectuée avec l'appui d'une géologue du BME, Mme Simone D'Emeza. Nous remercions vivement le BME d'avoir bien voulu nous faire bénéficier de cette expertise. Avec son aide, la formation de Delmas a pu être observée et décrite en plusieurs points, de même que des affleurements du Miocène et de l'Eocène. Une portion de la faille d'Enriquillo a aussi été observée sur les hauteurs de Pétienville.

Ces différentes observations ont ensuite été enrichies par des reconnaissances visuelles effectuées de manière autonome ainsi que par l'exploitation de données bibliographiques (en particulier Boisson et al, 2008). Il ressort de ces différentes investigations les principaux éléments suivants :

Les calcaires de l'Eocène

Les calcaires éocènes arment les sommets au sud de Port-au-Prince. Ils affleurent en haut de Pétienville et sont nettement visibles le long de la route qui va de cette localité à celle de La Boule.

Ces calcaires blancs sont compétents et se présentent en général en bancs rocheux de 10 à 20 cm d'épaisseur. Ils sont riches en fractures et diaclases ouvertes pouvant aller à un véritable broyage du calcaire au voisinage des failles majeures. Ce matériau broyé est utilisé dans la fabrication des bétons et plus particulièrement à Port-au-Prince il est usuellement appelé «sable». Dans le secteur de la Boule, au voisinage de la faille d'Enriquillo, plusieurs sites d'exploitation existent (dont plusieurs a priori illicites). L'un d'entre eux présente une excavation particulièrement impressionnante avec des parois sub-verticales de plusieurs dizaines de mètres de haut. Ce site a été fermé suite au séisme, pour des raisons de sécurité, en raison de l'instabilité des parois.

Selon Simone D'Emeza, les calcaires éocènes auraient été atteints par forage sous la formation de Delmas, lors des études géotechniques réalisées pour la construction de l'ambassade du Canada (donc probablement à une profondeur relativement faible). Mais elle n'a pu préciser cette profondeur.

Les formations de piémont du Miocène

Dans la région de Port-au-Prince, le Miocène présente une lithologie particulièrement variée : il comprend des marnes et sables (alternance de bancs de marne grise de la formation de la Rivière Grise), des calcaires marneux, des calcaires argileux en bancs décimétriques (matériau relativement friable) et enfin une grave

argileuse de couleur blanche comprenant parfois des niveaux détritiques grossiers ainsi que des conglomérats à éléments volcaniques.

Les talus et versants amont de la route nationale à l'ouest de Carrefour, illustrent parfaitement cette grande hétérogénéité sur un périmètre restreint (Figure 21).

Les différents affleurements au sein des versants de piémont au sud de Port-au-Prince (Carrefour Feuilles, Saint-Gerard, Desprez, Haut-Turgeau, ...), illustrent également cette grande hétérogénéité

Globalement, le Miocène forme un ensemble moins compétent que les calcaires Eocène avec un contact entre les 2 formations en discordance ou par l'intermédiaire d'une faille. L'épaisseur de la formation est variable et est estimée en moyenne à plusieurs centaines de mètres (Boisson et al., 2008).

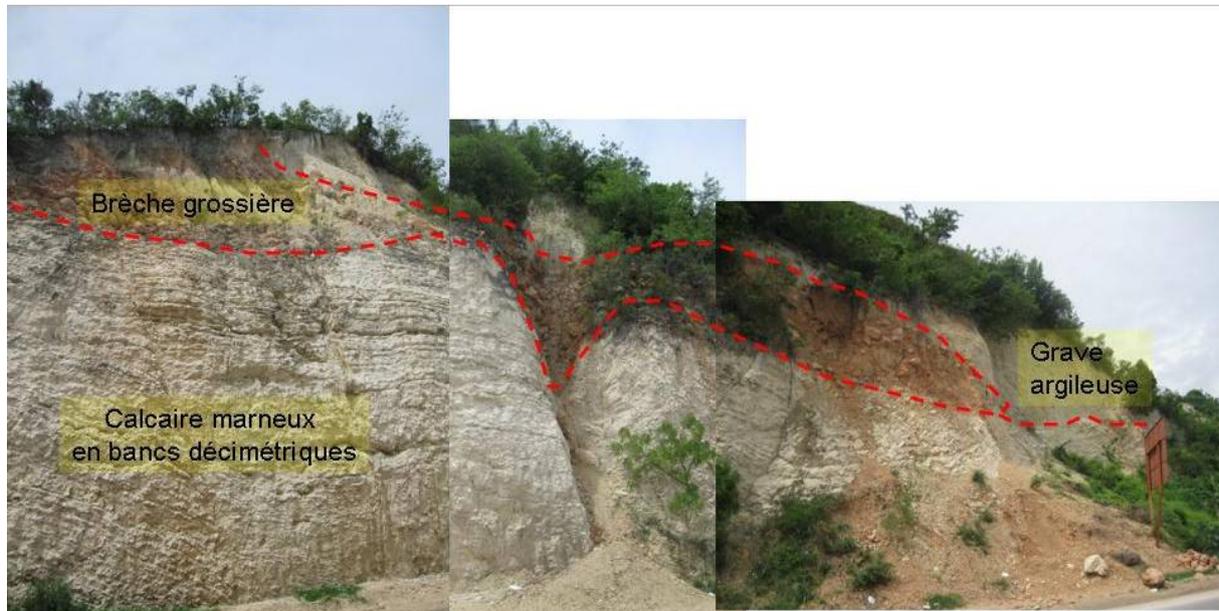


Figure 21 - Variations de faciès au sein de la formation Miocène de Port-au-Prince (Route nationale 2 à Gressier)

La formation de Delmas (Pliocène)

Les principaux faciès observés sont des argiles sableuses plus ou moins riches en niveaux graveleux. Leur épaisseur n'est pas connue mais peut être considérable. A Canapé-Vert (à l'est du centre ville de Port-au-Prince) par exemple, elle est présente sur l'ensemble du versant, soit sur au moins 100 à 150 m d'épaisseur. La formation de Delmas présente également des faciès grossiers avec un matériau constitué de l'accumulation de galets dans une matrice argilo-sableuse plus ou moins abondante. L'épaisseur et la répartition spatiale de ces formations plus grossières n'est pas connue. Elles se répartissent vraisemblablement de manière plus ou moins continue, le long d'anciens chenaux d'écoulement torrentiels qui se sont mis en place tout au long de la formation du vaste cône d'épandage que constitue cette formation. Ces ensembles se recoupent probablement latéralement et verticalement, selon une disposition globalement radiale depuis le secteur de Pétionville. Il s'agit de la source de la zone d'épandage au pied du secteur montagneux situé plus au sud.

Ainsi, il est tout à fait envisageable de passer latéralement, en quelques mètres, d'une formation conglomératique grossière et compacte de quelques mètres à quelques dizaines de mètres d'épaisseur, à des formations argilo-sableuses meubles. Ce type de changement de faciès est également possible verticalement sur la totalité de la formation de Delmas, dont on rappelle qu'elle est épaisse de plusieurs centaines de mètres.

Ces caractéristiques font de la formation de Delmas, une entité lithologique et structurale relativement complexe.

Le Quaternaire

Il s'agit d'un remplissage récent de la plaine du Cul de Sac et des zones littorales par les produits de l'érosion des reliefs avoisinants. Au sein de la plaine de Cul de Sac les dépôts sont grossiers à fins et atteignent des épaisseurs considérables de l'ordre d'une centaine de mètres (Boisson et al. 2008). Cette épaisseur diminue aux abords de la formation de Delmas.

L'agglomération de Carrefour ainsi que la plaine de Léogane correspondent à des cônes d'alluvions dont les caractéristiques sont sans doute proches de celles de la formation de Delmas (toutes proportions gardées).

Les zones côtières, entre Carrefour et la plaine de Léogane, ainsi qu'à l'ouest de celle-ci, sont souvent en contexte de mangrove ou d'arrière mangrove. Elles sont donc a priori constituées de formations d'argiles molles, de vases et de sables fins. Leur épaisseur n'est pas connue. La route nationale 200 est le plus souvent située au sein de ces formations.

C'est probablement le cas du soubassement des zones basses proches du rivage à Port-au-Prince, le contexte étant a priori équivalent. C'est par exemple ce que montrent les sondages réalisés pour la construction du port de cabotage en 1979 (Laraque et Ennequin, 1979) (Figure 22).

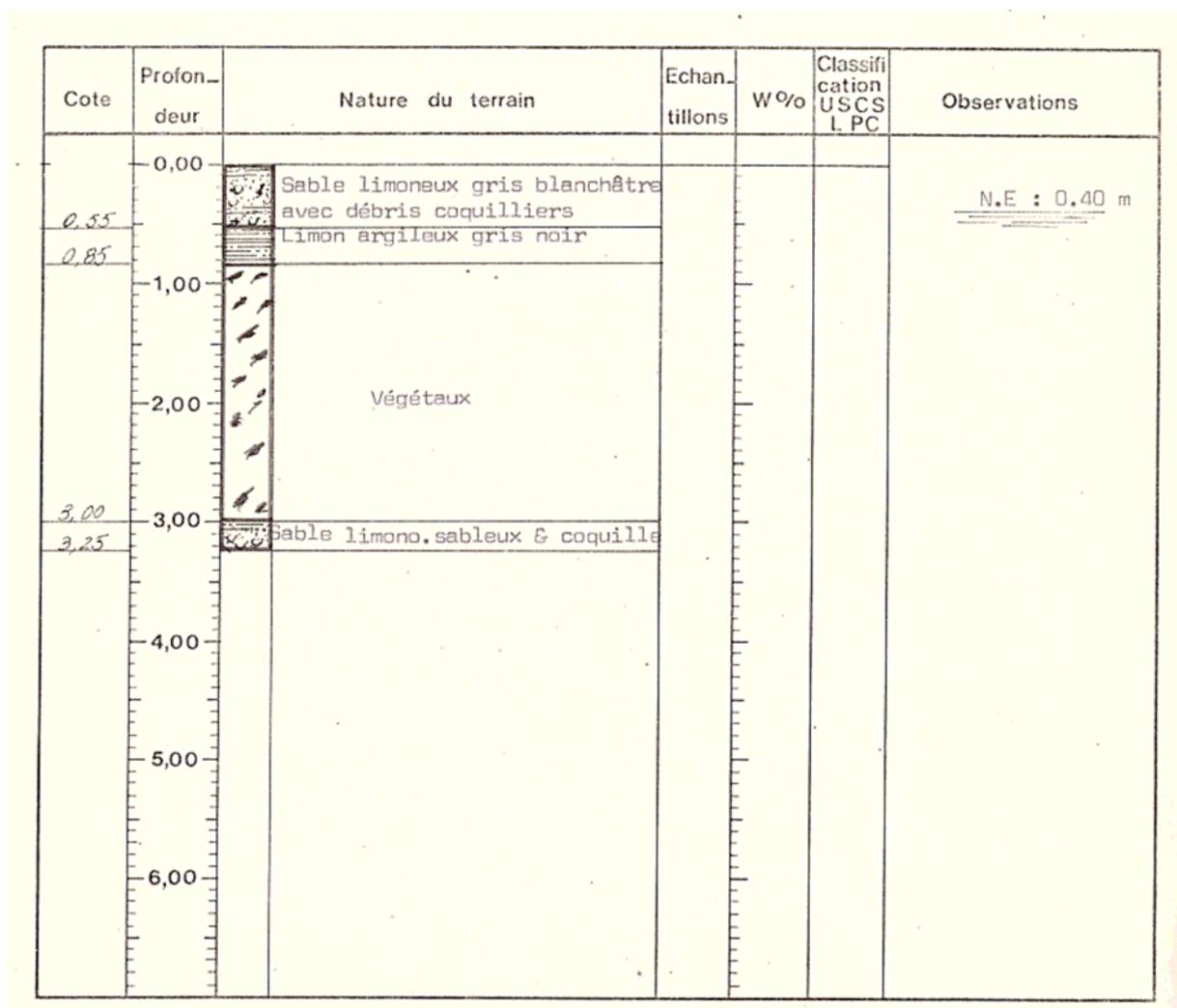


Figure 22 - Extrait d'une coupe sondage à la tarière réalisée sur le port de cabotage de Port-au-Prince en 1979 (Laraque et Ennequin, 1979)

Les remblais récents

Dans la région de Port-au-Prince, de nombreuses zones ont fait l'objet de remblaiement récent (depuis plusieurs dizaines d'années jusqu'à aujourd'hui). Ainsi, la ville de Port-au-Prince a régulièrement gagné sur la mer. Mais peu ou pas de données sont disponibles sur l'organisation spatio-temporelle de ces

remblaiements. Il en est de même concernant la nature des matériaux utilisés, leur épaisseur, les modalités de leur mise en œuvre et aussi la nature du substratum.

Ainsi par exemple, d'après plusieurs témoignages, le rivage était il y a quelques dizaines d'années au pied de la Cathédrale Notre-Dame. Or, celle-ci est aujourd'hui à 1 km du rivage actuel. A priori, ce serait pour la commémoration en 1954 du cent-cinquantième de la république d'Haïti, que les autorités auraient décidé d'étendre le centre ville en gagnant sur la mer (Figure 23).

Plus récemment, des quartiers d'habitat précaire (Cité L'Eternel et Cité Soleil par exemple) se sont développés de manière spectaculaire, sur d'anciennes décharges qui se sont mises en place en progressant sur la mer (Figure 23).

Il convient d'ajouter que la mise hors d'eau des terres basses a été facilitée au fil du temps, par d'importants apports terrigènes liés à la forte érosion des versants drainés par les cours d'eau de Port-au-Prince et de ses environs.

Enfin, le développement portuaire de Port-au-Prince s'est également réalisé en partie sur la mer et se poursuit encore de la sorte.

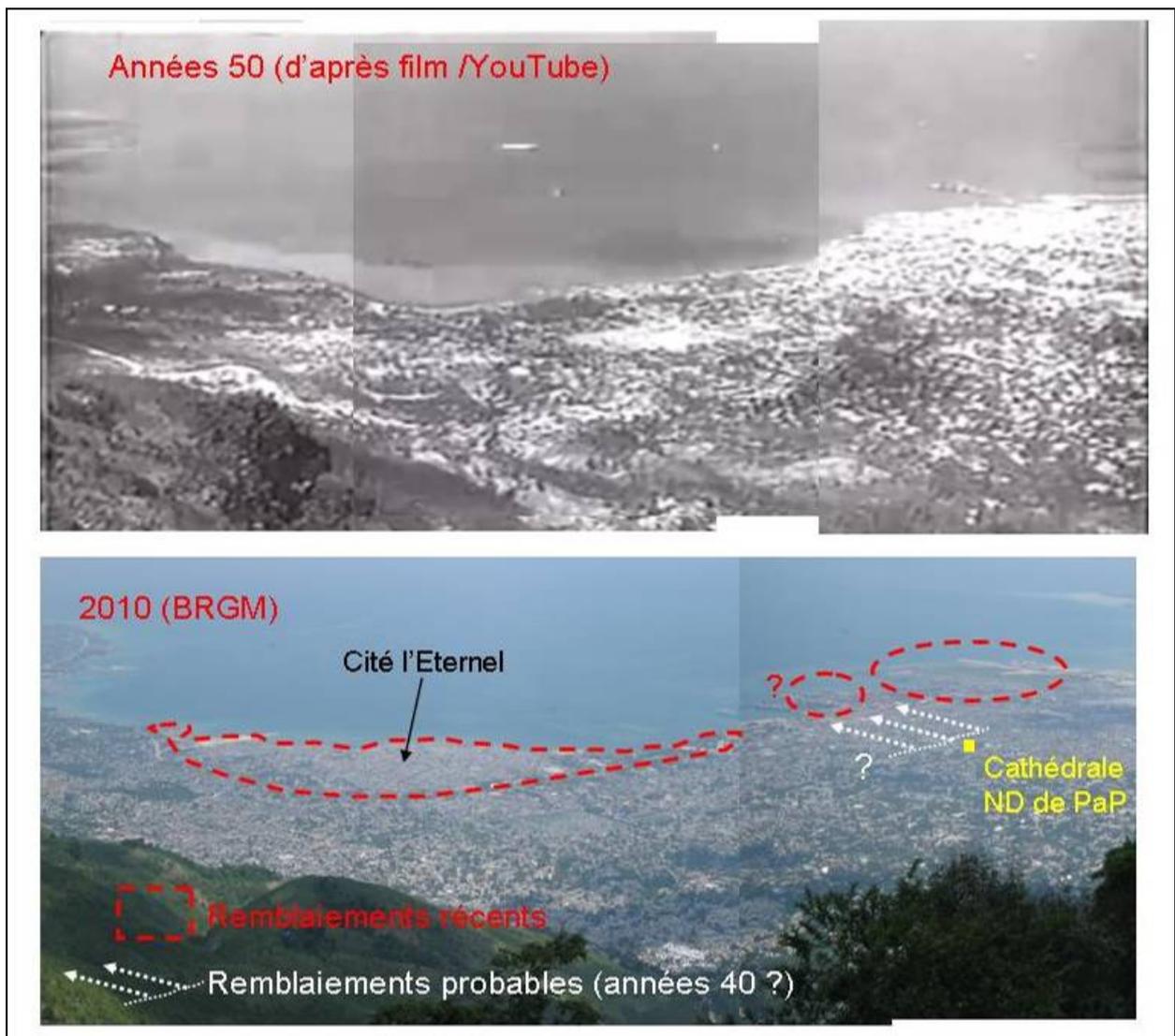


Figure 23 - Zones de remblai à Port-au-Prince

La carte géologique de Port-au-Prince du GEER

L'équipe américaine du GEER (Geo-engineering Extreme Events Reconnaissance) a conduit une première mission en Haïti en février 2010 (Rathje et al. 2010). Une seconde mission a été mise en œuvre en avril. Elle a eu pour but de compléter par des observations de terrain et des mesures SASW, l'établissement d'une carte géologique de Port-au-Prince à grande échelle, établie essentiellement à partir d'une analyse de la topographie et de la morphologie de surface. Ce document a été présenté par Bachhuber et al. lors d'un séminaire organisé à Saint-Domingue en juillet 2010 et photographié à cette occasion (Figure 24).

Ce travail est intéressant dans le sens où il cherche à mettre en évidence des sous-unités au sein des formations géologiques connues (notamment la formation de Delmas). En ce sens, il ouvre des perspectives dans la compréhension de la répartition des effets de site. On doit cependant émettre quelques réserves quand à la définition et au positionnement des limites de zones qui ne reposent pratiquement que sur la morphologie de surface.

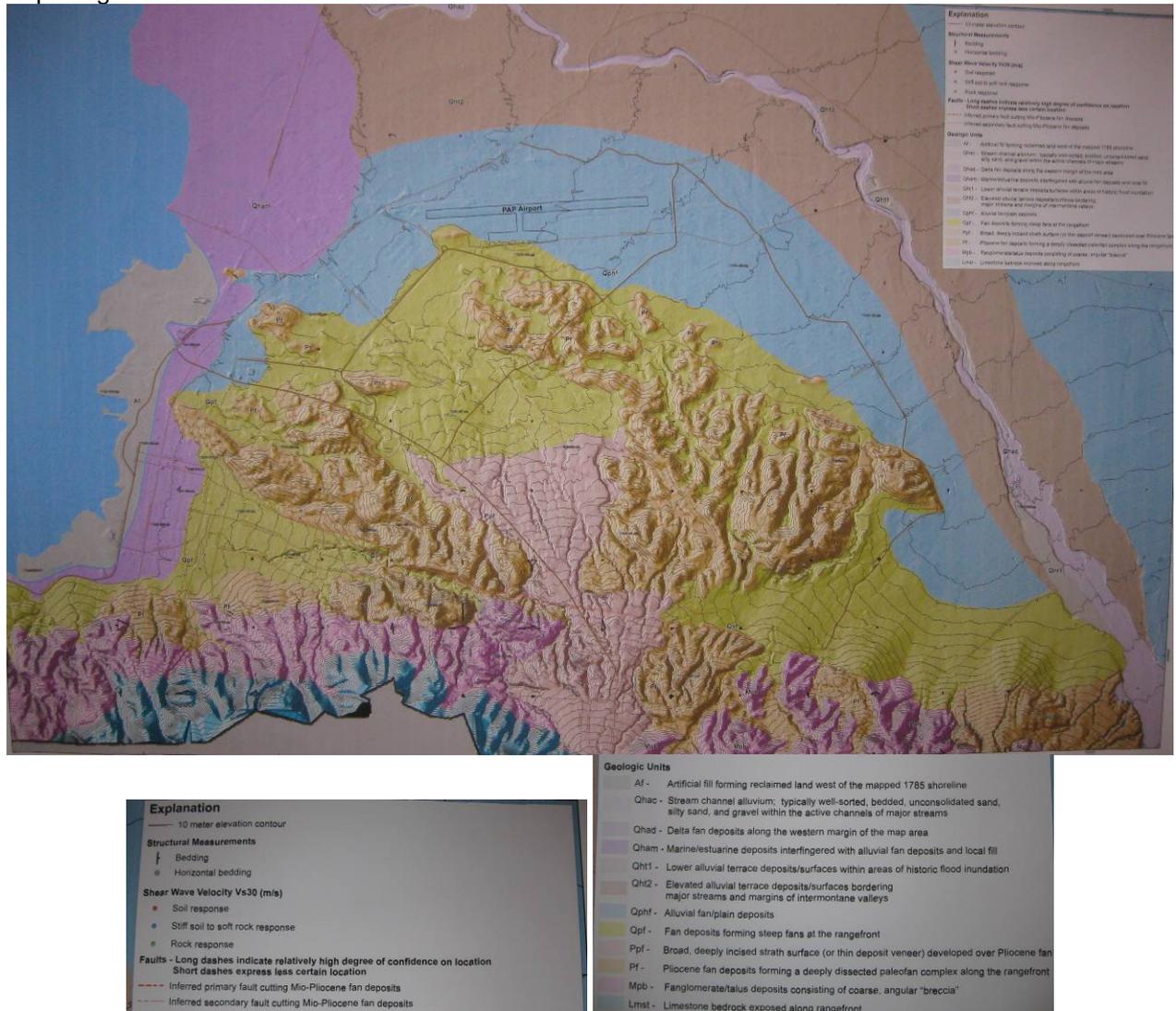


Figure 24 - Carte géologique de Port-au-Prince établie par le GEER (Bachhubert et al., 2010)

4.3.3 Données géotechniques disponibles

Il n'existe pas en Haïti de base de données nationale (telle que la Banque de données nationale du Sous-Sol – BSS - gérée en France par le BRGM) permettant de rassembler les informations sur le sous-sol, aussi bien pour la géologie, l'hydrogéologie et la géotechnique. L'environnement juridique et réglementaire qui permettrait l'instauration d'une telle base, n'existe pas. Il n'existe a priori pas non plus de cadre réglementaire (national ou issue d'une organisation professionnelle locale) permettant de cadrer les études de sol (à l'instar de la norme AFNOR NF P 94-500 utilisée en France).

Aussi, il est très difficile aujourd'hui de disposer d'informations géotechniques sur le sous-sol. Le plus souvent, il n'est pas possible de savoir si une étude a été réalisée préalablement à l'édification d'un bâtiment donné. Et lorsqu'une étude a été réalisée (en particulier si elle est ancienne), il est difficile voire impossible d'y avoir accès et donc de pouvoir analyser et valoriser son contenu. C'est le cas par exemple au port commercial de Port-au-Prince, affecté par de spectaculaires phénomènes de liquéfaction.

Ce qui précède vaut pour les études réalisées dans un cadre privé. De nombreuses études de sol ont été réalisées par le LNBTP (Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics), établissement public

dépendant actuellement du Ministère des travaux Publics. Ces études ont été réalisées depuis 1976 pour des Maîtres d'Ouvrage aussi bien publics que privés. Les rapports d'étude sont pour l'essentiel référencés et archivés. Ce sont ainsi 408 rapports qui sont répertoriés entre 1976 et 2006 pour le Département de l'Ouest comprenant Port-au-Prince (LNBTP, 2006). Ce chiffre est à comparer aux dizaines de milliers de bâtiments présents dans la zone.

Le LNBTP s'est lancé dans une démarche de numérisation de ces rapports afin de faciliter leur exploitation. Deux CD-ROM totalisant 273 rapports ont été remis à la mission AFPS. La procédure de numérisation se poursuit et le LNBTP n'a pas indiqué d'échéance pour achever ce travail. Il conviendra à terme de le compléter utilement en créant une véritable base de données, incluant un géo-référencement des études et une description de leur contenu. **Un tel travail serait particulièrement utile dans la perspective de la reconstruction.**

Dans le cadre de la mission AFPS, même pour mieux appréhender les effets de site, il était matériellement impossible d'envisager de valoriser les rapports géotechniques fournis. Un travail de valorisation des données géologiques et géotechniques existantes, complété par des reconnaissances spécifiques, a été réalisé lors d'un « projet pilote de support géotechnique des zones habitables de Port-au-Prince » dans le cadre d'une collaboration universitaire et institutionnelle entre Haïti et la Belgique (Boisson et al., 2008). Il concerne une zone encore assez peu peuplée à l'est de Port-au-Prince (zone de Pernier – Dumay). Ce projet vise à terme à fournir des documents d'orientation géotechniques aux aménageurs et constructeurs. Il est de ce point de vue particulièrement prometteur dans le contexte haïtien d'avant et a fortiori d'après séisme du 12 janvier.

Cependant, les données valorisées concernent une tranche relativement superficielle des sols (en général 10 m à plus localement) et ne sont pas pleinement satisfaisantes quantitativement et qualitativement, pour permettre de comprendre ou de modéliser les effets de site. Par ailleurs, la zone couverte est éloignée des secteurs très affectés par le séisme à Port-au-Prince et les résultats obtenus ne sont pas transposables.

4.4 Événement du 12 janvier 2010

4.4.1 Choc principal et répliques

Le séisme se produit le 12 Janvier à 16h 53 heure locale. L'épicentre se situe à environ 9 km de Léogane, 15 km de Carrefour, 23 km de Port au Prince d'après les localisations de l'USGS (United States Geological Survey) et du CSEM (Centre Sismologique Euro-Méditerranéen) (Tableau 2, Figure 25).

Agence	Heure origine (TU)	Latitude	Longitude	Profondeur	Magnitude Mw
USGS	21 :53 :10.1	18.457	-72.532	13 km	7.0
CSEM	21 :53 :10.4	18.47	-72.55	10 km	7.1

Tableau 2 - Localisation du choc principal (USGS / CSEM)

En l'absence de réseau sismique local, la localisation est donnée par les organismes internationaux, à partir de stations sismiques éloignées. La station la plus proche ayant enregistré le séisme est située en république dominicaine à environ 145 km de l'épicentre (station SDDR). Il en résulte une certaine imprécision sur la localisation, visible avec la forte dispersion de la position des répliques et une différence de 2.5 km entre les positions du choc principal calculées par l'USGS et le CSEM (Figure 25 et Tableau 2).

Sur la Figure 25, les principales localités mentionnées dans le texte sont représentées par des carrés jaunes. Les traits noirs indiquent la position des segments supposés du système de failles EPGFZ d'après la carte géologique. Entre Pétionville et le lac saumâtre, le tracé de EPGFZ est nettement moins marqué par rapport aux formations géologiques en place (trait pointillé). Le mécanisme au foyer représenté est celui de l'USGS.

La magnitude est estimée à 7.0 (Magnitude de moment Mw, USGS). Ce séisme est donc moins fort que celui qui a frappé la Martinique en Novembre 2007 (Mw= 7.4), mais beaucoup plus superficiel (10 km de profondeur au lieu de 150 km pour celui de 2007), il est beaucoup plus destructeur.

Le mécanisme au foyer indique un mouvement décrochant senestre avec une composante en chevauchement selon une direction N251° avec un pendage du plan de faille de 70° vers le Nord (CMT-Harvard Tenseur des moments) (Figure 25)

Le choc principal est suivi 7 minutes après de la plus forte réplique, de magnitude 6.0 (épisode située vers Petit Goave) et d'une autre de magnitude 5.7, 20 minutes après. Au total, on compte 14 fortes répliques de magnitude entre 5.0 et 6.0 dans les premières 24 heures. Par la suite, une seule réplique dépasse la magnitude 5 le 20 janvier (Mw 5.9 vers Petit Goave). La Figure 26 montre la répartition dans le temps des répliques à partir des données USGS et du réseau temporaire du Geological Survey Canadien (cf 4.5.2). A partir de mars, les magnitudes des répliques dépassent rarement 3.0 et ne peuvent être détectées que par les stations temporaires installées sur place.

Les répliques se répartissent sur une distance de 60 km environ dans une zone située entre les villes de Gressier et Petit Goave (Figure 25). Il y a beaucoup de répliques sur la partie Ouest vers Petit Goave et peu à l'Est de l'épicentre.

La répartition des répliques est très diffuse, notamment sur la partie Ouest de la zone de rupture. Cela est dû en partie à l'imprécision des localisations. Cependant, la zone de Petit Goave correspond à la jonction de deux segments EPGFZ séparés par un bassin d'étirement en pull-apart. La carte géologique indique également dans cette zone, des accidents d'orientation NO-SE qui peuvent avoir joué suite au choc principal. Les mécanismes au foyer des 2 principales répliques dans cette zone (13 janvier et 20 janvier) sont différents de celui du choc principal et indiquent des mouvements en compression sur un plan N110° ou N290.

Des travaux en cours (E. Calais et al., 2010) émettent l'hypothèse que la rupture n'a pas eu lieu sur la faille Enriquillo elle-même mais sur une autre faille sub-parallèle non cartographiée.

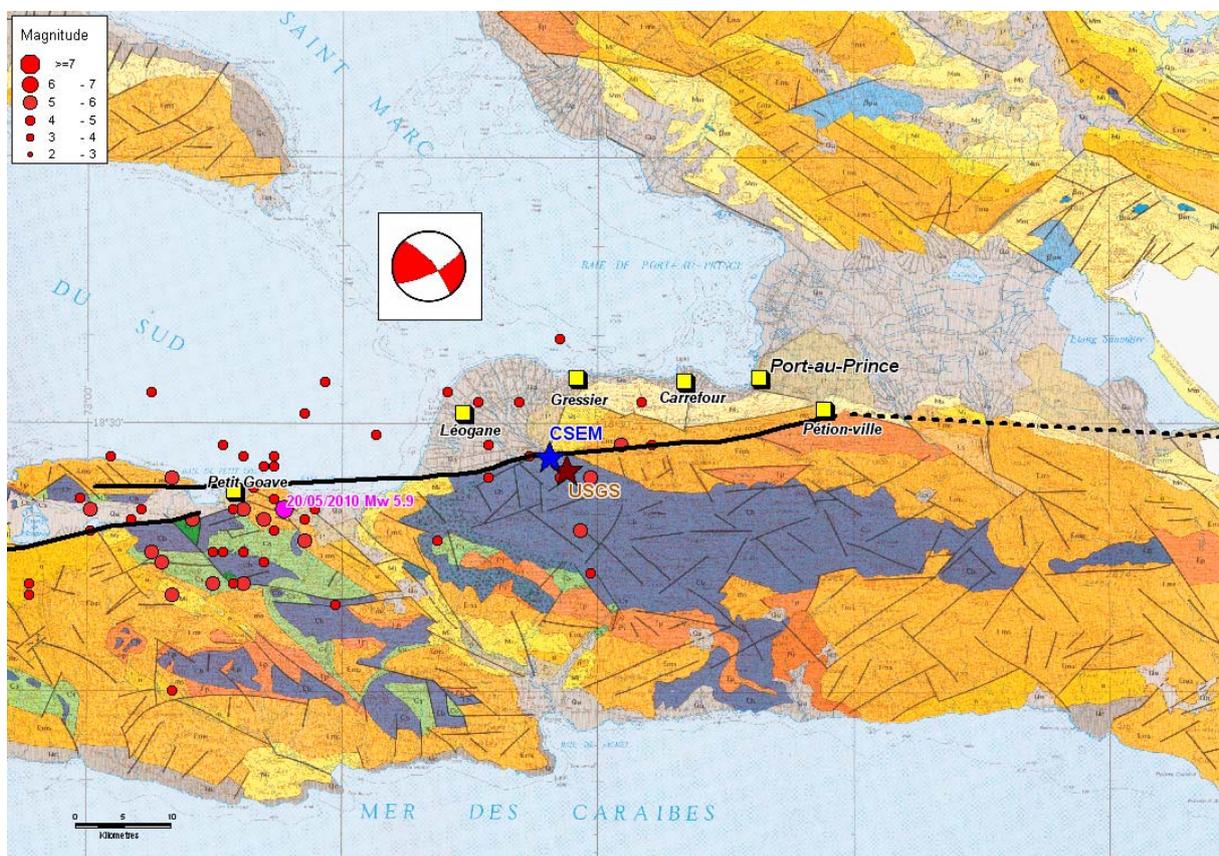


Figure 25 - Epicentres du choc principal et des répliques entre le 12 et le 24 Janvier (NEIC/USGS). Fond : carte géologique d'Haïti 1/250000 1987

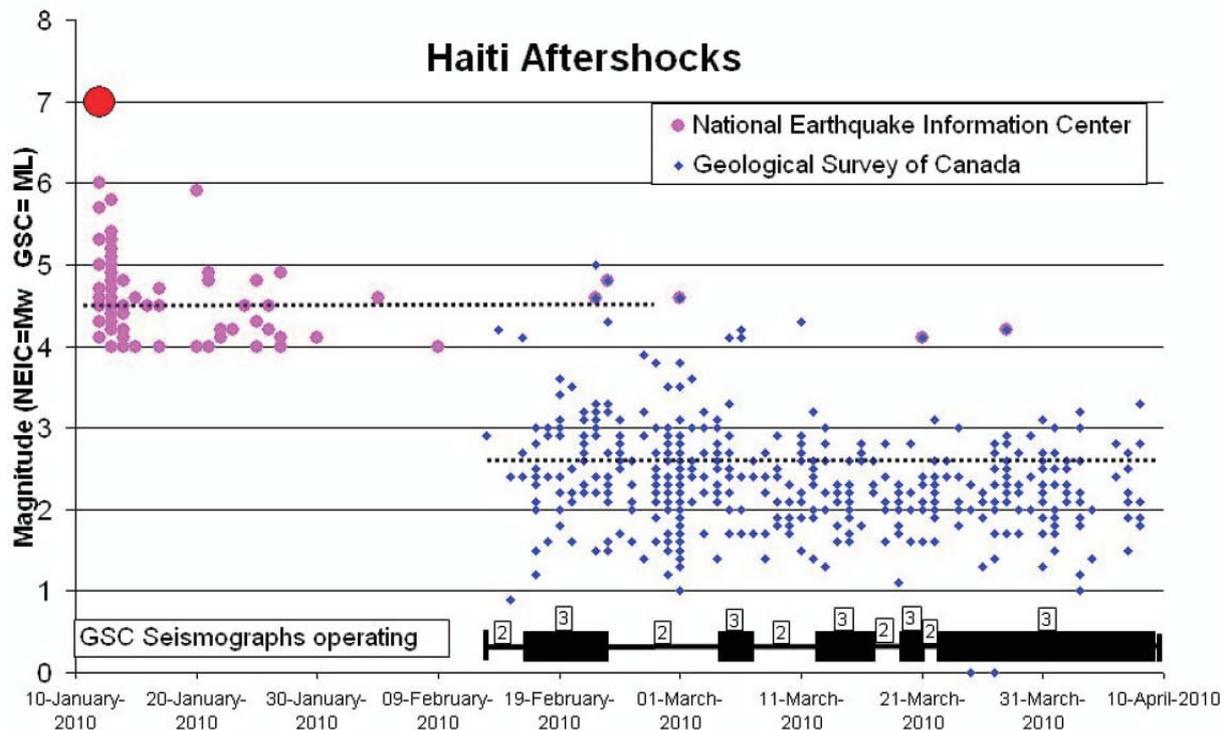


Figure 26 - Répliques sur la période 12 Janvier - 10 Avril
(NEIC/USGS et Geological Survey of Canada)

4.4.2 Mécanisme de rupture et interférométrie

Le mécanisme de rupture illustré sur la Figure 27 résulte d'une inversion de données télésismiques effectuée par A. Sladen du Californian Institute of Technology (Caltech). Le plan de faille est pris sur une direction de 262° avec un pendage de 70°. Sur la figure, les couleurs montrent l'amplitude du glissement, les flèches blanches indiquent la direction du mouvement. Les contours correspondent à la propagation du front de rupture et l'étoile rouge indique la position de l'hypocentre.

La rupture s'est propagée vers l'Ouest et vers la surface à partir de l'hypocentre. Le glissement est principalement décrochant senestre avec une composante de compression significative.

La rupture se concentre principalement sur un segment de 20 kilomètres de long avec des glissements maximum de 4 m.

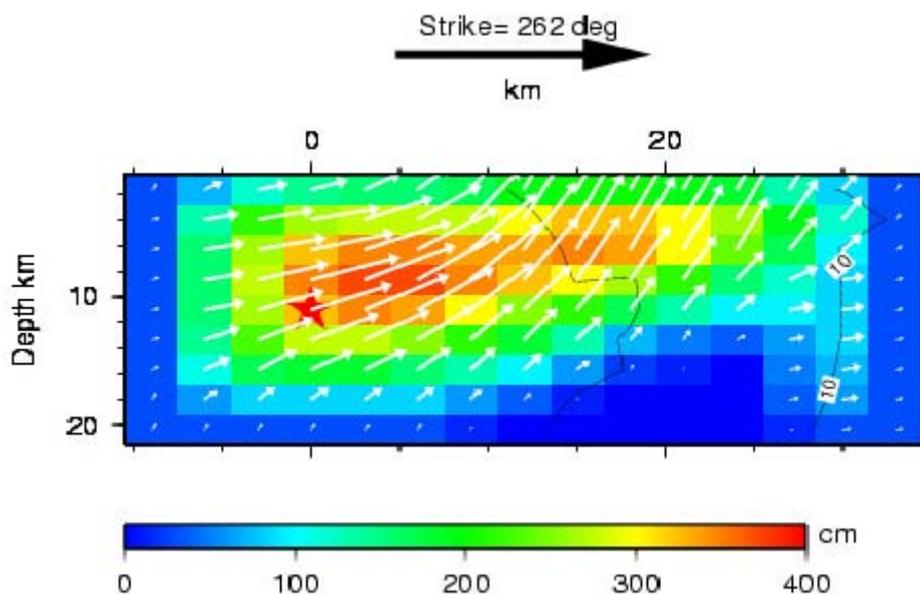


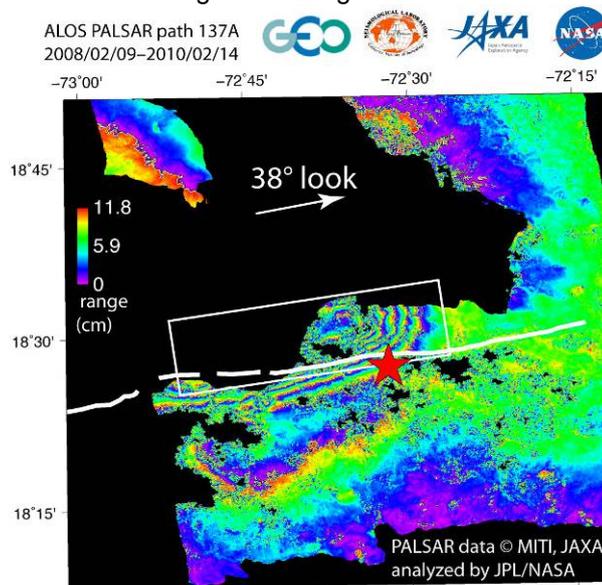
Figure 27 - Distribution du glissement sur le plan de faille dérivée de données télésismiques
(source http://tectonics.caltech.edu/slip_history/2010_Haiti/)

Le traitement interférométrique d'images radar satellitaires (avant et après un séisme) permet de reconstituer le champ de déplacement en surface sur la zone et de localiser par la même occasion une zone potentielle pour une rupture en surface.

La Figure 28 montre le résultat de traitement interférométrique effectué par E. Fielding (Jet Propulsion Laboratory, Californian Institute of Technology) à partir des données PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) du satellite JAXA ALOS (données du 9 février 2008 et du 14 février 2010). Sur la figure, les zones de déformations intenses liées à des sols mous ou des mouvements de terrains sont masquées en noir. L'étoile rouge indique la position de l'épicentre. Le rectangle blanc encadre la position du modèle de faille utilisé par A. Sladen pour modéliser la rupture (cf. Figure 27). Chaque frange de couleur indique un déplacement de 11.8 cm dans la direction de visée du satellite (ici 38°).

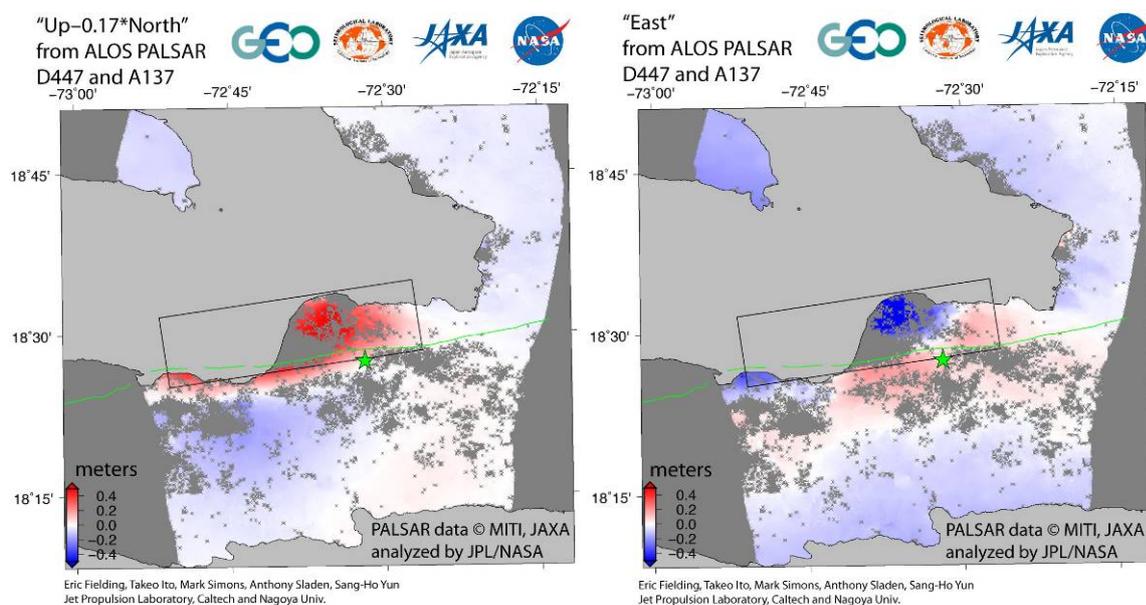
Les nombreux contours observés dans la plaine de Léogane montrent un soulèvement de la surface provoqué par le mouvement de la faille en profondeur. On en déduit que la rupture n'aurait pas atteint la surface dans cette zone (l'image ne peut indiquer les déformations pour la zone de faille sous la mer).

La Figure 29 montre les composantes Nord et Est du déplacement du sol lié au séisme, indiquant un soulèvement du sol jusqu'à 40 cm dans la région de Léogane.



Eric Fielding, Takeo Ito, Mark Simons, Anthony Sladen, Sang-Ho Yun
Jet Propulsion Laboratory, Caltech and Nagoya Univ.

Figure 28 - Carte des déformations de surface causées par le séisme du 12 janvier 2010 dérivée d'analyse interférométrique de données radar acquise par PALSAR instrument sur le satellite JAXA ALOS. (Source E. Fielding/JPL/NASA/JAXA <http://www-radar.jpl.nasa.gov/CrustalDef/haïti/>)



Eric Fielding, Takeo Ito, Mark Simons, Anthony Sladen, Sang-Ho Yun
Jet Propulsion Laboratory, Caltech and Nagoya Univ.

Eric Fielding, Takeo Ito, Mark Simons, Anthony Sladen, Sang-Ho Yun
Jet Propulsion Laboratory, Caltech and Nagoya Univ.

Figure 29 - Déplacements du sol lié au séisme à partir des données radar. A gauche déplacement vertical, à droite composante Est du déplacement.

Les reconnaissances aériennes et sur le terrain après le séisme ont effectivement montré l'absence de trace évidente de rupture en surface. Au cours de notre visite dans la région de Léogane, Dufort et Grand Goave, nous n'avons pas vu d'indices de ruptures de surface.

Cette absence de rupture en surface liée à ce séisme a des conséquences importantes sur l'analyse de l'activité sismique des grandes failles de l'île en paléosismicité à partir de tranchées. Par exemple, Prentice et al. (2003) ont étudié la faille Septentrionale en République Dominicaine à partir de plusieurs tranchées. Ils estiment à plus de 800 ans le dernier séisme majeur ayant provoqué des ruptures en surface mesurables sur ce segment de faille. Des événements de magnitude 7.0 comme celui de Janvier 2010 sans rupture en surface pourraient ne pas être détectés. Ce qui peut fausser les estimations de périodes d'occurrence de séismes majeurs déduites de la paléosismicité.

La mission de reconnaissance de l'Université du Texas (Rathje E ; et al., 2010) a mis en évidence le soulèvement du sol sur le bord de mer de la zone de Léogane avec l'exposition de corail hors de l'eau.

Inversement, vers l'Ouest dans la région de Grand Goave et de Fouche, des modifications conséquentes du trait de côte avec un affaissement du sol sur plusieurs centaines mètres le long du rivage ont pu être constatés. Elles ne sont pas dues au déplacement du sol lié à la rupture mais plutôt à des glissements associés à de la liquéfaction (cf. 4.7.2.5)

4.4.3 Contraintes de Coulomb

La méthode dite des " contraintes de Coulomb " permet de calculer les variations de contraintes associées aux séismes et ainsi d'analyser les interactions avec les failles environnantes. Après un séisme, la modification des contraintes autour de la rupture peut faire augmenter la contrainte sur une faille et ainsi favoriser le glissement ou inversement faire diminuer la contrainte. La Figure 30 montre le modèle de variation de contrainte de Coulomb calculé par l'USGS après le séisme du 12 janvier (Lin et al., 2010). Selon ce modèle, on aurait une augmentation de la contrainte de Coulomb aussi bien à l'Est qu'à l'Ouest de la zone de rupture.

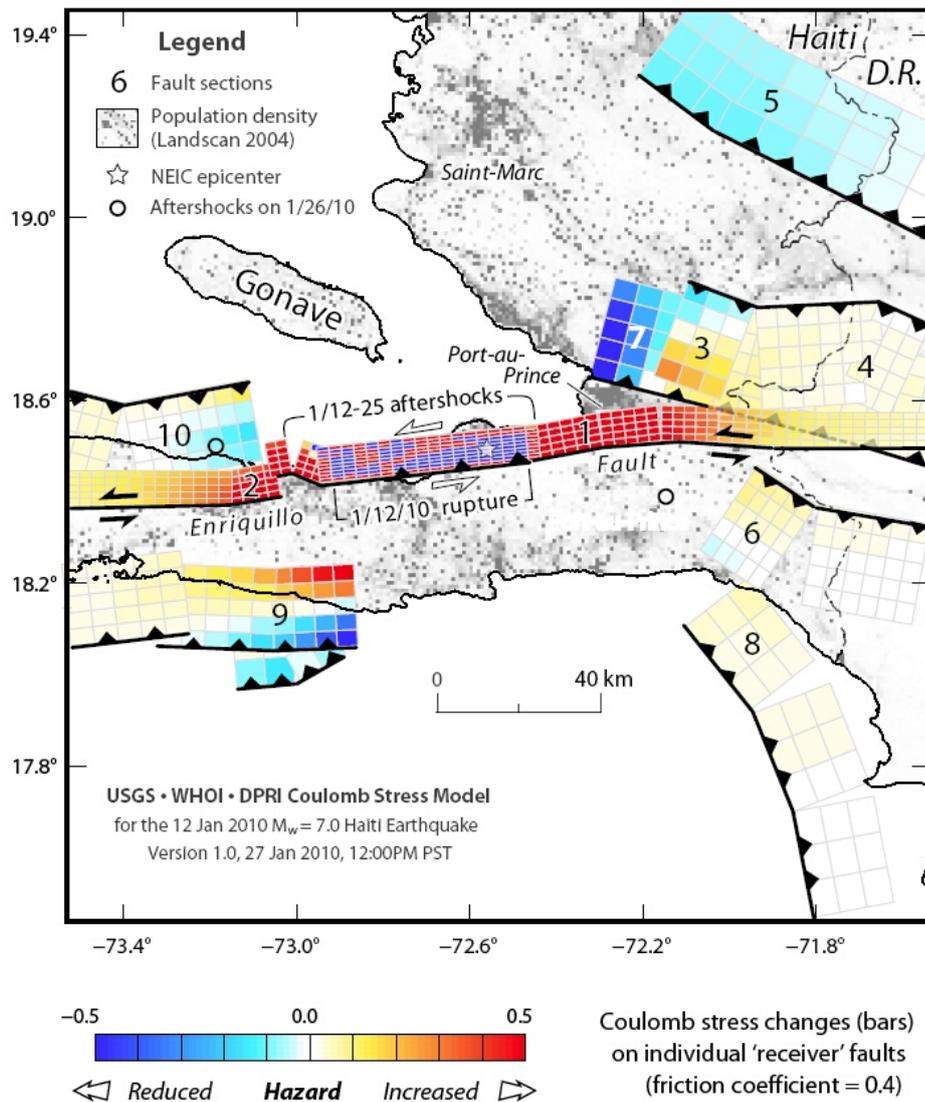


Figure 30 - Variation des contraintes de Coulomb après le séisme du 12 Janvier (Source : Lin et al., 2010)

4.4.4 Intensités et accélérations

4.4.4.1 Intensités

La figure ci-dessous donne une estimation des intensités d'après les données de l'USGS au 15 janvier 2010. L'intensité VIII est atteinte ou dépassée sur une zone de 90 km de long depuis Petit Goave à l'Ouest jusqu'au-delà de la Croix des Bouquets à l'Est de Port au Prince. L'intensité X pourrait être atteinte à proximité de la zone de rupture.

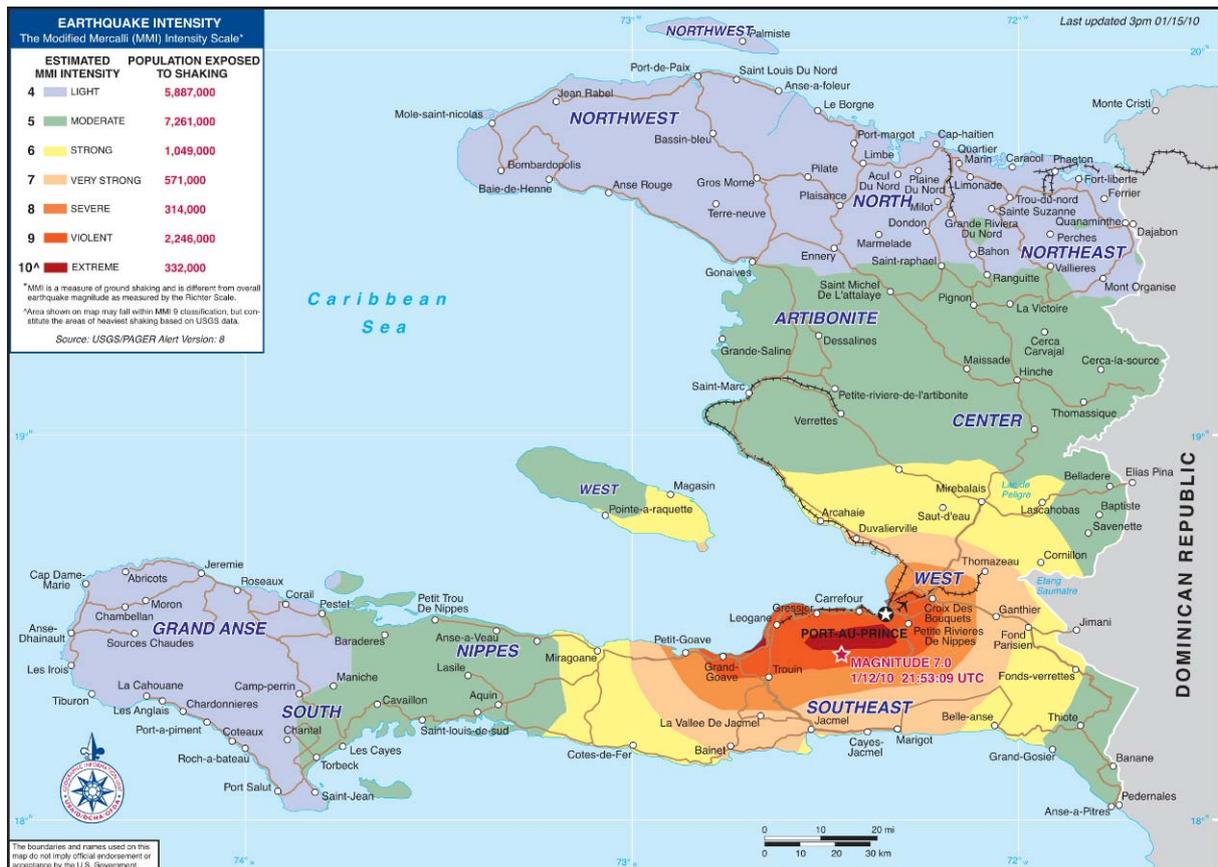


Figure 31 - Carte d'intensité en échelle Mercalli Modifiée (MM)
(source USAID d'après USGS/pager du 15/01/2010 alerte version 8)

Cette carte de l'USAID/USGS, a été établie 3 jours après le séisme utilisant sans doute en grande partie des corrélations entre accélération et intensité d'après la shakemap (voir paragraphe suivant 4.4.4.2)

McCann & Mora, dans un document post-sismique (Mora, 2010) et intégrant des témoignages et observations de dommages aux données de l'USGS proposent une carte d'intensité dans laquelle l'aire isoséiste d'intensité VIII est beaucoup plus étendue et avec une intensité X sur le centre ville de Port-au-Prince.

Ces deux cartes sont des estimations préliminaires effectuées peu de temps après le séisme avec des informations encore partielles. Les aires isoséistes sont donc assez approximatives et n'ont pas été affinées jusqu'à présent par des études plus récentes.

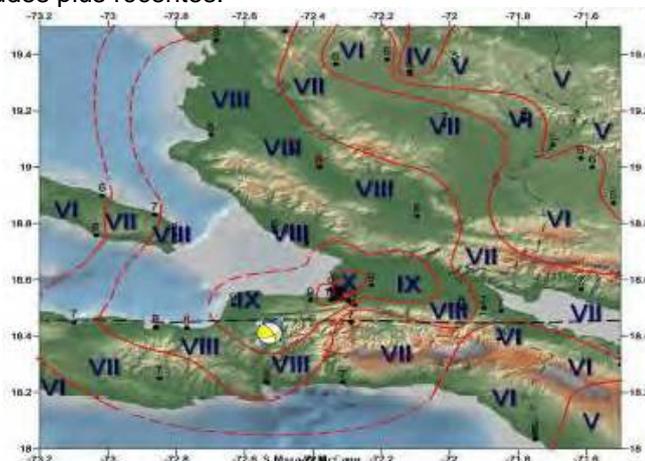


Figure 32 - Carte d'intensité préliminaire
Basée sur des interviews téléphoniques, l'interprétation de l'information médiatisée
et les données de l'USGS/NEIC
(Source : McCann & Mora, en préparation, dans Mora (2010))

Les informations disponibles sont insuffisantes pour estimer si ce séisme est plus fort ou non que ceux de 1751 et 1770. D'un côté l'intensité maximale observée en 2010 est plus forte (IX-X au lieu de VIII). D'un autre côté, l'aire de l'isoséiste VII de 1770 (d'après les données de Sisfrance/Antilles) serait plus étendue.

4.4.4.2 Accélération

Il n'y avait aucun accéléromètre en fonctionnement à Haïti lors du séisme du 12 janvier. Il n'y a donc aucune mesure de mouvements forts dans les zones fortement affectées de Port au Prince et Léogane. La station SDDR en république dominicaine, à 145 km de l'épicentre est la station la plus proche pour laquelle on a des données d'accélération (accélération maximale de -0.012 g (source Shakemap USGS)

La carte shakemap de l'USGS (Figure 33) est obtenue à partir de calculs utilisant des relations empiriques de mouvements forts et des cartes d'amplifications de site basées sur la méthodologie de Wald and Allen (2007) à partir des pentes topographiques. Les niveaux d'accélération sont ensuite calés avec des données d'observations macrosismiques (témoignages sur Internet « Did You Feel It » sur le site de l'USGS) (points bleus sur la figure) et d'estimations d'intensité en quelques points de références (points jaunes).

(http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/2010rja6/#Peak_Ground_Acceleration). Les courbes d'iso-accélération 0.009, 0.018, 0.036 g sont représentées sur la figure. Des accélérations supérieures à 0.036 g sont indiquées pour la zone entourant Léogane et Port au Prince.

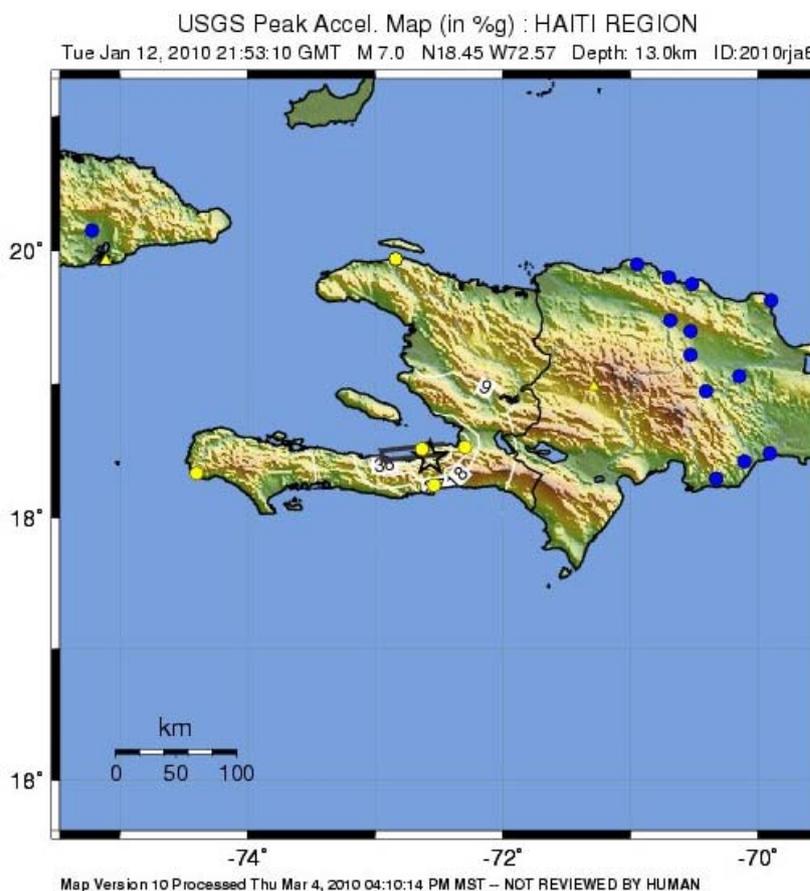


Figure 33 - Carte d'accélération de pic
(PGA en %g) (source USGS shakemap)

Fierro & Perry (2010) indiquent dans le rapport post-sismique du PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) que d'après les observations de dommages, le PGA à Port-au-Prince était plus probablement autour de 0.45 g. Il serait supérieur à l'Ouest de l'épicentre, dans la direction de la rupture, en raison d'effets de directivité.

Nous avons testé des calculs de PGA avec les relations d'atténuation Boore and Atkinson (2008), Campbell and Bozorgnia (2008), and Chiou and Youngs (2008) utilisés par l'USGS pour la réactualisation de la carte d'aléa sismique de Haïti (Rapport USGS Open-File Report 2010-1067).

Pour une distance à la rupture de 15 km et un mécanisme au foyer en décrochement, l'accélération maximale horizontale PGA au rocher serait de l'ordre de 0.20 g en valeur médiane, de l'ordre de 0.35 g à un écart-type.

Pour des sols de type D (selon la classification EC8) avec des coefficients d'amplification de 1.35, l'accélération maximale horizontale PGA serait de 0.27 g (en valeur médiane) à 0.47 g (à un écart-type). Les données actuelles ne permettent pas de préciser l'accélération maximale du sol atteinte à Port au Prince. En fonction des relations d'atténuations utilisées et des types de sols rencontrés des valeurs de 0.2 g à 0.45 g sont possibles. A Léogane, plus proche de la zone de rupture et avec des effets de champ proche et de directivité possibles, l'accélération maximale est probablement plus forte qu'à Port-au-Prince.

4.5 Enregistrements et réseaux de mesures sismiques

4.5.1 Les réseaux existants

Il n'y a pas de réseau de surveillance sismique à Haïti au moment du séisme. Les stations les plus proches sont celle de la République Dominicaine et la station américaine de Guantanamo à Cuba, distante de plus de 200 km.

Le réseau français de stations sismiques à vocation pédagogique « Sismos à l'Ecole » avait installé une station sismique au lycée français Alexandre Dumas de Port-au-Prince (cf. www.edusismo.org). La station fonctionnait lors du séisme mais l'enregistrement est saturé et le signal n'est pas calé en temps. Il n'est donc pas exploitable pour la localisation ou pour l'accélération maximale du sol.

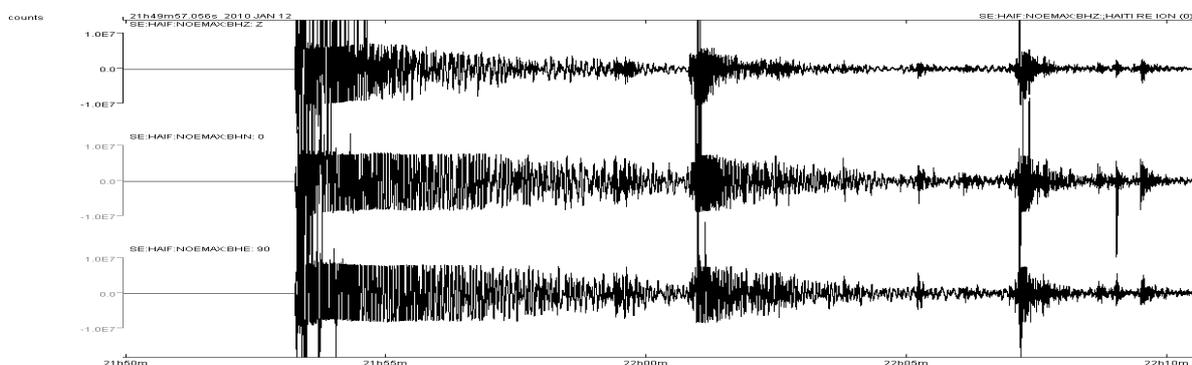


Figure 34 - Enregistrement du choc principal et des premières répliques sur la station Sismos à L'Ecole du lycée français de Port-au-Prince.

4.5.2 Les installations temporaires post-sismiques

Des stations temporaires ont été installées de façon indépendante par des équipes d'ingénieurs et chercheurs américains, canadiens et français.

4.5.2.1 Stations américaines

L'USGS met en place 4 stations accélérométriques entre le 27 janvier et le 2 février. Les 2 stations Oliver et Grand Goave sont installées pendant 3 jours. Les 2 stations à Port-au-Prince sont a priori encore en place.

En dehors des accéléromètres, l'USGS a implanté une quinzaine de stations sismiques temporaires. L'une d'entre elle est installée à Dufort (à l'ouest de Léogane et à proximité de la faille Enriquillo). Il n'y a pas de transmission temps-réel, les événements sismiques sont enregistrés sur place sur déclenchement. Le suivi technique de cette station est assuré par le Bureau des Mines et de l'Energie (BME). Une mesure H/V a été faite à l'emplacement de cette station (voir mesure HV6 au paragraphe 2.5).

Le BME n'a pas pu nous donner d'informations sur les autres stations USGS. Elles devraient être enlevées en juin (Y. Mazabraud, comm. pers.)

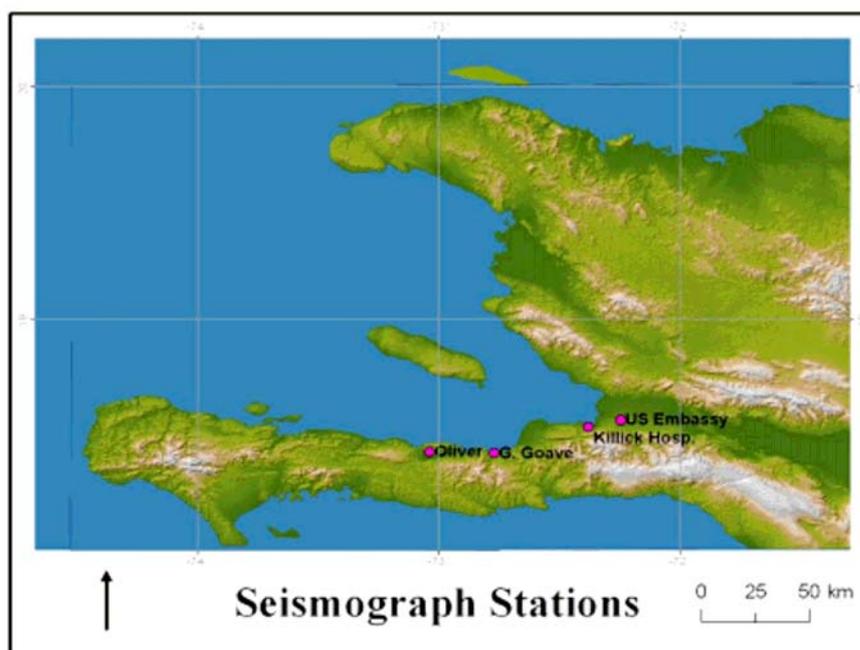
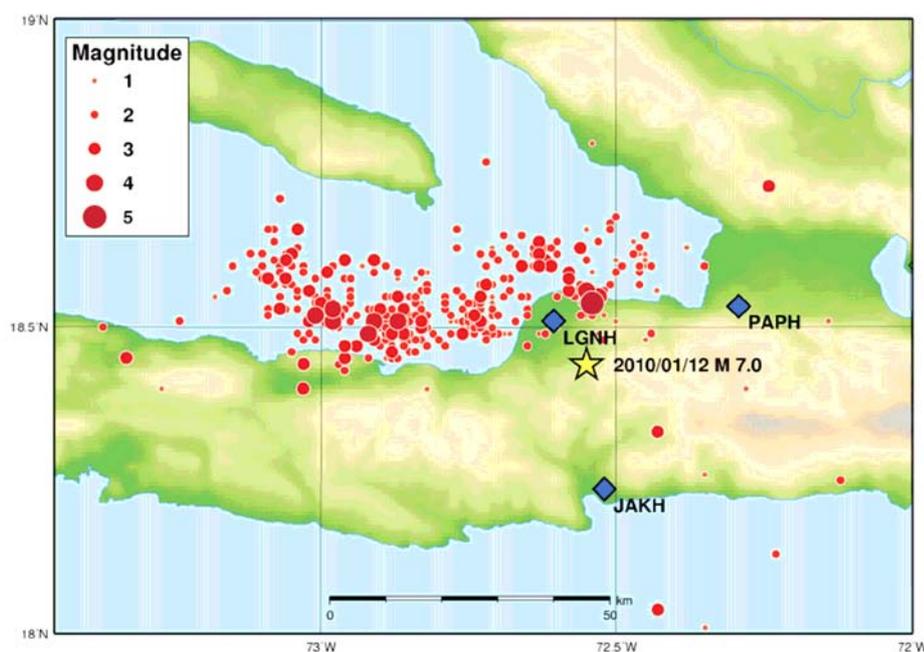


Figure 35 - stations accélérométriques de l'USGS

4.5.2.2 Stations canadiennes

Le Geological Survey du Canada (GSC - Ressources Naturelles du Canada <http://EarthquakesCanada.nrcan.gc.ca>) a installé 3 stations à Haïti avec l'appui de l'Observatoire National de l'Environnement et de la Vulnérabilité (ONEV ministère de l'environnement haïtien). Ces stations sont en fonctionnement depuis le 16 février à Port-au-Prince, Léogane et Jacmel. (cf. Figure 36) : Elles sont retransmises en temps réel et les signaux temps-réels sont visibles en ligne sur le lien <http://earthquakescanada.nrcan.gc.ca/haïti/index-eng.php>

Du 17 février au 3 juin, ces stations ont pu localiser 610 répliques. Les localisations présentées sont préliminaires. Effectuées avec une profondeur fixée à 10 km et avec un modèle de vitesse standard, les localisations sont systématiquement décalées vers le Nord de quelques kilomètres.



Located aftershocks from 20100215 to 20100408

Figure 36 - Stations sismiques temporaires canadiennes et localisation des répliques

du 15 février au 8 avril

Ces stations sont les seules à pouvoir fournir un suivi temps réel de l'activité sismique de ces derniers mois, en dessous des seuils de détection des réseaux sismiques extérieurs à Haïti. L'ONEV utilise ces données pour diffuser un bulletin sismique public.

4.5.2.3 Stations françaises

La mise en œuvre d'un réseau d'enregistrement des répliques a impliqué chercheurs et ingénieurs de Géoazur (Nice-Sophia, Villefranche/Mer), de l'UBO (Brest), de l'Ifremer-GM (Brest), de l'UAG (Pointe-à-Pître) et de l'IPGP (Obs. de Martinique). Une campagne marine, Haïti-OBS, a été organisée dans le but de déployer des stations sismiques de fond de mer de part et d'autre de la Presqu'île du Sud afin de pallier au mieux au manque de stations à terre. 21 sismomètres sous-marins (OBS, Ocean Bottom Seismometers) ont été déployés au cours de cette mission à bord du R/V L'Atalante du 6 au 15 février 2010. 15 OBS ont une autonomie de 3 semaines et 6 une autonomie de 3 mois.

Le réseau d'OBS est complété par l'installation de 4 stations sismologiques à terre par Yves Mazabraud (Université Antilles-Guyane) entre le 16 et le 23 février vers Miragoane – Grand Goave. 3 de ces stations ont été enlevées en mai.

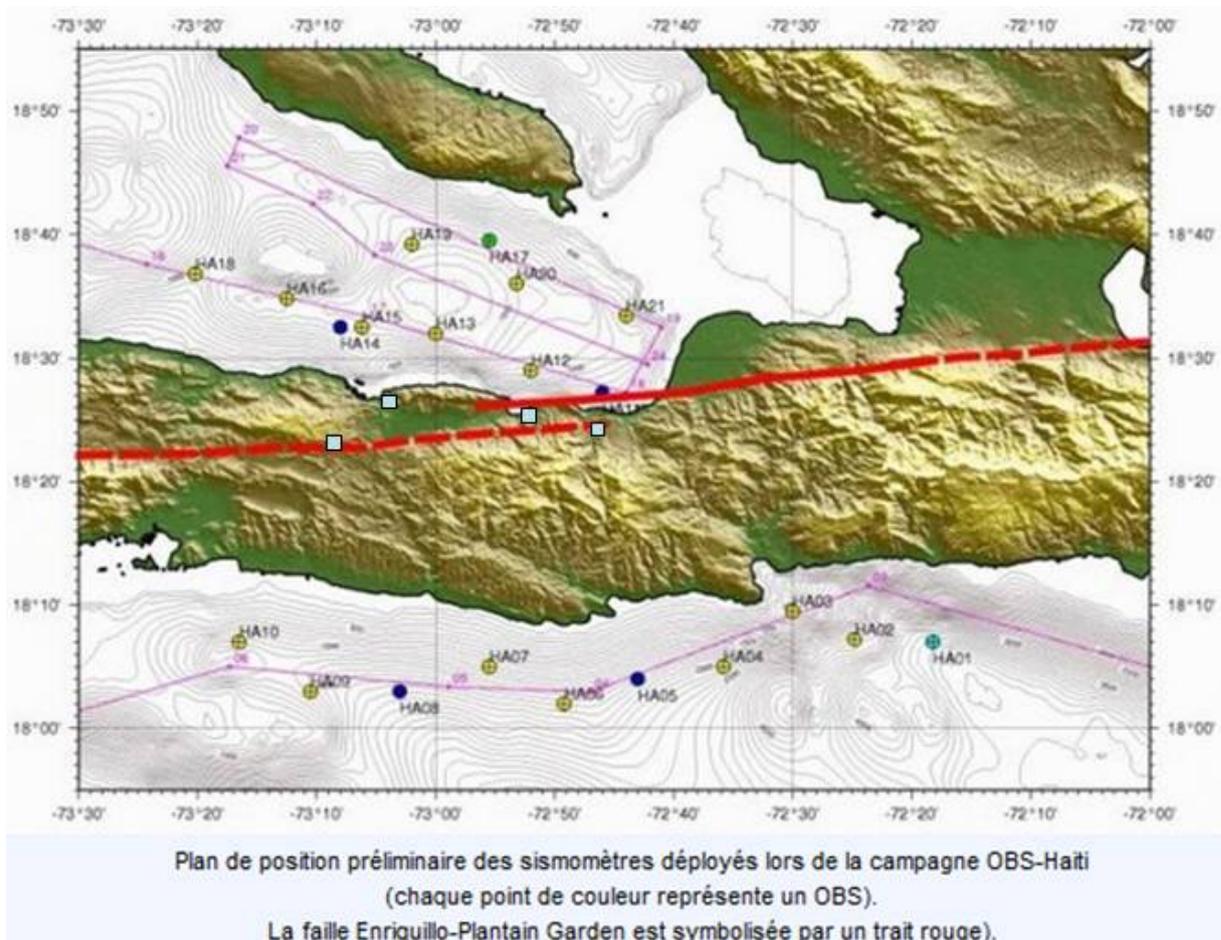


Figure 37 - Carte d'implantation des stations sismiques sous-marines de la campagne Haïti-OBS et des stations temporaires installées à terre (carrés bleus)

Comme indiqué au paragraphe 4.5.1, le réseau Sismo à l'École a mis en place une station au lycée Français de Port-au-Prince (HAIF 18.54°N, 72.31°W à Bourdon). Depuis le séisme, la station a été recalé en temps : les enregistrements sont visibles en ligne et en temps réel (<http://200.4.168.126/cgi-bin/ida>)

Une deuxième station a été installée à Port-au-Prince en Mai au Collège Catts Pressoir (HPAP 18.64°N, -72.32°W: visible sur le lien <http://ccpsismos.dyndns.org/cgi-bin/ida>)

4.5.3 Enseignements pour un réseau de surveillance permanent

De nombreuses stations temporaires sont donc installées autour de la zone de rupture entre février et mai. Les plus grosses répliques ayant eu lieu entre le 12 et le 20 janvier, ces stations apporteront peu d'informations sur les mouvements forts. Elles permettront par contre d'avoir une vision assez fine de la répartition des répliques sur la faille d'Enriquillo et des failles annexes qui ont pu jouer.

Il est important que l'ensemble des informations et des données soient centralisées au sein d'un seul organisme haïtien qui puisse coordonner l'ensemble des actions à mener. Or actuellement au moins 2 organismes sont impliqués dans le suivi des stations sismiques temporaires, le BME et l'ONEV, avec semble-t-il peu d'échanges d'informations.

Actuellement, le réseau canadien dispose des seules stations sismiques susceptibles de fournir de l'information sismique temps-réel. Les stations Sismo-à-l'Ecole peuvent compléter cette information mais peu éloignées de la station canadienne de Port-au-Prince, elles ne permettent pas d'élargir le réseau.

Il est souhaitable que ce réseau temps réel canadien, déjà en place, puisse être maintenu en attendant l'implantation d'un réseau sismique permanent.

Dans le contexte sismotectonique d'Haïti, avec des zones exposées au risque sismique très étendues un réseau de surveillance sismique doit pouvoir couvrir tout le territoire. Pour avoir un réseau où les stations ne sont pas éloignées les unes des autres de plus de 100 km et soient répartis sur tout le pays, pas moins de 8 stations permanentes seraient nécessaires. Si un réseau homogène sur tout le pays n'est pas possible, une attention particulière doit être portée sur la partie Est de la faille d'Enriquillo qui n'a pas bougé (entre Gressier et Pétienville et au-delà vers la frontière) et qui constitue une menace forte sur Port-au-Prince. Une autre priorité est tout le nord du pays exposé à un fort risque lié à la faille Septentrionale.

En plus de stations sensibles pour une détection des séismes aussi fine que possible, des accéléromètres permanents doivent aussi être installés (sur des sites rocheux et des sols mous) pour évaluer les niveaux d'accélération possibles propres aux conditions de sols à Haïti.

Pour la mise en place et le maintien de ce réseau sismique, des équipes haïtiennes avec des compétences renforcées dans le domaine de la sismologie sont indispensables. Il faut clairement désigner l'organisme chargé de la gestion de ce réseau et prévoir le renforcement et la formation du personnel.

4.6 Effets de site

4.6.1 Démarche suivie – cartographie des dommages au bâti

Les dommages au bâti occasionnés par le séisme du 12 janvier 2010 en Haïti, peuvent très largement s'expliquer par la vulnérabilité des constructions qui est particulièrement forte à Port-au-Prince et sa région. Cependant, les effets de site peuvent intervenir dans l'explication de l'importance et de la répartition des dommages.

Il convient dans un premier temps de s'intéresser à l'inventaire cartographique de ces dommages et d'analyser ensuite leur répartition en regard des données géologiques, géomorphologiques et géotechniques disponibles.

Les zones d'effets de site lithologique supposées ont fait l'objet d'une campagne de mesures H/V menée dans le cadre de la mission AFPS et dont les résultats sont présentés et commentés. En fonction des résultats obtenus et des questions soulevées, quelques orientations en termes de microzonage sismique de la ville de Port-au-Prince sont proposées.

Un inventaire des dommages est encore actuellement en cours, dans le cadre des diagnostics d'urgence réalisés sur le terrain par l'UNOPS (organisme dépendant des Nations Unies) sous l'égide du Ministère des Travaux Publics haïtiens. Les résultats sont rassemblés dans un SIG mais ne sont pas disponibles pour le moment. En attendant, il est possible d'utiliser les cartes d'inventaire réalisées par l'UNOSAT (Programme d'Application Satellitaire Opérationnel de l'UNITAR, Institut des Nations Unies pour la formation et la Recherche). Cet organisme, à partir de comparaisons de données de photographies aériennes et satellites d'avant et après séisme, a réalisé plusieurs types de cartes de dommages. Pour chaque construction, un niveau de dommage est défini en cohérence avec les échelles d'intensité macrosismique, entre peu de dommages visibles, dommages modérés, dommages sévères et destructions.

Les résultats sont fournis sous forme de cartes exprimant individuellement chaque diagnostic. Les résultats sont également exprimés sous forme de cartes d'intensités de dommages qui consistent à affecter une aire d'intensité de dommages avec un code de couleur donné pour chaque niveau de dommages. Cette représentation permet une bonne lecture plus « confortable » de la répartition spatiale des dommages.

Les cartes réalisées par l'UNOSAT ne couvrent pas l'ensemble de l'aire affectée par le séisme. Seule l'aire la plus affectée couvrant une grande part de Port-au-Prince ainsi que Carrefour, est prise en compte.

La Figure 38 montre la carte des intensités de dommages obtenue. Elle montre clairement une répartition hétérogène des dommages ainsi que la présence de zones de fortes concentrations de dommages. Les chapitres suivants s'attachent à analyser cette hétérogénéité en termes d'effets de site.

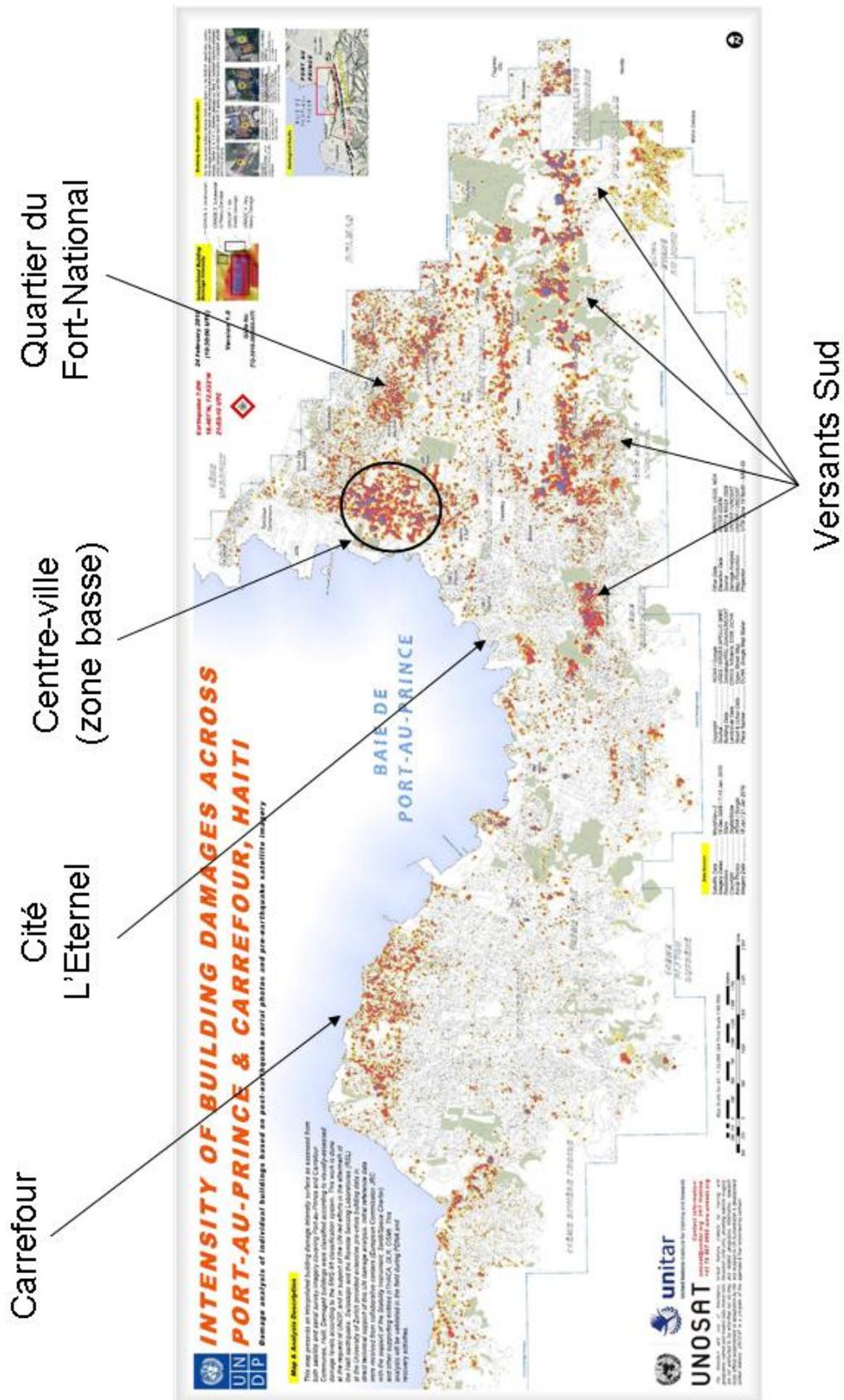


Figure 38 - Carte d'intensité de dommages Port-au-Prince et Carrefour
(les teintes rouges et bleues correspondent aux niveaux de dommages les plus élevés)

4.6.2 Effets de site géologiques

4.6.2.1 Interprétation de la carte des intensités de dommages

La carte des intensités de dommages de la Figure 38 montre différentes zones de forte concentration de dommages ainsi que des zones d'absence de dommages. La carte de la Figure 39 montre par ailleurs la répartition des zones de concentration de dommages par rapport aux différents ensembles géologiques.

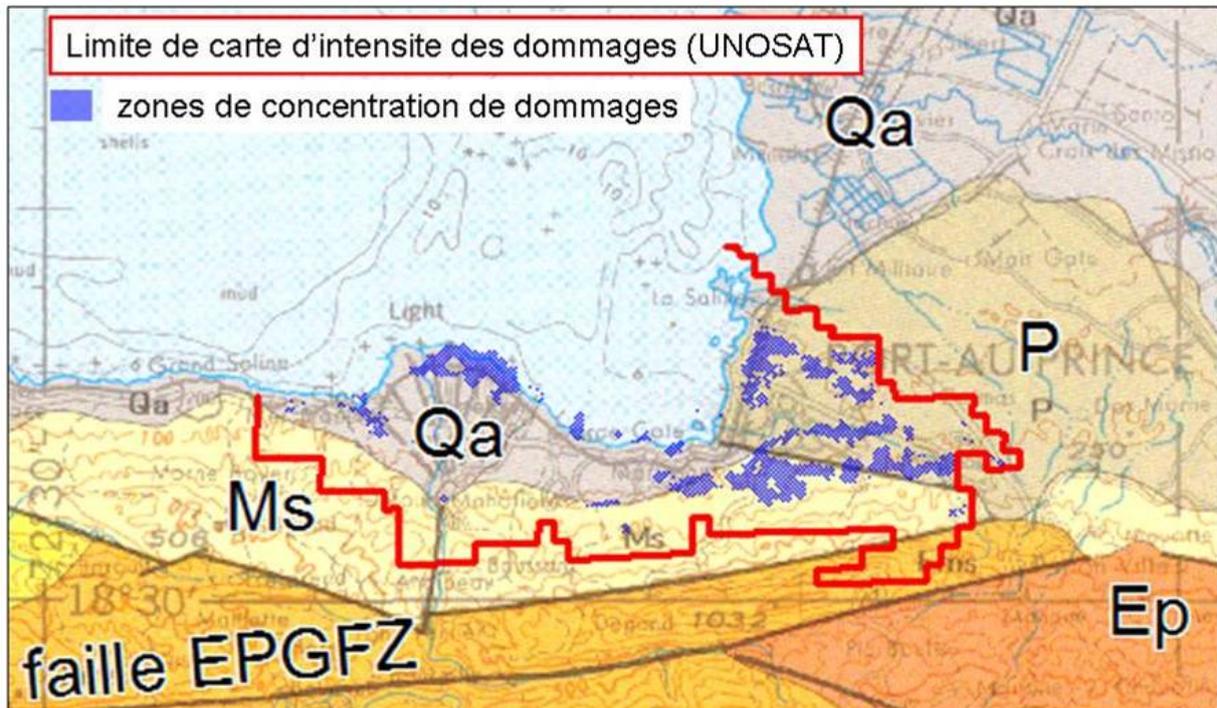


Figure 39 - Report des zones de fortes concentration de dommages (UNOSAT) sur la carte géologique à 1/250 000

Partie basse de la ville de Port-au-Prince

Cette zone de concentration de dommages, dont l'altitude est inférieure à 5 m, correspond au centre-ville. Elle est typique en raison de son sous-sol constitué d'alluvions quaternaires éventuellement surmontés de remblais récents (cf. Figure 23 et Figure 24). Un effet de site dans un tel contexte n'est pas aberrant.

Par ailleurs, le bâti est lui-même relativement spécifique avec de nombreux édifices imposants à usage commercial ou administratif, généralement constitués de plusieurs niveaux, en maçonnerie ancienne ou en poteaux et poutres en béton armé. Ces caractéristiques du bâti ont probablement renforcé la réponse homogène de la zone en termes de dommages, en plus des effets probables du sol.

Pour information, les mesures SASW réalisées par le GEER (Bachhuber et al., 2010) indiquent pour la zone des réponses de sol interprétées à partir des VS30, de type sol plus ou moins consolidé..

Cité l'Éternel

Cette zone ayant été édifée sur des remblais récents gagnés sur la mer (cf. chapitre de présentation du contexte géologique et géotechnique 4.3.2), on aurait pu s'attendre à un effet de site. Or, elle ne montre que peu de dommages. Deux interprétations sont possibles : 1) il n'y a pas eu d'effet de site dans cette zone ; 2) il y a eu effet de site mais l'habitat très précaire de la zone (fait de cases légères en tôles et en bois le plus souvent) n'y a pas été sensible.

Carrefour

Une zone de concentration de dommage est observée le long de la côte, au sein du cône alluvial quaternaire de Carrefour. Le bâti étant a priori homogène sur l'ensemble de ce cône alluvial, cette zone de concentration de dommages correspond très vraisemblablement à un effet de site qui s'exprime de manière sélective dans cette entité géologique.

Autres zones de Port-au-Prince

En dehors des descriptions qui précèdent, de nombreuses zones de concentration de dommages sont observées dans Port-au-Prince, au sein des reliefs peu marqués de la formation Pliocène détritique de Delmas (P) et des reliefs de piedmont de la formation du Miocène (Ms). En ce qui concerne l'habitat courant, dans tous ces secteurs, le bâti semble relativement homogène. C'est du moins ce qui découle d'une perception visuelle rapide à l'issue du passage dans la plupart des quartiers.

On peut donc considérer en première approche la vulnérabilité du bâti courant comme étant globalement homogène. Dans les zones où la pente est plus marquée, on pourrait considérer l'adaptation à la pente comme un facteur aggravant de la vulnérabilité, mais cet effet n'est pas significatif car des niveaux de dommages très différents sont constatés pour des contextes de pente similaires.

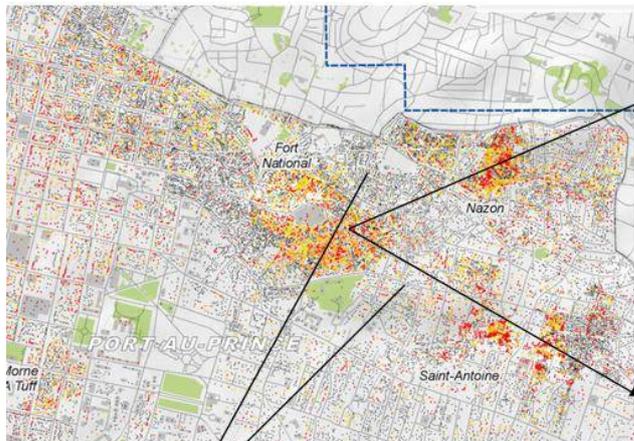
Dans un tel contexte général, les zones de concentration de dommages aussi bien dans la formation de Delmas qu'au sein du Miocène, sont très probablement liés à des effets de site lithologiques et structuraux.

Le quartier du Fort National en est une illustration comme le montre la Figure 40. Un effet de site topographique est a priori exclu (relief très peu marqué). Les zones d'effets de site sont donc vraisemblablement liés à la grande hétérogénéité lithologique au sein de la formation et donc à la présence locale de formations meubles sur de grandes épaisseurs au dessus de formations plus compétentes. Il est également possible qu'il y ait des effets de site particuliers en 2D et/ou 3D, en relation avec la géométrie complexe du substratum sismique et les fortes variations latérales et verticales de faciès. De tels effets particuliers sont tout à fait plausibles dans un contexte de cône alluvial détritique comme celui de la formation de Delmas (Bonnetois-Claudet et al., 2007).

Pour être complet sur le sujet, il convient de préciser que l'ensemble des mesures SASW réalisés au sein de la formation de Delmas par l'équipe du GEER, donne des valeurs de VS30 homogènes correspondant à des réponses de type sols raides (Bachhuber et al., 2010).

La mise en évidence d'effets de site autour du Fort National repose sur le postulat d'une répartition homogène de la vulnérabilité du bâti courant. On ne peut exclure en toute rigueur la présence de poches de concentration de vulnérabilité pour expliquer les concentrations de dommages. On peut par exemple voir à la Figure 41 que la zone de concentration de dommage au quartier Nazon, près de Fort National correspond à un type de bâti différent (constructions a priori de plus petites tailles).

Fort National



Même type de bâti
> Peu de dégâts



Figure 40 - Zones de concentration de dommages dans le quartier de Fort National



Figure 41 - Concentration de dommages au quartier Nazon
(Image Google brute à gauche, image drapée avec la carte de dommages de l'UNOSAT à droite)

La base des reliefs au sud de la ville de Port-au-Prince (quartiers de Carrefour-Feuille, Desprez, Haut-Turgeon, Saint-Gerard, Pacot, Fort Mercredi, Croix Desprez, ...), offre une autre illustration des effets de site potentiels au sein dans un autre contexte géologique, à savoir celui de la formation Miocène. Dans toute cette zone, on passe sur de courtes distances (quelques dizaines de mètres) de zones peu ou pas affectées par des dommages à des zones détruites à 70-80 %, comme le montre la Figure 42.

Encore plus que pour la formation de Delmas, la grande hétérogénéité lithologique au sein du Miocène peut expliquer la présence d'effets de site lithologiques et structuraux plus ou moins complexes. Lors des reconnaissances de terrain dans ce secteur, différents faciès ont été observés, entre des matériaux rocheux (marnes et calcaires, brèches), argileux raides ou encore sablo-argileux peu consolidés. L'affleurement de la Figure 21 au sein de cette même formation Miocène souligne le contraste lithologique qui peut effectivement exister sur un périmètre restreint. Enfin, les mesures VS30 réalisées par le GEER dans le secteur (Bachhuber et al., 2010) soulignent ces contrastes avec une réponse de type rocher et une réponse de type sol.

Dans un tel contexte, il est donc envisageable d'avoir localement des zones d'effet de site. On peut également comprendre pourquoi dans ces mêmes zones, sur des pentes rocheuses, même escarpées, peu de dégâts sont constatés au sein de zones de bâti a priori vulnérable, en raison de l'absence d'effet de site. La situation est la même au sein des calcaires massifs de l'Eocène présents aux environs de Pétienville.



Versants au sud de
Port-au-Prince

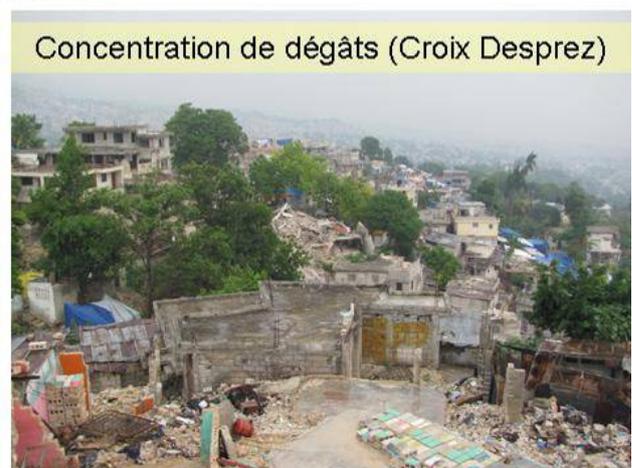
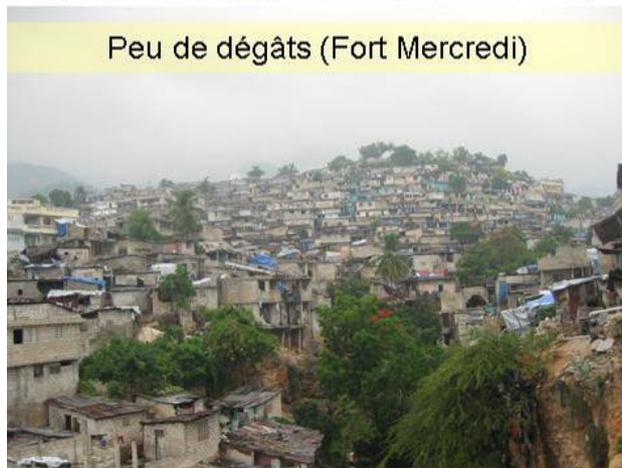


Figure 42 - Répartition hétérogène des dommages au sein des versants au sud de Port-au-Prince

4.6.2.2 Mesures H/V

Pour estimer des effets de sites lithologiques, une des techniques consiste, à partir de l'enregistrement du bruit de fond ambiant, à calculer le rapport spectral entre les composantes horizontales et la composante verticale : c'est la méthode appelée couramment H/V (Nakamura, 1989). La méthode permet d'évaluer la fréquence propre du site puis, en conjonction avec d'autres éléments, les effets de site proprement dits (Lachet et Bard, 1994 ; Field et Jacob, 1995).

Le dispositif expérimental est constitué d'un sismomètre trois composantes et d'une station d'acquisition (Figure 43)



Figure 43 - Mesure H/V au centre ville de Port-au-Prince, à l'emplacement de l'ancienne poste face à la mairie, détruite par le séisme et rasée depuis (point HV10 cf. Figure 47)

Le bruit de fond est engendré par des sources proches comme le trafic urbain et donc composé d'ondes de surface. Seules les composantes horizontales sont amplifiées par les réflexions sur les interfaces des couches sous-jacentes. La composante verticale du bruit de fond contient, elle, la signature des sources de bruit.

Pour obtenir une pseudo-fonction de transfert à l'aide du bruit de fond, en s'affranchissant de l'effet de source, on divise donc le spectre d'une composante horizontale par le spectre de la composante verticale (d'où l'appellation H/V). Ce rapport donne avec une bonne précision la fréquence de résonance fondamentale du site (ou fréquence propre). Lorsque la géométrie du site peut être assimilée à un milieu mono-dimensionnel, on peut relier l'épaisseur d'une couche sédimentaire meuble (ayant un fort contraste d'impédance avec le substratum rocheux) à sa fréquence de résonance fondamentale f_0 .

15 mesures d'H/V ont pu être réalisées au cours de cette mission, à Léogane, Carrefour et au centre ville de Port-au-Prince (Tableau 3). Les mesures à Carrefour et Léogane ont été effectuées avec la collaboration du BME. Nous tenons à remercier Mr Mildor pour son aide. Les objectifs étaient de voir sur quelques points si des effets de site étaient détectables avec cette méthode et de voir dans quelle mesure les fortes concentrations de dommages observées dans certains secteurs pouvaient être expliquées en partie par des effets de site.

Au centre-ville de Port-au-Prince, les conditions pour des mesures correctes, sur sol naturel, en zone dégagée et avec peu de passages sont difficiles à trouver. Les mesures ont donc été effectuées là où cela était possible. Certaines mesures ont été effectuées sur des zones déblayées après la destruction de bâtiments. La présence de fondations encore en place ou de couches dures sous la surface ont pu masquer certains effets peut être visible sur des sols naturels.

code	site	X (UTM 18)	Y (UTM 18)	Longitude °W	Latitude °N	Fréq. f0 Hz
HV2	Carrefour 1	772885	2053286	-72.4148	18.5526	2.9
HV3	Carrefour2	773284	2052682	-72.4111	18.5471	-
HV4	Carrefour3	773532	2051144	-72.409	18.5332	-
HV5	Carrefour4	773397	2050560	-72.4103	18.5279	-
HV6	Dufort station USGS	749673	2042778	-72.6359	18.4606	1.8
HV7	Léogane 1	750223	2048009	-72.63	18.5078	3.4
HV8	Léogane 2	749800	2048260	-72.634	18.5101	2
HV12	Léogane 3	750466	2047924	-72.6277	18.507	2
HV1	Port-au-Prince-1	781405	2052252	-72.3343	18.5422	-
HV9	Port-au-Prince-2	780150	2052994	-72.3461	18.549	2.5 ?
HV10	Port-au-Prince-3	780033	2053157	-72.3472	18.5505	3 ?
HV11	Port-au-Prince-4	780914	2053056	-72.3388	18.5495	-
HV13	Port-au-Prince-5	780890	2052107	-72.3392	18.5409	3.5 ?
HV14	Port-au-Prince-6	781028	2053319	-72.3377	18.5518	-
HV15	Port-au-Prince-7	781741	2052900	-72.331	18.548	-

Tableau 3 - Position des points de mesures H/V et fréquences f0 des pics observés

Carrefour

La ville de Carrefour est située sur un cône de déjection de formations détritiques et alluvionnaires Quaternaire (Figure 45).

La carte de répartition des dommages (UNOSAT ID 1424) montre une forte concentration de dommages sur la zone littorale et des dommages moins conséquents en amont (Figure 44). Il n'y a pas de différence évidente de vulnérabilité sur le bâti de la zone de carrefour permettant d'expliquer cette concentration de dommages sur la partie aval de cette zone.

4 mesures ont été effectués (HV2 à HV5) depuis le bord de mer et en remontant vers l'amont du cône de déjection (Figure 45). La mesure proche du littoral (HV2) montre un effet de site très marqué avec un pic à 3 Hz. Les 3 autres mesures n'indiquent pas d'effet de site particulier.

Sans qu'il soit possible de généraliser à partir de ces seules mesures, on voit qu'il existe de fortes différences de comportement du sol sur ce secteur. Des effets de site sont à rechercher sur la zone littorale de Carrefour.

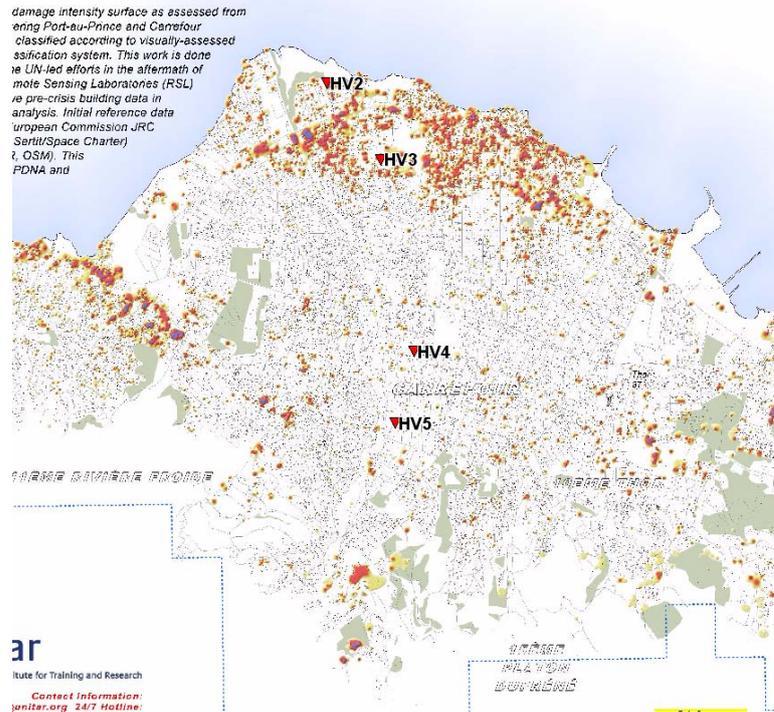


Figure 44 - Carte de densité de dommage sur Carrefour (Source UNOSAT) et position des points de mesure H/V

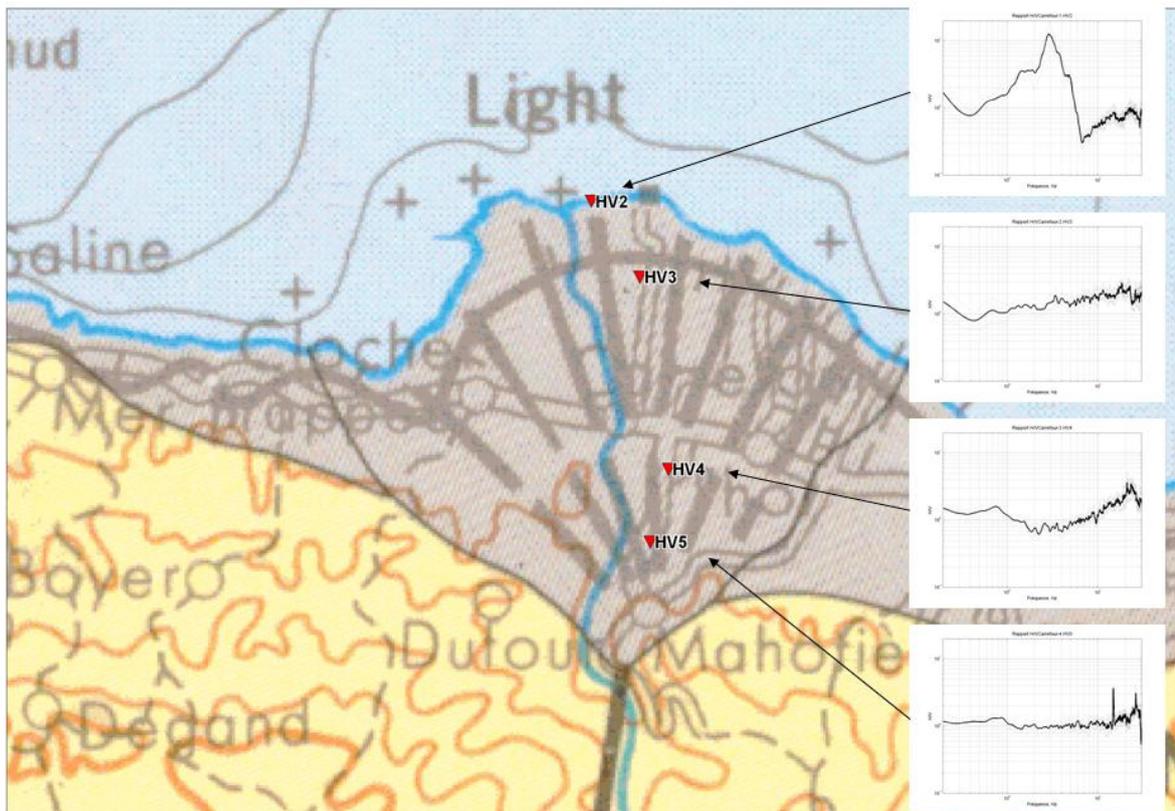


Figure 45 - Mesures H/V à Carrefour

Plaine de Léogane

3 mesures ont été effectuées dans le centre ville de Léogane endommagé à 80 % (HV7, HV8, HV12 sur Figure 46). Elles montrent des pics H/V relativement bien marqués centrés sur les fréquences 2 Hz (HV8 et HV12) et 3.4 Hz (HV7). Il semble donc qu'en plus d'être à faible distance de la faille, les mouvements du sol ont été amplifiés par des effets de site lithologiques.

Une mesure a été faite à Dufort (HV6) à l'emplacement d'une station sismologique temporaire installée par l'USGS et maintenue par le BME. Sur ce site, un pic à 2 Hz est encore visible mais peu accentué. On ne peut pas considérer d'effets sur ce site dans la gamme 1-10 Hz.

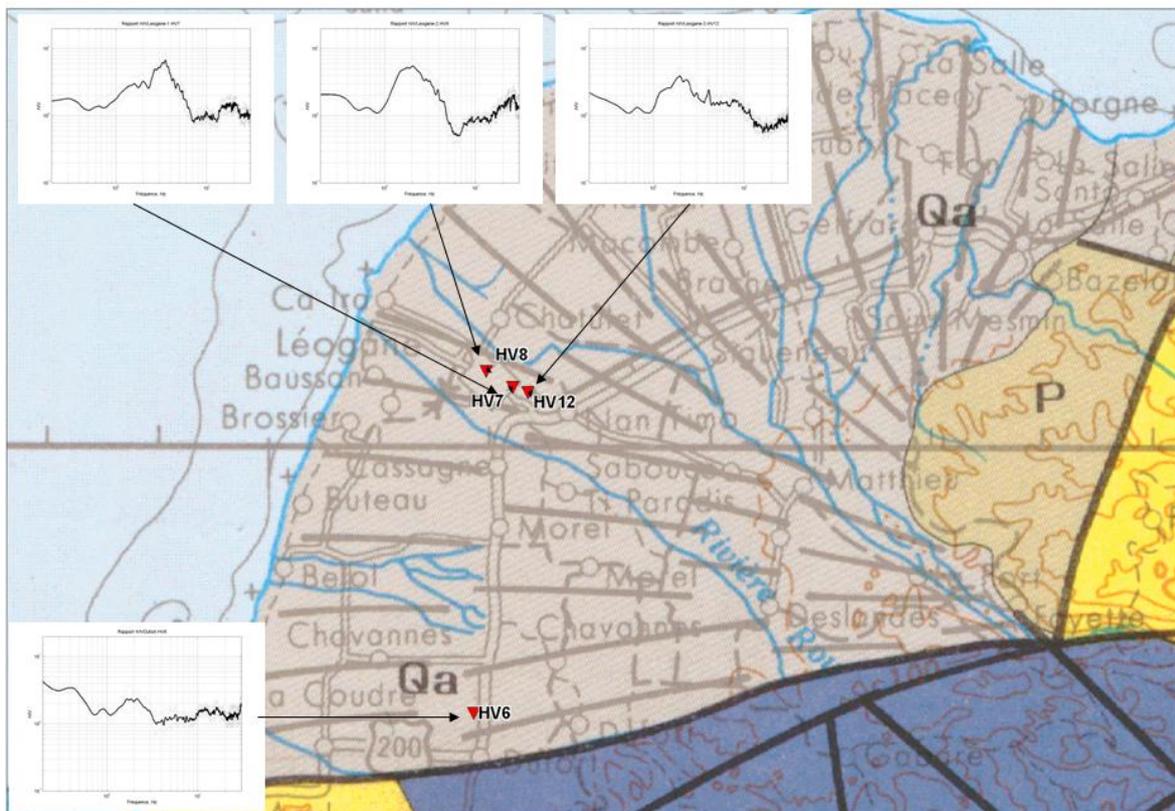


Figure 46 - Mesures H/V à Léogane

Centre ville de Port au Prince

7 mesures ont été effectuées (Figure 47). HV9 et HV10 sont proches du bord de mer et dans des zones de forte concentration de dommage. Les pics sont moins évidents que sur Carrefour (HV2) et Léogane, mais un pic assez large entre 1 et 3 Hz est observé.

Les autres mesures sont situées plus en hauteur (sur la Figure 47, le pointillé marron correspond à l'altitude + 5m et la ligne marron +10 m)

Hv1 et HV13 sont dans des zones où la concentration de dommage est faible. Il n'y a pas de pics sur la gamme de fréquence 1-10 Hz.

Hv11 (cathédrale) et Hv14 sont situés en hauteur (10 m ou plus) dans des zones forte concentration de dommage. La mesure H/V ne met pas en évidence de fréquence particulière pour les effets de site.

Enfin la mesure Hv15 a été faite dans l'enceinte du Fort National. Ce site est situé sur une crête au centre d'une zone de forte concentration de dégâts.

Bien que la pente ne soit pas suffisante pour supposer un effet de site topographique (selon les critères forfaitaires utilisés par les PS92), on a cherché à voir si on pouvait identifier une fréquence particulière de vibration. Le rapport H/V ne montre rien de significatif.

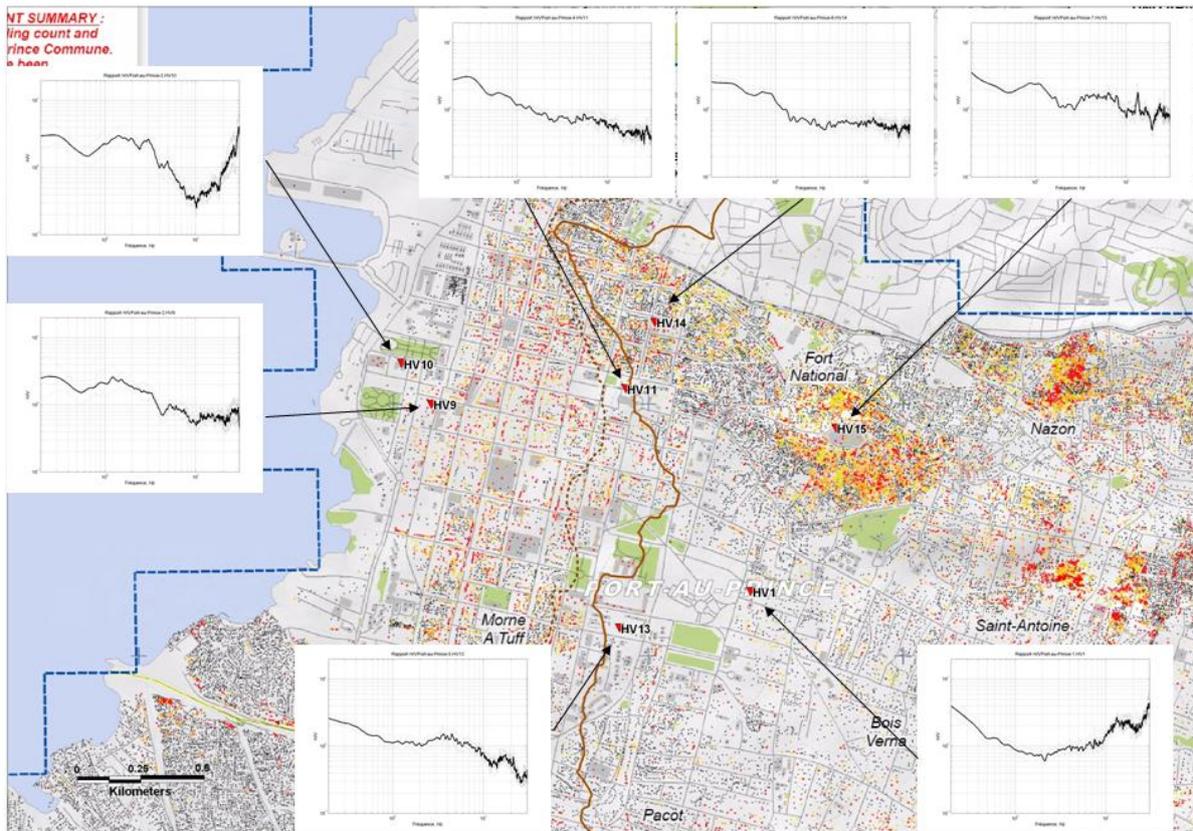


Figure 47 - Mesures H/V à Port-au-Prince

Sur Port-au-Prince, les mesures H/V n'ont pas mis en évidence de fréquence particulière de vibration associé à un effet de site, sauf peut être sur les mesures proches de la mer.

L'absence de pics de fréquence bien marqués dans le rapport H/V n'indique pas nécessairement l'absence d'effet de site. Une constitution non tabulaire des couches de terrains, une augmentation progressive de vitesses d'ondes sismique avec la profondeur au lieu de contraste de vitesse fort, ou une couche dure en surface surmontant des sols plus mous rendent les interprétations d'H/V beaucoup moins évidentes. Il est nécessaire alors d'avoir des informations complémentaires (données géotechniques, mesures géophysiques de surface) avant d'exclure l'effet de site.

4.6.2.3 Orientations particulières de certaines zones de concentrations de dommages

Comme le montre la Figure 48, les zones de concentration de dommages s'alignent selon 3 linéaments à Port-au-Prince.

L'alignement, de direction nord-ouest / sud-est, au sein de la formation de Delmas est cohérente avec la disposition radiale de mise en place des sédiments au sein du cône, depuis le point d'alimentation principal à partir des reliefs au sud (situé à Pétienville). Elle se trouve par ailleurs intégralement dans une des unités géologiques décrite dans la carte géologique à grande échelle de Port-au-Prince (Bachhuber, 2010) (cf. Figure 24).

En revanche, nous ne pouvons proposer aucune explication satisfaisante pour les deux autres. On peut au moins faire le constat que ces deux alignements sont subparallèles à la faille d'Enriquillo, à travers deux formations géologiques distinctes (le Pliocène et le Miocène).

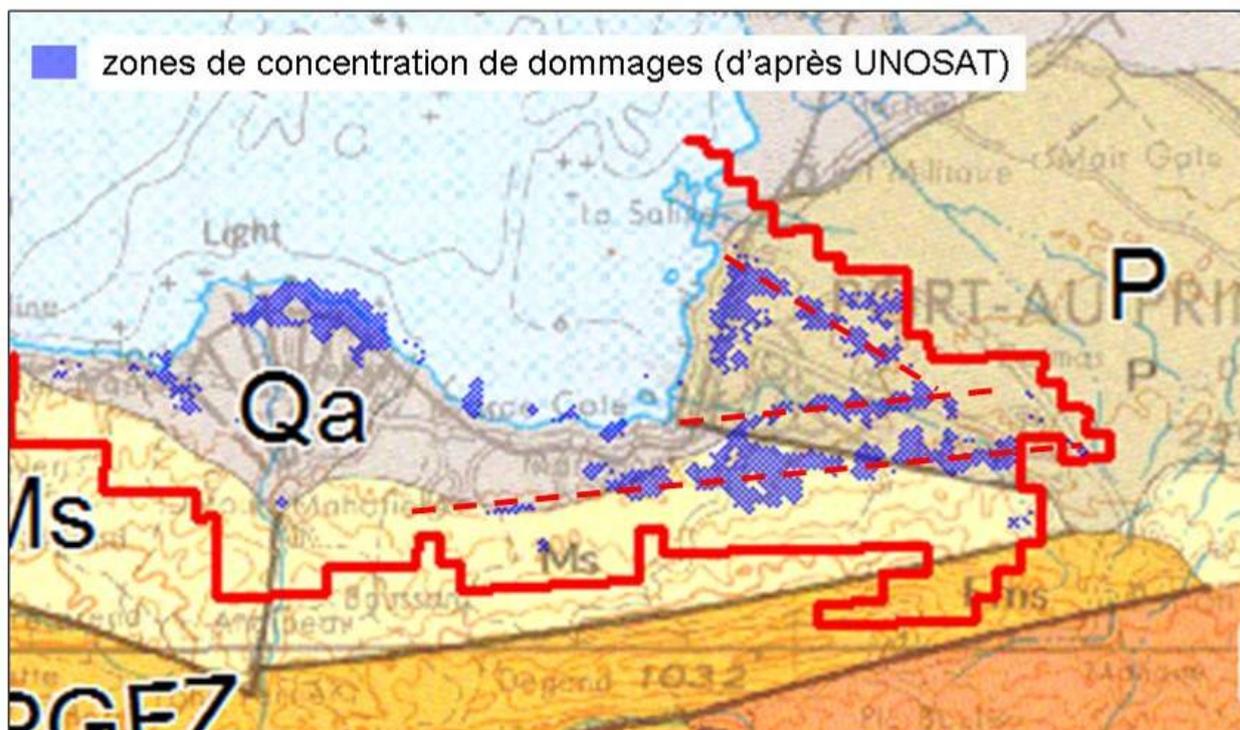


Figure 48 - Orientation de certaines zones de concentration de dommages selon des directions particulières

4.6.3 Effets de site topographique

Lors des investigations menées dans le cadre de la mission AFPS, il n'a pas été mis en évidence de zone de concentration de dommages pouvant être liée à un effet de site topographique. Quelques zones habitées présentant a priori une morphologie suspecte aux environs de Carrefour La Boule et de Morne l'Hôpital au sud-est de Port-au-Prince, ne présentent pas de dommages significatifs.

Cependant, nos investigations concernant les effets de site topographique n'ont pas été assez approfondies pour permettre de conclure catégoriquement à l'absence de ce type d'effet.

4.6.4 Enseignement pour des microzonages sismiques à Haïti

Les mesures H/V sont une technique facile et peu coûteuse pour mettre en évidence des effets de site et aider à la cartographie des zones homogènes de réponse de sols. Ces mesures sont donc largement utilisées.

Dans des conditions habituelles d'utilisation, il est facile de trouver des sites peu passants et sur des sols naturels dans les zones urbaines. Certaines mesures sont effectuées de nuit pour avoir un bruit de fond ambiant pas trop élevé.

Dans le contexte de Port-au-Prince, les conditions de sécurité empêchent les mesures de nuit et dans certains quartiers. Les places publiques, jardins ou zones dégagées, sont occupées par les camps de réfugiés rendant les mesures quasi impossibles sur ces sites. Dans certains quartiers la concentration d'habitations est telle qu'il n'est pas évident de trouver du sol naturel dégagé. Les sites disponibles sont dans des cours intérieures de propriétés privées ou d'établissement publics. Certains sites dégagés correspondent à des bâtiments rasés pour lesquels on suppose que les fondations sont encore en place avec par-dessus des remblais. Ces conditions peuvent masquer certains effets de site sur les mesures H/V. Enfin, les formations détritiques terrigènes, fréquentes sur la ville de Port-au-Prince, sont fortement hétérogènes avec par endroit des brèches très dures passant très rapidement à des formations altérées et des argiles. La condition énoncée plus haut empêche d'utiliser l'H/V pour détecter des limites entre les différents faciès sur courte distance.

Si dans des zones comme Léogane ou à l'extérieur de Port au Prince vers l'intérieur de la Plaine de Cul-de-Sac, la technique H/V peut être utilisée abondamment et être d'une grande aide au zonage. A l'intérieur de Port-au-Prince, il ne pourra être fait qu'une utilisation ponctuelle de cette méthode.

Le microzonage de la zone urbaine de Port-au-Prince devra s'appuyer en premier lieu sur des reconnaissances de faciès géologiques à partir de visites de terrain. Un MNT très précis aidera aussi à la

limitation des zones. Les images satellites de Google Earth permettent déjà un dégrossissage de la cartographie géologique. Les zones de forte concentration de dommages lors du séisme de janvier sont aussi une source d'information pertinente pour cibler des zones où des effets de sites sont à identifier.

L'utilisation d'études géotechniques préexistantes est indispensable. Le LNBTP rassemble et numérise un certain nombre d'études existantes et commence à les géo référencer. Cette centralisation des études et la constitution d'une base de données type Banque de Données du Sous-Sol, ou BSS gérée par le BRGM en France, est une étape préliminaire aux études de microzonage à Haïti.

Enfin des mesures géotechniques et géophysiques complémentaires (y compris H/V quand c'est possible) devront être mis en œuvre, mais sur une dernière étape du processus.

4.7 Effets induits

4.7.1 Mouvements de terrains

4.7.1.1 Éboulements multiples au sein de formations meubles

Quelques rapports édités peu de temps après le séisme ont parlé de secteurs dont les dégâts pourraient être liés à la multiplication d'éboulements affectant des talus d'origine anthropique, au sein de zones en pente avec un habitat dense et plus ou moins précaire et entraînant la ruine totale ou partielle des constructions en amont et/ou en aval (Davidovici, 2010 ; Mompelat, 2010). Les bâtiments, proches les uns des autres, peuvent entraîner la ruine d'autres constructions en aval (effet domino).

Une zone de concentration de dommages est réputée avoir été le siège de telles instabilités : il s'agit des versants bordant la route de Canapé Vert (Figure 49). Elle se situe au sein de la formation détritique de Delmas qui présente à cet endroit un faciès peu grossier (sables et limons) sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. En condition statique, le matériau possède une cohésion suffisante pour assurer une relative stabilité à des talus très raides voire sub-verticaux (pente supérieure à 50° / 60°). Toutefois, le matériau est peu consolidé et friable. Les vibrations du sol lors du séisme du 12 janvier ont donc pu sans difficulté, désagréger les assemblages de grains plus ou moins fins constituant le matériau, d'où la multiplication des éboulements observés. Cependant l'effet domino évoqué plus haut n'est pas évident et les instabilités ne semblent donc pas être, à Canapé Vert, la cause principale de la très forte densité de dommages constatée.

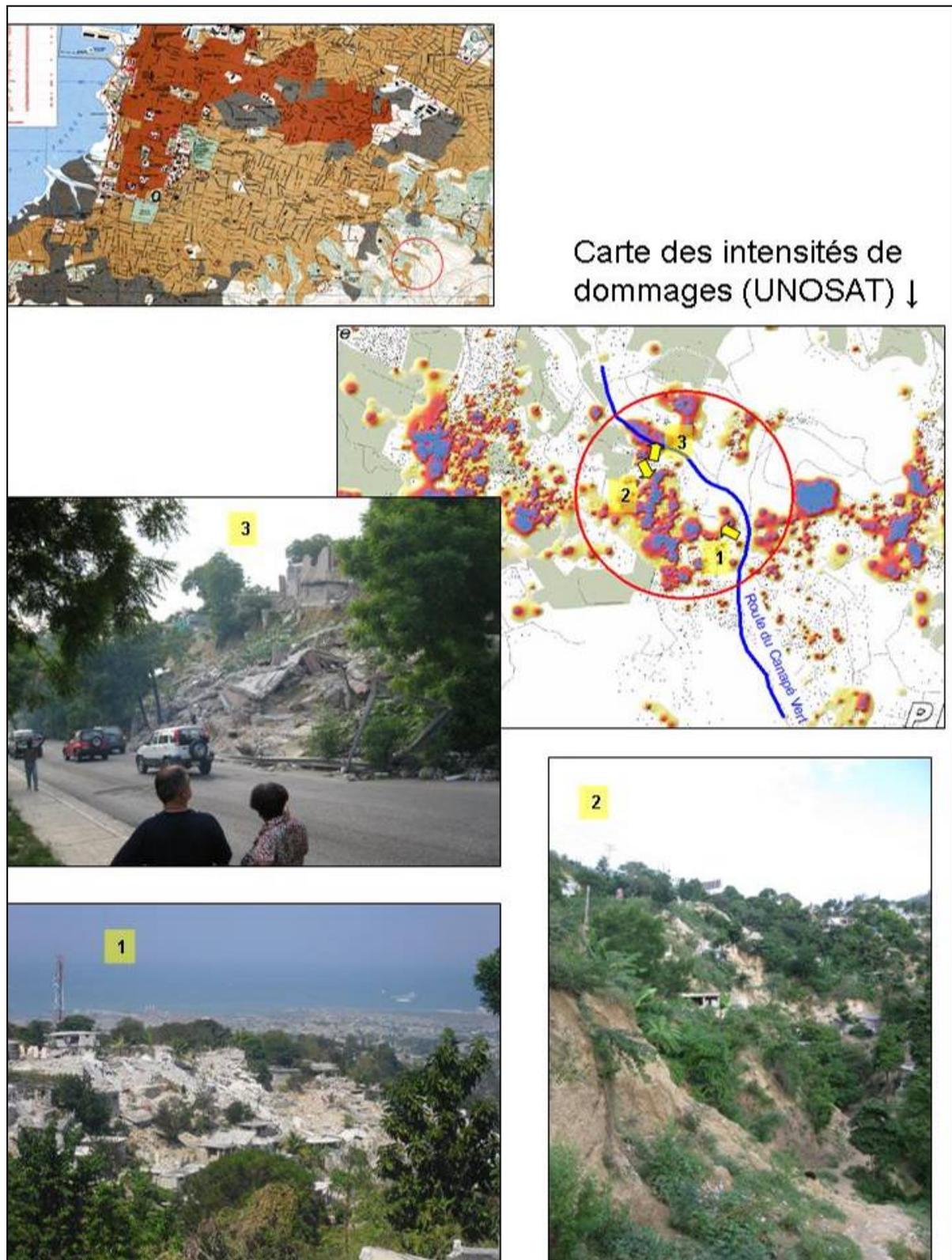


Figure 49 - Dégâts au bâti et éboulements le long de la route du Canapé Vert

4.7.1.2 Eboulements et chutes de blocs à Carrefour la Boule

La localité de Carrefour la Boule est située au sud-ouest de Pétienville. Elle a subi de nombreux mouvements de terrain (Figure 50) et est remarquable dans le sens où elle cumule sur un espace relativement réduit, un nombre important de configurations à éviter vis-à-vis des mouvements de terrain, *a fortiori* en zone sismique.

Carrefour la Boule se situe au sein des calcaires éocène, à proximité immédiate de la faille d'Enriquillo. La roche, massive aux environs de Pétienville, y est densément fracturée et mylonitisée (au point de se désagréger aisément en pseudo sable). Le matériau a justement été exploité pour le sable (au moins en partie de manière anarchique). Il en résulte des fronts d'exploitation plus ou moins étendus, concernant la hauteur et la longueur des fronts de taille. Une constante cependant, les fronts laissés à l'abandon sont le plus souvent sub-verticaux et sans aucune risberme. Leur stabilité n'est donc pas assurée, ce qui s'est largement vérifié lors du séisme.

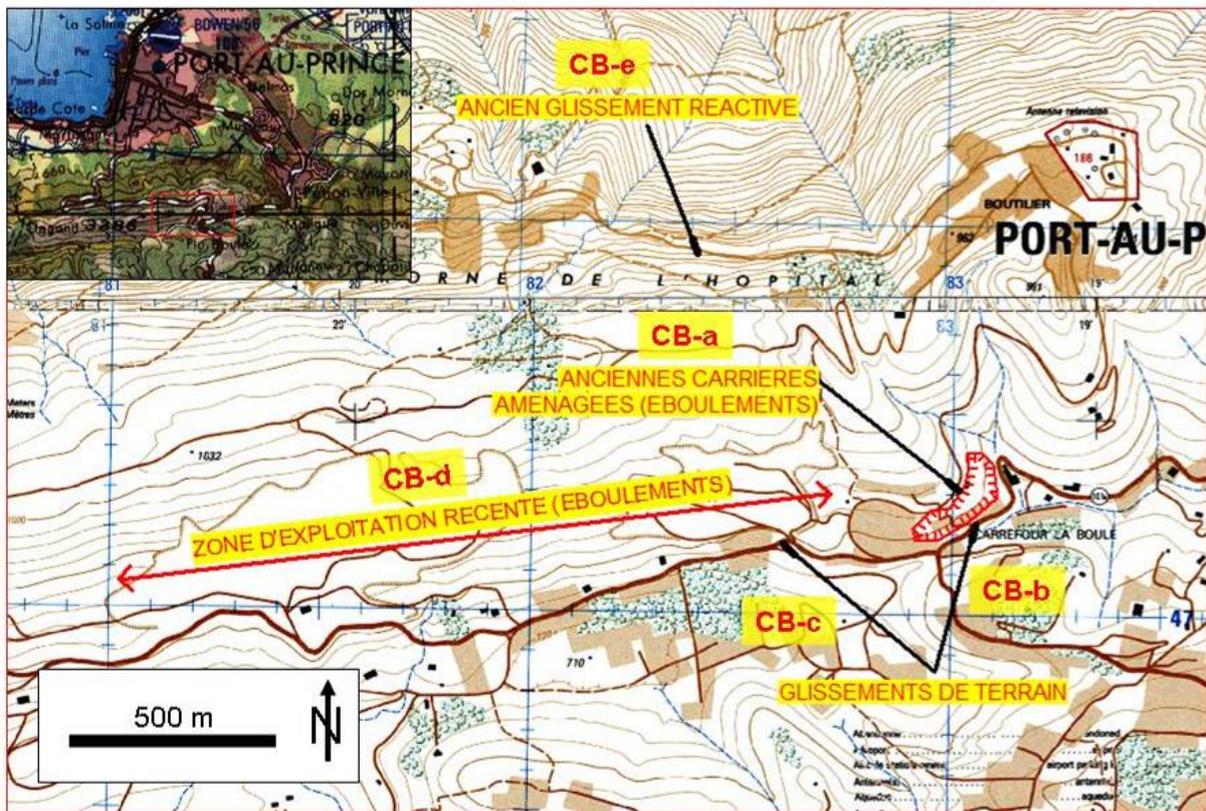


Figure 50 - Instabilités aux abords de Carrefour La Boule (sites CB-a à CB-e)

Anciennes carrières aménagées (Figure 50 ; site CB-a)

Un de ces anciens sites d'exploitation présente un front subvertical haut de 15 à 20 m sur 150 m environ de long. Plusieurs maisons ont été implantées immédiatement en pied de ces parois. Lors du séisme, un éboulement a affecté la totalité du front en arrière de 3 maisons. Les éboulis constitués de matériaux foisonnés et de blocs ont pénétré à l'arrière des maisons et les ont partiellement ensevelies. 4 personnes sont mortes dans une des maisons alors qu'aucune n'a subi de dégât direct lié aux vibrations du sol. Plus loin, dans une configuration similaire, c'est une case qui a été complètement recouverte ensevelissant une personne âgée (d'après les riverains).

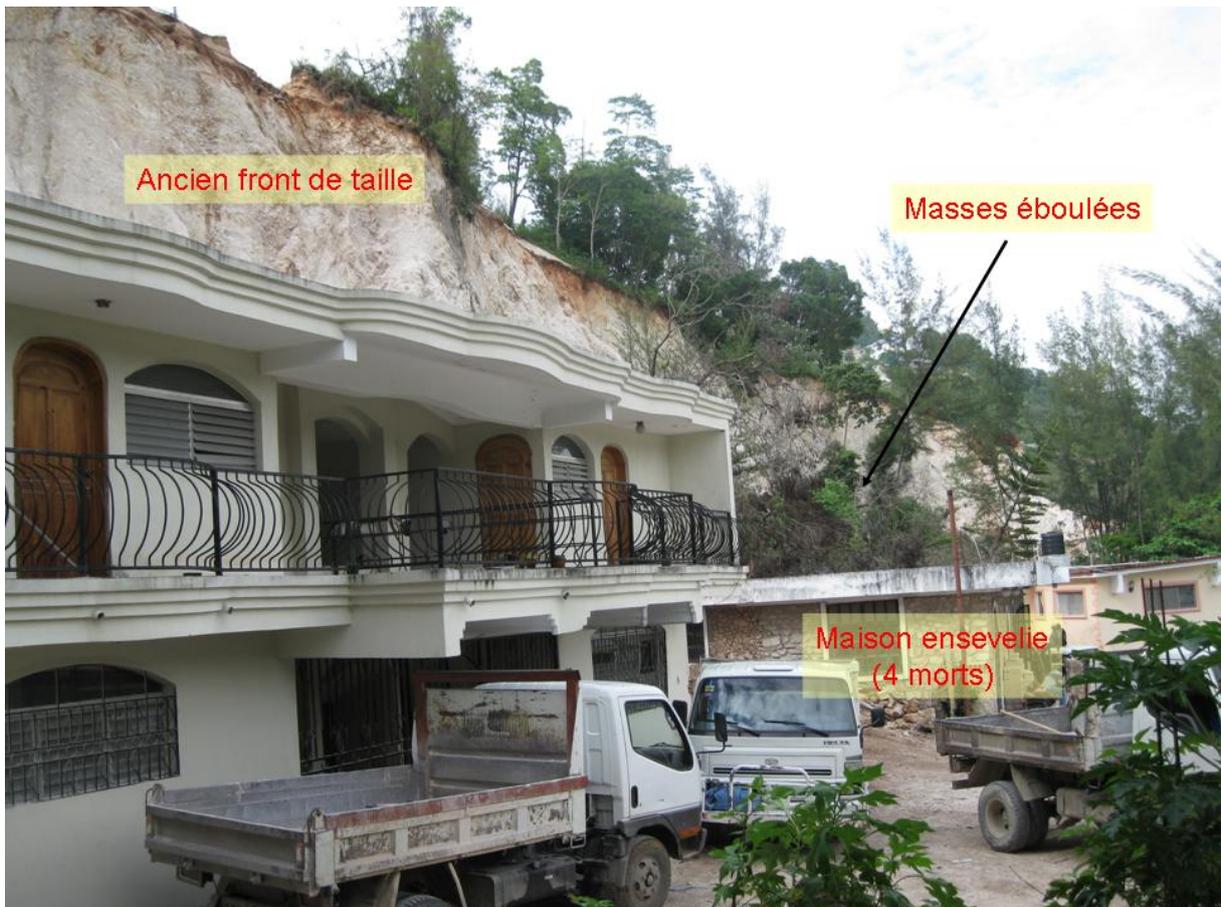


Figure 51 - Eboulement au sein d'une ancienne carrière aménagée (site CB-a)



Figure 52 - Eboulement au sein d'un ancien front de taille (site CB-a)

Il n'y a pas eu que des problèmes en aval (Figure 53). L'unique route d'accès à des quartiers en amont (Boutillier, Morne l'Hôpital) où est implanté un important centre de télécommunications, était en partie implantée en bordure immédiate de la crête du talus (à moins que ce soit la crête qui ait reculé au fil de l'exploitation pour se rapprocher de la route). L'éboulement a emporté 3 à 4 m d'accotement et une partie de la chaussée. La portion de route la plus exposée est désormais fermée pour des raisons de sécurité sur une centaine de mètres de long. Une piste a pu être aménagée en arrière. Dans le cas contraire c'est tout un quartier ainsi qu'un site à fort enjeu qui aurait été durablement isolé.

Actuellement, il n'y a pas de danger immédiat pour la route, mais elle reste menacée à moyen / long terme aussi bien côté aval que côté amont où d'anciennes niches d'arrachement sont visibles.

Il est surprenant de constater à quel point le danger a été ignoré dans toute la zone, alors que les talus présentaient selon toute vraisemblance des signes d'instabilité avant le séisme. Les riverains n'envisageaient probablement pas des phénomènes d'une telle ampleur.

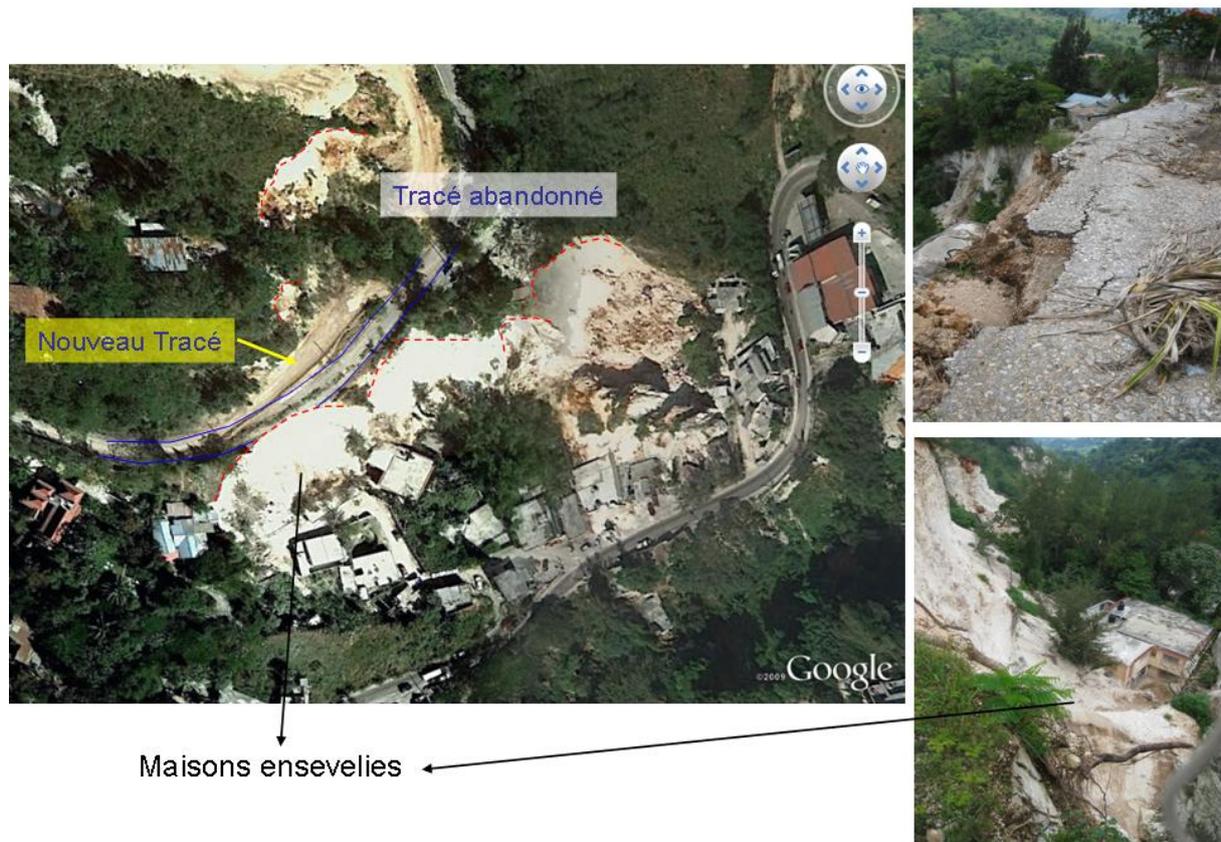


Figure 53 - Eboulement au sein d'une ancienne carrière aménagée – vue d'ensemble (site CB-a)

Glissement en tête de versant (Figure 50 ; sites CB-b et CB-c)

Dans la même zone, au pied des anciennes exploitations, la route est située en crête d'un versant abrupt haut d'une quinzaine de mètres, en rive gauche d'un petit cours d'eau. La route est bordée par une bande de terrain plan, large de quelques mètres, jusqu'à la crête de versant. Elle a été affectée par une amorce de glissement de terrain provoquée par le séisme (site CB-b), à un endroit où elle est construite. Deux constructions au moins sont fissurées mais ne se sont pas écroulées. Dans les deux cas, l'arrière des bâtiments (côté route) est encore sur du terrain stable (Figure 54). Il n'est pas possible de connaître la nature des terrains de fondation. Il peut s'agir de remblais (étant donné le contexte) mais des terrains en place constitués de calcaires mylonitisés peuvent également avoir été déstabilisés. Dans tous les cas, l'implantation de construction en pareille configuration était risquée et force est de constater que l'aléa mouvements de terrain n'a pas été correctement pris en compte.



Figure 54 - Glissement de terrain en bordure de route à Carrefour La Boule (site CB-b)

Plus loin, immédiatement à l'ouest de Carrefour La Boule (joutant la maison « Barbancourt »), la route est en position sommitale. Elle est bordée au nord par un front d'exploitation et au sud par un versant aménagé. Un glissement survenu lors du séisme affecte la route et ses abords côté sud, sur 40 m de long et sur la quasi-totalité de sa largeur (site CB-c ; Figure 55). Pour l'instant, les déplacements sont limités et la route est praticable (seul le revêtement bétonné de la chaussée et fracturé, sans organisation particulière des fissures). Mais en cas de nouvelle forte secousse ou lors de fortes pluies, l'instabilité risque de s'accroître avec pour conséquence, la coupure durable du principal axe de desserte des quartiers situés plus à l'ouest.



Figure 55 - Glissement en bordure de route à Carrefour La Boule, près de la Maison Barbancourt (site CB-c)

Carrière instable (Figure 50; site CB-d)

Plus à l'ouest, entre la Boule et le lieu-dit Grenier, au nord de la route, une immense excavation est présente (1,5 km de long, 300 m de large et des fronts allant jusqu'à 150 m de haut). Il s'agit d'une carrière exploitant les calcaires mylonitisés, fermée par les autorités suite au séisme, pour des raisons de sécurité, en raison du risque d'éboulement. L'exploitation s'est faite a priori sans aucun schéma directeur et surtout sans aucun souci de la stabilité des talus. Aucune risberme n'a été aménagée ce qui est assez remarquable pour des fronts de taille de plus de 100 m de haut dans un matériau friable et fracturé.

Aujourd'hui, il est difficile d'envisager une reprise d'activité, et la décision des autorités de cesser l'exploitation semble justifiée de ce point de vue. Plusieurs maisons (a priori occupées) sont désormais très près des crêtes des fronts de taille et donc directement menacées à court terme par de futurs éboulements (Figure 56).



Figure 56 - Carrière à Carrefour La Boule – fronts de taille non sécurisés (site CB-d)

Réactivation d'anciens éboulements et chutes de blocs (Figure 50 ; site CB-e)

A partir de Carrefour la Boule, une route puis une piste desservent une zone habitée en contrebas du versant nord du morne l'Hôpital, La route est implantée 100 à 200 m sous la ligne de crête au sein d'un versant très escarpé (pente de 40°). D'après les riverains, c'est a priori actuellement l'unique axe de desserte, l'autre accès depuis l'est n'étant plus praticable.

Un ancien glissement survenu lors de récents cyclones (2008 ?) avait endommagé la route. Il avait affecté le versant sur 30 à 40 m en amont. Une masse rocheuse a ainsi été mobilisée au sein des calcaires éocènes, sur 3 à 4 m d'épaisseur et une trentaine de mètres de large, au dessus d'un plan de fracture subparallèle à la pente (Figure 57).

Lors du séisme de janvier dernier, des éboulements et chute de blocs ont affecté les bords de la niche d'arrachement et ont probablement obstrué la piste. Un des blocs de taille plurimétrique, nettement visible sur l'image GeoEye post-séisme disponible sur Google Earth, est présent 250 m en contrebas, à une distance horizontale de 500 m de la niche. Des traces récentes matérialisent sa trajectoire. Toutefois, il n'a pas été possible d'établir s'il s'agit d'une remobilisation des masses glissées avant le séisme du 12 janvier ou si c'est un bloc éboulé depuis la niche d'arrachement lors du séisme.

Actuellement, la niche d'arrachement n'est pas stabilisée et des blocs volumineux en équilibre précaire sont visibles en amont de la piste (Figure 57). Ils peuvent tomber à tout moment, et a fortiori en cas de sollicitation sismique. Ils représentent donc une menace permanente pour tous ceux qui empruntent la piste. De manière générale, le versant est fortement exposé à un risque d'instabilité de même nature que celle présentée ici, en cas de forte sollicitation (pluie ou séisme). Aussi, la piste peut être obstruée voire même emportée, ce qui pourrait avoir pour conséquence d'isoler durablement la zone habitée desservie.



Figure 57 - Réactivation d'un ancien glissement près de Carrefour La Boule et risque résiduel
(Site CB-e ; explications dans le texte)

4.7.1.3 Mouvements de terrain et réseau routier à Port-au-Prince

De manière générale le réseau routier de la région de Port-au-Prince a peu souffert à cause de mouvements de terrain. De nombreux éboulements, généralement peu volumineux, ont certes affecté les talus et entravé la circulation. Mais les chaussées n'ont pas (à notre connaissance) été endommagées par des mouvements aval. Localement, des fissures sont visibles le long de la route au sein de l'accotement aval (par exemple sur la route de Bourdon). Elles affectent vraisemblablement des remblais et constituent d'avantage une menace pour les constructions en aval que pour les routes.

4.7.1.4 Mouvements de terrain et réseau routier hors de Port-au-Prince (hors tassements de chaussée)

Dans les zones visitées hors de Port-au-Prince dans le cadre la mission AFPS, assez peu de mouvements de terrain ont été observés.

Quelques éboulements affectant des talus de déblai amont rocheux ou brèchiques se sont produits le long de la nationale 2 entre carrefour et Grand Goâve, sans impact significatif sur la route (Figure 58).



Figure 58 - Exemple d'éboulement le long de la route entre Carrefour et Grand Goâve

La route 204 qui relie Leogane à la ville de Jacmel a été affectée par de nombreuses instabilités (communication orale du BME, Rathje et al. 2010), qu'il s'agisse de glissements de terrain, d'éboulements ou de chutes de blocs. Cette route était déjà connue pour être particulièrement exposée (communication orale de JM Maurin, CIAT). Au cours de la mission AFPS, seuls les 4 premiers km depuis la localité de Dufort ont été observés. Le long de cette portion plusieurs éboulements ont en effet été observés (Figure 59). Même si la route est aujourd'hui déblayée, le risque d'instabilité résiduel au sein des différentes niches d'arrachement est élevé. La route et ceux qui l'empruntent sont directement exposés. Rathje et al. (2010) signalent une portion de cette même route 204 particulièrement affectée à environ 15 km au nord-ouest de Jacmel, à partir d'observations d'images satellitiques.



Figure 59 - Route de Jacmel - blocs potentiellement instables au sein du talus amont

En dehors de ces deux axes routiers (nationale 2 et route 204), des routes secondaires ont été localement affectées par des éboulements et chute de blocs, comme le montre la Figure 60 au sud de la ville de Carrefour. Ces instabilités ont du vraisemblablement entraver significativement la circulation juste après le séisme, voir même occasionné des dégâts aux constructions. Mais à ce jour aucun inventaire des désordres

ayant affecté ce type de route n'a été établi à notre connaissance. Un tel inventaire mériterait d'être réalisé afin de comprendre le contexte dans lequel ils se sont produits ainsi que leurs principaux effets. De telles informations sont utiles dans le cadre de la prévention des mouvements de terrain.

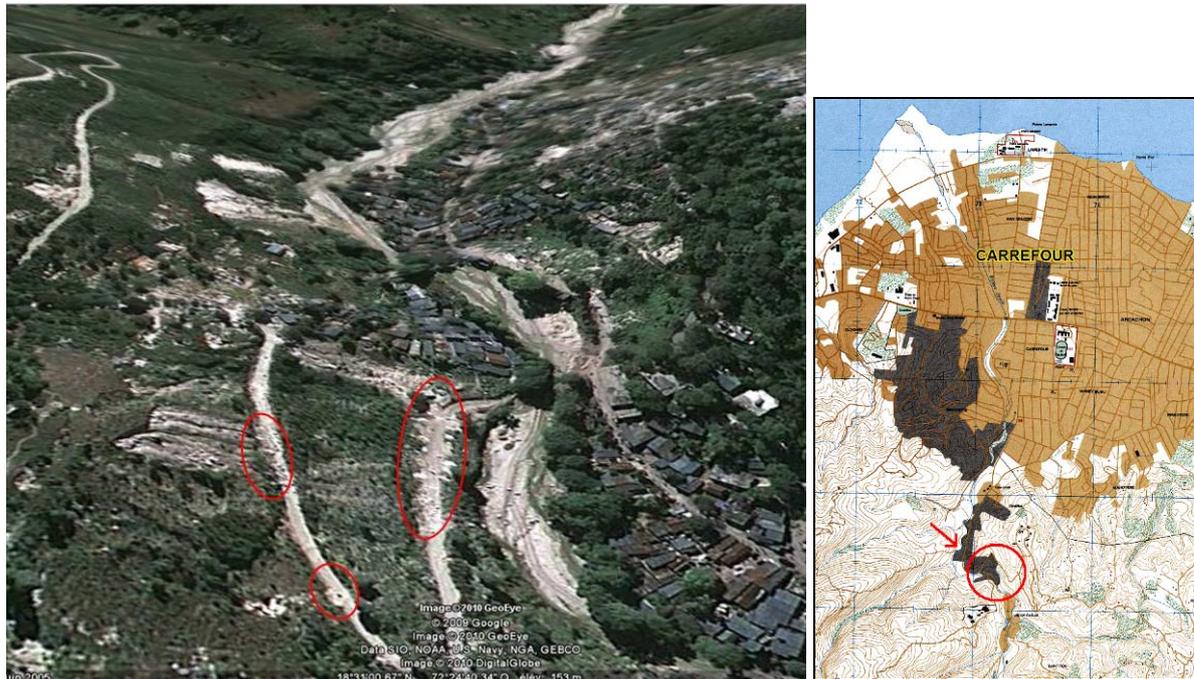


Figure 60 - Eboulement affectant le réseau routier secondaire au sud de Carrefour
(Image Google post séisme du 12 janvier ; image©2010GeoEye)

4.7.1.5 Tassements routiers entre Carrefour et Grand Goâve

Entre Carrefour et Grand Goâve, la route nationale 2 est affectée en plusieurs points de fissurations importantes affectant toute ou partie de la chaussée ainsi que ses abords sur plusieurs dizaines de mètres de long. Cette fissuration s'accompagne de tassements décimétriques côté aval et/ou côté amont et dans certains cas, de légers déplacements horizontaux (Figure 61).

Ces phénomènes existaient déjà pour la plupart avant le séisme qui a accentué les désordres.

Les zones concernées sont le plus souvent situées en plaine, au sein au en arrière de mangrove ou de zone humides (de type prairie inondée).

Compte tenu du contexte, il s'agit probablement de tassements différentiels accompagnant des phénomènes de thixotropie au sein de niveaux de vases et d'argiles plastiques. Aucune donnée géotechnique n'a cependant permis de vérifier cette hypothèse. L'hypothèse de phénomènes de liquéfaction ne peut être totalement écartée mais semble peu probable compte tenu de la nature des désordres.

Dans quelques cas, ces phénomènes de fissurations / tassement affectent des remblais de part et d'autre d'ouvrages hydrauliques de franchissement. Ces remblais ont sans doute été réalisés sans les traitements généralement mis en œuvre en pareil cas (substitution des mauvais sols, rechargement, compactage, ...).

L'une des situations les plus remarquables de trouve de part et d'autre du pont franchissant une rivière au lieu-dit « Fauché », où les remblais s'élèvent jusqu'à 3 m de haut au dessus de la plaine. Les désordres sont tels que l'accès au pont est interdit et le franchissement se fait à gué. Le franchissement est donc impossible en cas de crue.



Figure 61 - Fissuration et tassement de la chaussée entre Carrefour et Grand Goâve

4.7.1.6 Autres mouvements de terrain

En dehors des zones ayant fait l'objet d'observations directes, plusieurs zones de concentrations de mouvements de terrain sont identifiées sur les images satellite post-séisme en haute résolution (GeoEye) disponibles sur Google (Figure 62). Les formations géologiques concernées sont pour l'essentiel l'Eocène et le Miocène Inférieur. Les zones affectées ne sont pas ou très peu habitées.

Dans de nombreux cas de figure, il s'agit de la réactivation d'instabilités précédentes (Figure 63), probablement liées aux fortes intempéries les plus récentes (cyclones de l'année 2008).

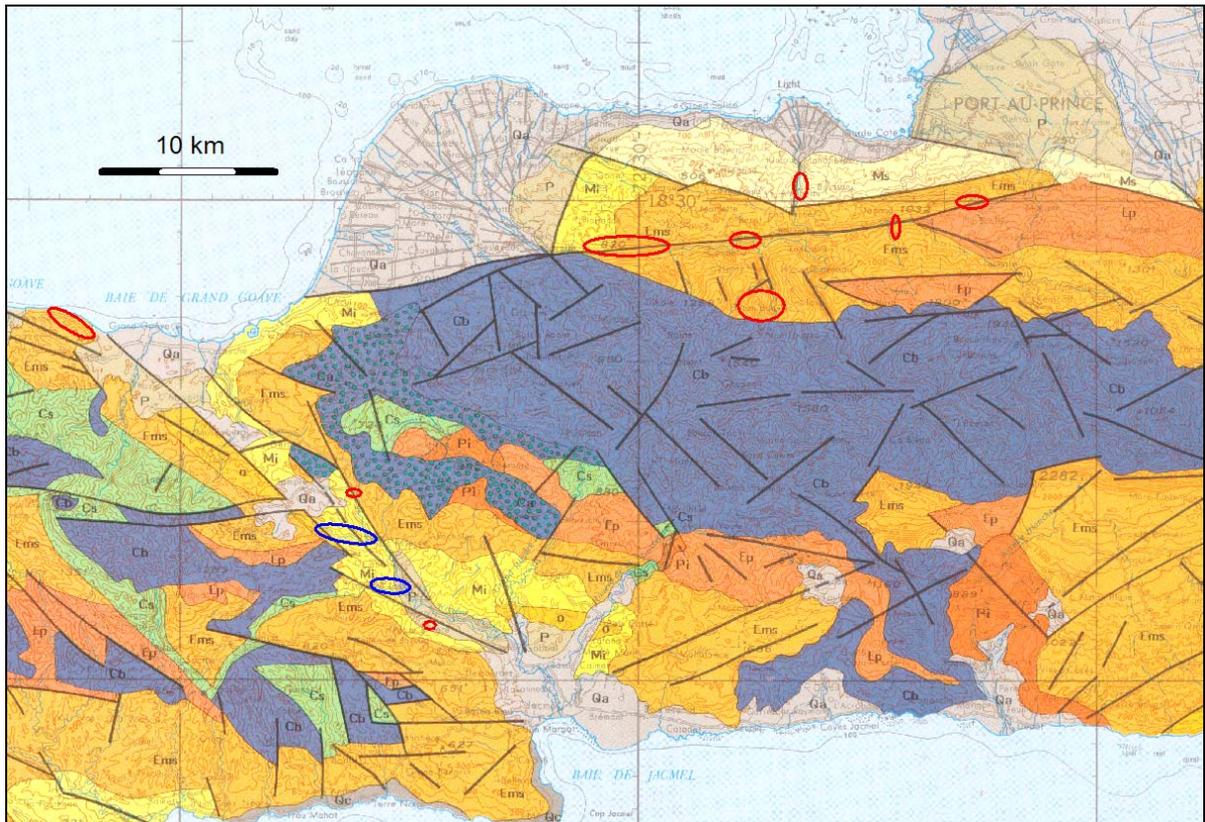


Figure 62 - Zones de concentration d'instabilités identifiées sur Google et reportées sur la carte géologique au 1/250 000
(En bleu, celles à l'origine de barrages sur les cours d'eau)



Figure 63 - Réactivation et extension d'anciens glissements au sud de Carrefour
(Vues avant et après le séisme de janvier 2010)

Au nord ouest de la ville de Jacmel, les versants de deux cours d'eau, affluents en rive gauche de la rivière Gauché (qui débouche à Jacmel) sont affectés par de nombreux et volumineux glissements d'ampleur pluri-décamétrique (Figure 62 et Figure 64). La plus grande niche mesure 130 m x 330 m. Ils ont provoqué presque autant de barrages dans les cours d'eau avec des accumulations d'eau. Aujourd'hui il n'est pas possible de connaître la situation de ces retenues artificielles et donc le risque résiduel. Une évaluation de la situation est aujourd'hui souhaitable. On peut cependant indiquer, compte-tenu de la grande quantité de matériaux dans les rivières, que les premières très fortes pluies vont s'accompagner de crues particulièrement chargées, avec un potentiel érosif accru par rapport à une crue « normale ». Cependant, à l'analyse des images sur Google, les enjeux humains semblent peu importants en aval.

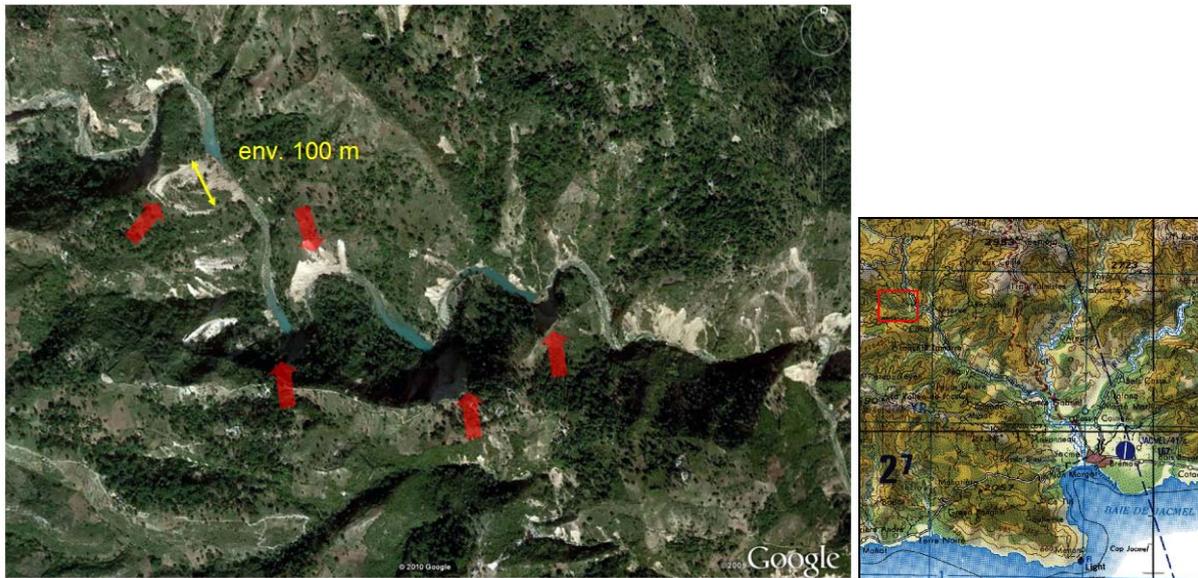


Figure 64 - Exemples de barrages naturels occasionnés par des glissements de terrain au nord-ouest de Jacmel

4.7.2 Liquéfaction

4.7.2.1 Préambule

Le séisme du 12 janvier en Haïti a provoqué des phénomènes de liquéfaction, dont les plus spectaculaires (et les plus médiatisés également) sont ceux survenus dans la zone portuaire de Port-au-Prince. Moins connus mais tout aussi spectaculaires, de grands glissements côtiers ont affecté la côte en plusieurs endroits entre Leogane et Grand Goave.

En dehors de ces effets les plus remarquables, des phénomènes de fissuration et de propagation latérale se sont produits en grand nombre de Port-au-Prince à Grand Goave et au delà.

Dans le cadre de la mission AFPS, il n'était pas question d'inventorier de manière détaillée et exhaustive les zones affectées. Un travail poursuivant cet objectif a été réalisé par l'équipe américaine du GEER (Rathje et al., 2010), essentiellement à partir d'images satellite. Cela leur a permis de mettre en perspective les conséquences du séisme de janvier en termes de liquéfaction, par rapport aux grands séismes mondiaux susceptibles de générer de tels phénomènes induits (Figure 65).

Que ce soit pour la distance maximale à l'épicentre (38 km) ou pour la distance maximale à la faille en cause (26 km), le séisme d'Haïti est en deçà des effets correspondant à une magnitude de l'ordre de 7. Deux explications sont avancées par Rathje et al. (2010) : 1) le potentiel de liquéfaction des formations côtières est relativement modéré, notamment au fond de la baie de Port-au-Prince ; 2) la durée du séisme n'a pas été suffisante (nombre de cycles de chargement trop limité).

A noter que les distances maximales indiquées ici sont sans doute encore moindre, car il n'a pas été possible de retrouver sur les images Google Earth post-séisme, les indices de liquéfaction mentionnés par Rathje et al. (2010) au nord de la baie de Port-au-Prince.

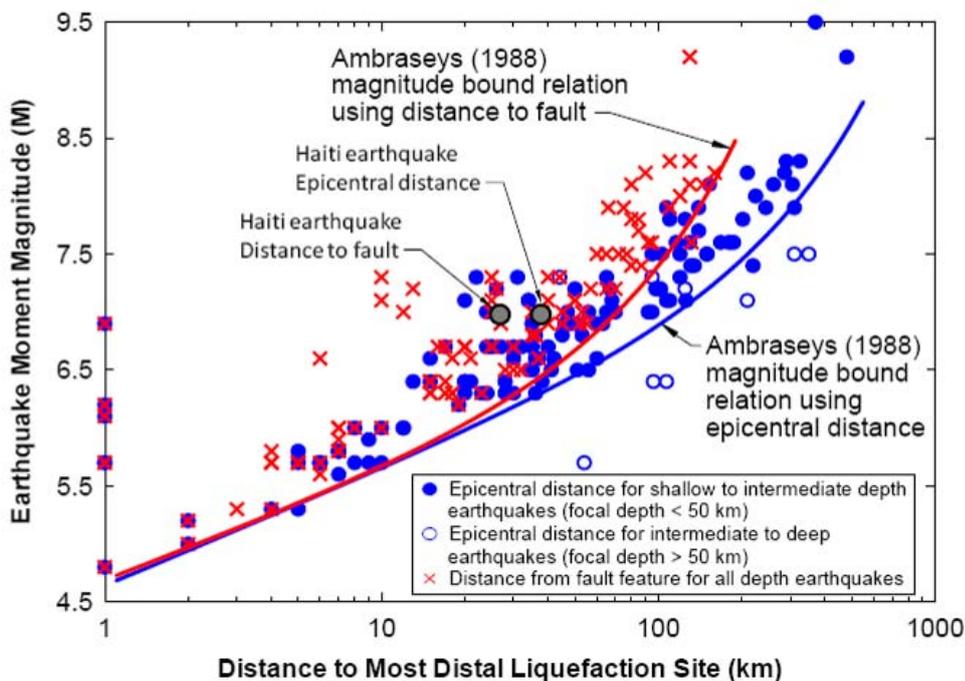


Figure 65 - Situation du séisme d'Haïti en terme distance à l'épicentre et à la faille en termes de liquéfaction, comparativement aux données mondiales (d'après Rathje et al., 2010)

4.7.2.2 Zone portuaire de Port-au-Prince

Au cours du séisme d'Haïti, les phénomènes de liquéfaction les plus spectaculaires sont ceux qui se sont produits au sein de la zone portuaire de Port-au-Prince. Ils sont accompagnés de fissuration, de tassements et de propagation latérale (lateral spreading) ayant occasionné des dommages importants aux infrastructures (Figure 66, Figure 67 et Figure 68). Dans le bâtiment de Sécurité de l'Autorité Portuaire Nationale, des projections de matière sablo-argileuse se sont produites à travers le dallage au sol (Figure 67).

Lors de la rencontre de la mission AFPS avec les autorités portuaires, il n'a pas été possible de recueillir les données géotechniques relatives à la mise en place des remblais et des ouvrages (digues, quais, ...) et entrepôts. Il n'a pas non plus été possible d'établir si la liquéfaction avait ou non été prise en compte. Les rapports géotechniques fournis à la mission AFPS par le LNBTP contiennent quelques références à proximité de la zone portuaire. Mais ils ne permettent pas de comprendre véritablement les phénomènes de liquéfaction. Ils permettent de constater que les formations superficielles en place sont constituées de sables, de vases et de débris végétaux (Figure 22). Les rares analyses granulométriques et essais en laboratoire disponibles ne permettent pas de vérifier les critères de susceptibilité qualitative à la liquéfaction des règles parasismiques, mais sans pour autant les exclure formellement.

Les remblais qui sont également potentiellement en cause ont été mis en œuvre sur des grandes surfaces dans la zone portuaire (cf. Figure 23 et Figure 69). Mais il n'a pas été possible de connaître la nature des matériaux utilisés et les modalités de leur mise en œuvre.



Figure 66 - Désordres liés à la liquéfaction au sein du port commercial de Port-au-Prince



Figure 67 - Projections de sable-argileux au sein du bâtiment de la sécurité de l'Autorité Portuaire Nationale

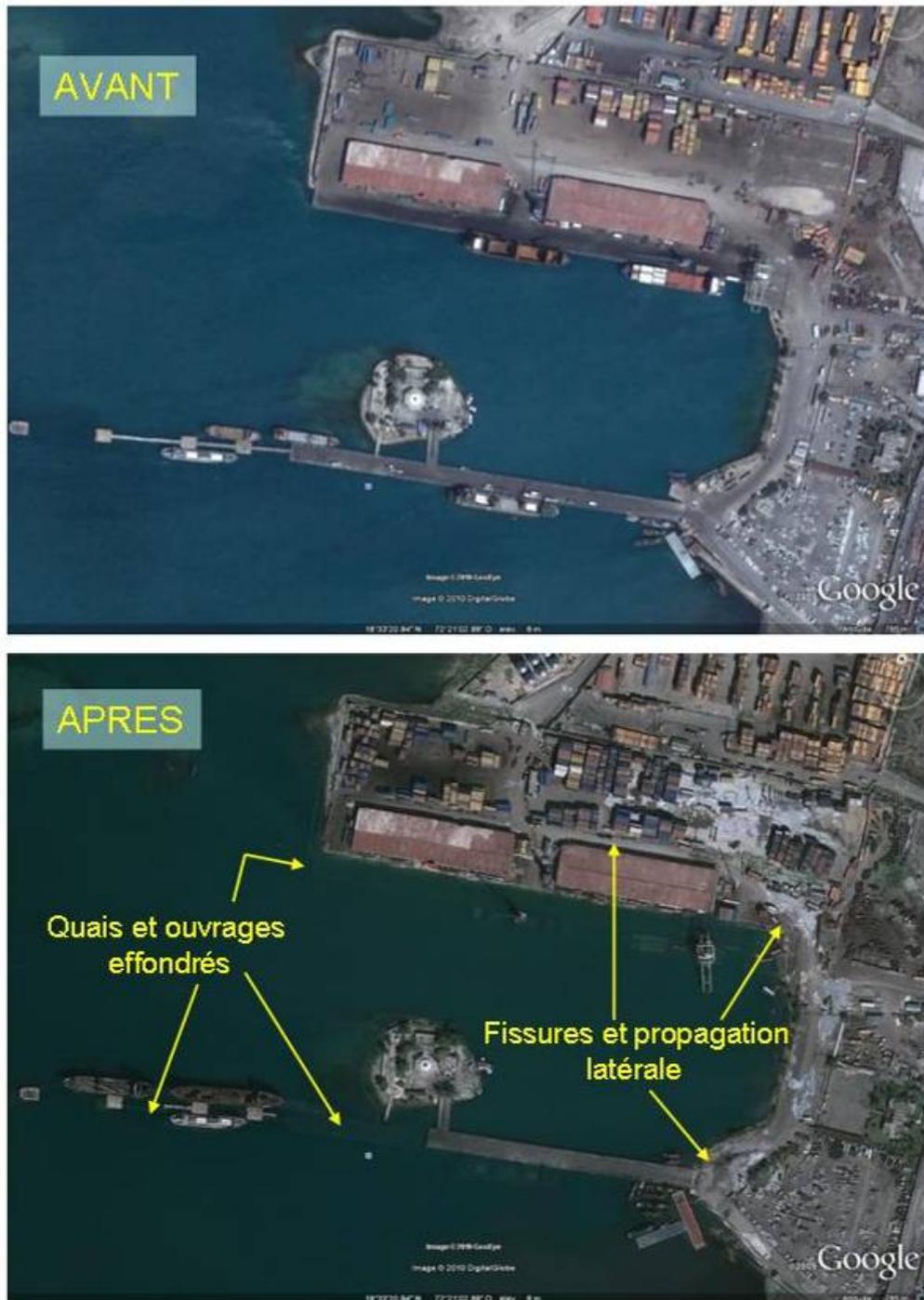


Figure 68 - Désordres liés à la liquéfaction au port de Port-au-Prince mises en évidence par comparaison d'images Google Earth d'avant et d'après séisme

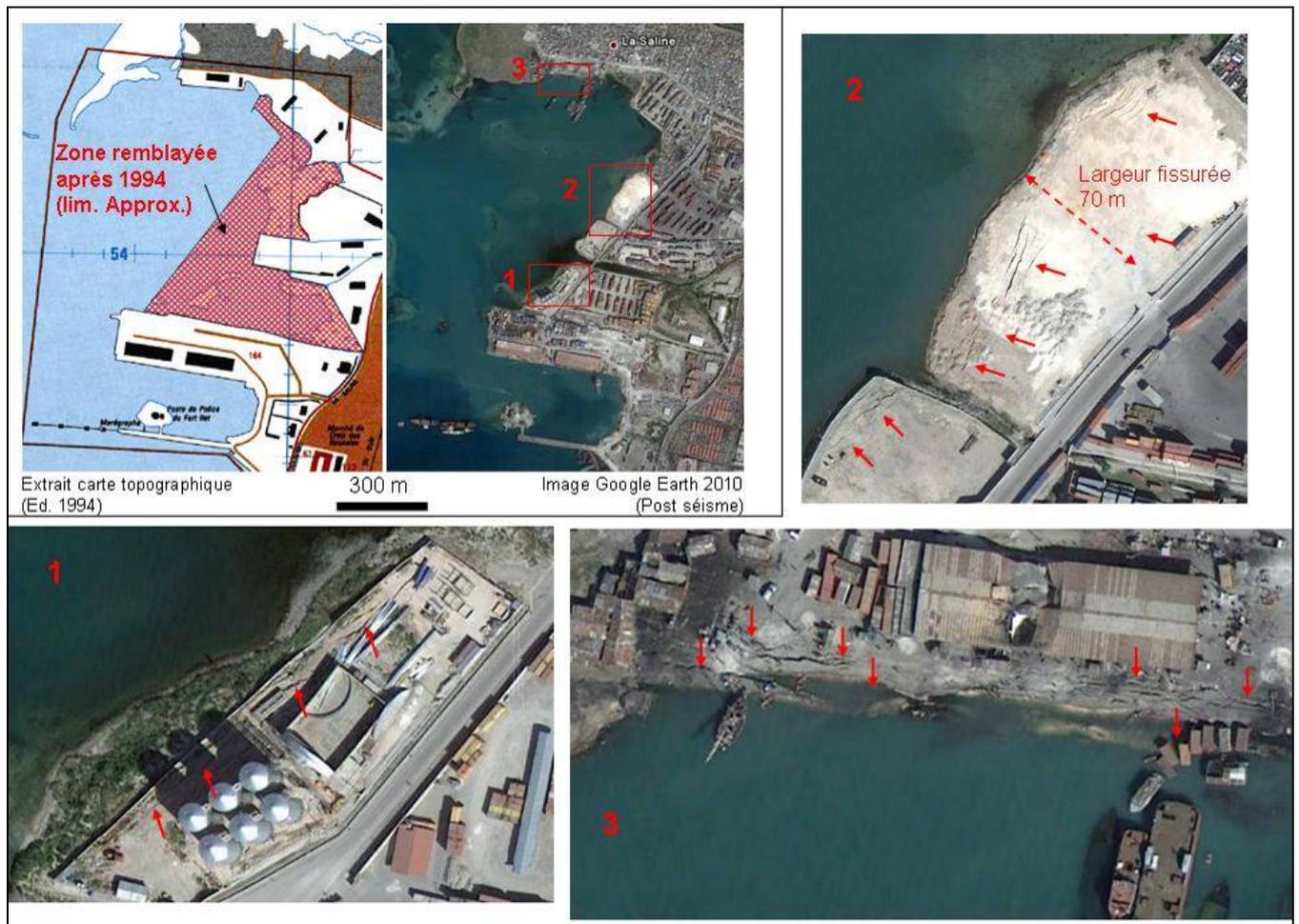


Figure 69 - Déstabilisation de remblais récents dans la zone portuaire

4.7.2.3 Cité l'Eternel

Ce chapitre ne décrit pas une zone de liquéfaction mais une zone a priori exempte de liquéfaction, ce qui peut paraître surprenant compte tenu du contexte.

En effet, comme indiqué à la Figure 23, le quartier « Cité l'Eternel » au sud-est de Port-au-Prince correspond à une zone remblayée sur environ 2 km². Alors que les phénomènes de liquéfaction et de propagation latérale sont présents à proximité, notamment dans la zone portuaire, l'absence supposée de liquéfaction peut surprendre. On parle d'absence supposée car ce postulat ne repose que sur l'analyse des images de Google Earth post séisme. Par ailleurs, ni le BME, ni le LNBTP questionnés à ce sujet ne signalent de liquéfaction dans la zone.

Deux explications peuvent être avancées :

- Les déchets divers de Port-au-Prince qui forment a priori l'essentiel du remblai, ne sont pas susceptibles de liquéfaction compte tenu vraisemblablement de leur hétérogénéité ;
- le substratum de la zone lui-même n'est pas liquéfiable. Il peut notamment s'agir de cayes (récifs frangeant) qui ont été recouvertes progressivement par une couche peu épaisse de sédiments meubles.

4.7.2.4 Suspicion de liquéfaction ponctuelle à Léogane

Il n'y a pas de liquéfaction signalée à Léogane. Pourtant les observations effectuées au centre de cette localité ont permis de mettre en évidence des désordres vraisemblablement liés à de la liquéfaction. Il s'agit d'un secteur localisé présentant des tassements de constructions (avec parfois un léger basculement) ainsi que des bombements et tassements ponctuels de trottoirs (et sans doute également l'intérieur d'une maison) qui n'existaient pas avant le séisme (Figure 70).

Si l'hypothèse est confirmée, cela signifierait qu'au sein des alluvions quaternaires, il existe des lentilles de formations liquéfiables, ce qui expliquerait pourquoi il n'y a pas de phénomènes généralisés de liquéfaction dans la zone. Une telle hypothèse n'est pas aberrante en contexte alluvionnaire et devrait donc être vérifiée dans la perspective de la reconstruction de la ville.



Figure 70 - Désordres au sein d'une zone de liquéfaction supposée à Léogâne

4.7.2.5 Liquéfaction et glissement côtier à Fouché

Quelques secteurs côtiers ont fait l'objet d'importants glissements liés à un phénomène de liquéfaction, entre Léogane et Grand Goâve. Plusieurs d'entre eux sont décrits dans le rapport du GEER (Rathje et al., 2010).

Nous décrivons ici le seul que nous ayons observé sur le terrain. Il se situe à proximité du lieu-dit « Fouché », à l'embouchure d'une rivière (Figure 71). C'est donc une partie du cône alluvial récent qui a été affecté d'un mouvement de propagation latérale ayant ensuite évolué en glissement affectant la bordure sous-marine du cône alluvial. Le rejet vertical en bordure côtière actuelle est de l'ordre de 2 à 3 m. La valeur de ce rejet vertical n'est pas connue au droit de l'ancien trait de côte.

L'instabilité présente une grande extension puisque qu'elle affecte la côte sur 330 m de long. La largeur maximale considérée par rapport à la position du trait de côte d'avant séisme est de 100 m environ. A cela il convient d'ajouter une vingtaine de mètres de terrains fissurés en arrière ainsi que la partie sous-marine de la zone glissée en avant de l'ancien trait de côte (largeur inconnue).

En considérant une épaisseur moyenne de 5 à 10 m d'alluvions mobilisées, le volume glissé serait au moins de l'ordre de 200 000 à 300 000 m³.

D'après le rapport du GEER, il y aurait au moins 3 ou 4 autres phénomènes similaires ainsi que plusieurs zones de « latéral spreading » n'ayant pas évolué en glissement.

A noter pour terminer, que des instabilités équivalentes ont été décrites lors du séisme d'Izmit en Turquie en 1999.

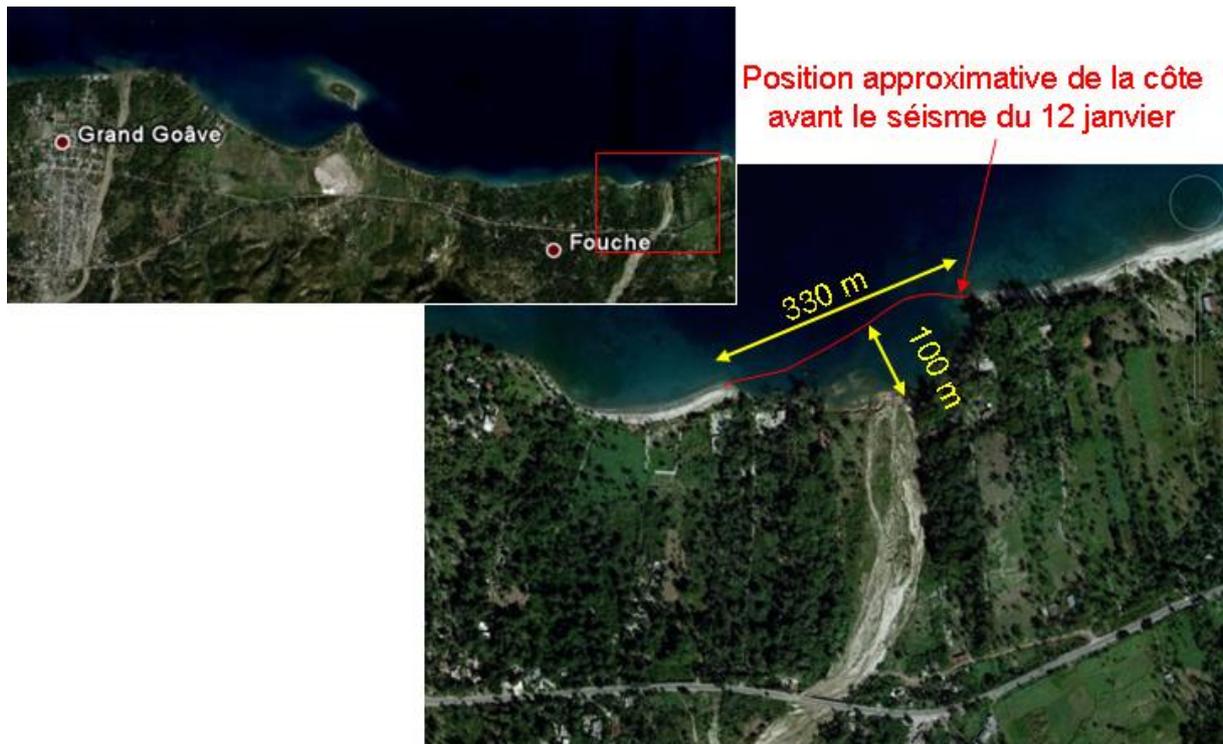


Figure 71 - Propagation latérale et glissement côtier lié à la liquéfaction à « Fouché »

4.8 Synthèse des enseignements et recommandations

4.8.1 Pour Haïti

Dans tous les domaines relatifs à l'étude et à la gestion de l'aléa sismique, quelle que soit l'échelle d'approche, les besoins sont considérables en Haïti. Les principaux aspects suivant devraient être traités en priorité :

Mise en place d'un réseau de surveillance sismique permanent

Un réseau de surveillance sismique permanent avec transmission en temps-réel devrait être déployé. Il devrait comporter des équipements constitués à la fois de sismomètres pour la détection des petits séismes et d'accéléromètres pour évaluer la réponse des sols.

Il faut en parallèle prévoir l'installation d'un centre de données de réception avec des moyens techniques et en personnels pour maintenir le réseau et assurer l'information officielle des autorités en cas de crise. Cela suppose un effort important de formation initiale spécifique des personnels impliqués.

Le réseau envisagé doit couvrir le pays de façon homogène car l'aléa est élevé aussi bien au nord qu'au sud. Le nombre de stations est évalué à 8 au minimum. Idéalement, le déploiement du réseau devrait se faire en concertation avec la République Dominicaine. Des collaborations et échanges de données en temps réels avec le réseau de République Dominicaine pour améliorer la surveillance au bénéfice des deux pays devraient être entrepris.

En attendant la mise en place d'un véritable réseau sismologique haïtien, il convient de maintenir autant que possible le réseau temporaire temps-réel existant.

De même il convient bien entendu de maintenir voire même de renforcer le réseau de GPS existant, qui a fait ses preuves.

Poursuite et renforcement des études d'aléa régional et local

Des questions se posent encore sur les failles qui ont joué en janvier et les mécanismes en jeu. Des lacunes d'informations existent pour de nombreuses zones qui n'ont pas encore rompu, notamment sur le système EPGFZ (Enriquillo-Plantain Garden Fault Zone), au droit de Port-au-Prince et surtout plus à l'est. Des questions majeures se posent sur d'autres systèmes de failles qui traverseraient la ville. Les mêmes interrogations existent ailleurs dans le pays et notamment le long de la faille septentrionale.

Il faut donc entreprendre un travail exhaustif d'actualisation de la cartographie des failles afin de les hiérarchiser en termes d'activité potentielle. Il faut pour ce faire mettre en œuvre l'ensemble des moyens habituellement mobilisés pour atteindre ce type d'objectif (études géologiques et géophysiques en mer et à terre, acquisition de données topographiques détaillées, de données bathymétriques, ...).

Ces approches doivent être couplées avec des études de paléosismicité, incluant l'exploitation des données aussi bien historiques que néotectoniques.

Cartographie géologique et microzonages sismiques

Il est impératif de prendre compte l'aléa sismique dans l'aménagement du territoire. Le microzonage sismique est un des outils permettant d'atteindre cet objectif, *a fortiori* à court terme dans le cadre de la reconstruction. Il convient donc de prévoir une programmation pluriannuelle permettant d'adapter les priorités aux enjeux de la reconstruction mais aussi de la préservation de l'existant (au sein des agglomérations du nord notamment).

La cartographie géologique à 1/250 000 disponible est très insuffisante pour des approches de type microzonage. A terme, il conviendrait de couvrir le territoire haïtien par un zonage à 1/50 000, à l'instar de celui qui est en voie d'achèvement (fin 2010) en république dominicaine.

Il s'agit cependant d'un objectif à moyen terme qui ne s'accommode pas des nécessités à court terme liés à la reconstruction. Dans cette optique, les études de microzonage sismique qui seront lancées devront s'appuyer au cas par cas, sur des études géologiques et géophysiques détaillées, avec l'acquisition d'un volume adéquat de données nouvelles, pour compenser les lacunes d'information actuelles.

Renforcement des capacités en géotechnique

Il serait utile de mettre en place en Haïti, une base de données nationale du sous-sol, à vocation multiple (géologie, géotechnique, hydrogéologie) afin de partager utilement l'information. L'environnement juridique et réglementaire qui permettrait l'instauration d'une telle base, n'existe pas. Il est recommandé également de mettre en place un cadre réglementaire (national ou issu d'une organisation professionnelle locale) permettant de cadrer les études de sol (à l'instar de la norme AFNOR NF P 94-500 utilisée en France).

Il conviendrait aussi de rassembler dans une même base de données, l'ensemble des études géotechniques, incluant un géo-référencement des études et une description de leur contenu. Un tel travail (actuellement initié par le LNBTP) doit être poursuivi et renforcé, en particulier dans le cadre de la reconstruction. Il devrait s'étendre à l'ensemble des études géotechniques réalisées dans le pays et pas uniquement celles réalisées par le LNBTP.

Enfin, il faut encourager la poursuite du travail de cartographie géotechnique à grande échelle entrepris par l'Université d'Etat d'Haïti, dans l'est de la capitale.

4.8.2 Pour les Antilles françaises

Les Antilles françaises sont dans un contexte sismotectonique global similaire à Haïti, à proximité de la frontière de plaque Caraïbes / Amérique du Nord (ou Atlantique). L'aléa sismique y est sans doute aussi élevé qu'en Haïti mais va se manifester différemment.

A Haïti, l'aléa vient principalement de forts séismes superficiels de magnitude 7 à 8 sur de grands systèmes de failles décrochant à très courtes distances. Les zones fortement affectées sont très étendues. La proximité de la faille et la rupture peu profonde rendent ces séismes particulièrement destructeurs.

En Guadeloupe ou Martinique, les forts séismes viennent de la zone de subduction (magnitudes 7 à 8 possibles) à des distances supérieures à 50 km. Une magnitude 8 de subduction à 50-60 km pourrait donner des accélérations aussi fortes que le séisme d'Haïti et affecter fortement la majeure partie de la Guadeloupe ou de la Martinique (cf. séismes de 1839, 1843). Mais une magnitude 7 équivalente au séisme du 12 janvier aurait des effets plus modérés bien qu'avec des dommages probablement plus conséquents que celui de novembre 2007 en Martinique (Magnitude 7.4 mais à 150 km de distance hypocentrale).

Les failles superficielles proches en Guadeloupe/Martinique sont beaucoup plus petites qu'à Haïti. En conséquence les magnitudes attendues sont plus faibles (jusqu'à 6 à 6.5) mais suffisantes pour produire de fortes intensités (~VIII) à proximité de l'épicentre. Les zones concernées sont moins étendues et l'ampleur des dommages sera surtout fonction de la proximité des enjeux et d'une éventuelle exposition à des effets de site.

Le séisme a souligné avec acuité en Haïti le manque de connaissance sur les failles, leur fonctionnement et leur surveillance. De ce point de vue, pour les Antilles françaises, il convient notamment :

- d'améliorer la connaissance des failles sur le territoire. En Guadeloupe, cela passe nécessairement par la révision de la carte géologique. En parallèle, il convient de préciser autant que possible la géométrie et l'activité potentielle des systèmes de faille dans les zones à enjeux (agglomérations de Pointe-à-Pitre et Fort-de-France) ;
- de poursuivre et approfondir la connaissance des structures tectoniques en mer proches des territoires et leurs relations avec les systèmes à terre. Il s'agit notamment des travaux menés par l'Université Antilles Guyane à l'est de la Guadeloupe ainsi que les travaux menés par l'IPGP, notamment en Martinique et aux Saintes ;
- d'améliorer encore la connaissance des grandes structures tectoniques à l'échelle de l'Arc pour comprendre précisément comment s'accommodent la déformation le long de la plaque caraïbe et en déduire les points critiques et les magnitudes maximales associées ;
- maintenir un réseau de surveillance sismologique moderne sur les deux régions et mettre à disposition du public (au sens large), les données collectées.

Les effets du séisme d'Haïti montrent le rôle très probable des effets de site mais soulignent en même temps les difficultés qu'il y a pour bien comprendre et étudier ces phénomènes, du fait de données géologiques, géotechniques et géophysiques insuffisantes et/ou inaccessibles. Ces difficultés sont amplifiées lorsque la géologie locale est complexe (variation latérales et verticales de faciès, structures particulières, ...).

Aux Antilles françaises, le niveau de connaissance est meilleur dans un contexte géologique volcanique lui aussi complexe. Quelques points d'amélioration méritent d'être soulignés :

- Les îles de Martinique et de Guadeloupe bénéficient de cartes géologiques modernes à 1/50 000, qui s'avèrent très utiles pour les études de microzonage. Une seule carte ne répond pas à ce critère : il s'agit de la carte géologique de Basse-Terre qui date de 1966 et qui est notoirement considérée comme étant obsolète. Une révision rapide de cette carte est donc souhaitable;

- Une meilleure connaissance et idéalement une collecte au profit de la puissance publique, des données géologiques, géotechniques, géophysiques issues d'études particulières, réalisées par des bureaux d'étude, des universités ou organismes publics. Ces informations s'avèrent souvent fastidieuses et difficiles à rassembler lors de la réalisation des microzonages sismiques. Cette question soulève plus généralement celle de l'accès à des données de nature privée pouvant par ailleurs représenter un enjeu commercial légitime pour les bureaux d'étude. Une réflexion pourrait être engagée à ce sujet pour examiner les éventuelles voies réglementaires qui pourraient être adoptées lorsque des impératifs de sécurité et de protection au sens large des populations sont en jeu ;

Concernant les mouvements de terrain induits, quelques points méritent d'être mentionnés :

- le séisme d'Haïti a permis de souligner une nouvelle fois, les difficultés qui peuvent être induites par les mouvements de terrain affectant le réseau routier, en particulier dans les zones escarpées où les routes sont étroites. Il convient donc autant que possible d'identifier les points critiques et les traiter préventivement. Par ailleurs, il est important de prévoir, à l'échelle des quartiers, une organisation permettant de gérer, les premiers temps de la crise de manière autonome, certains axes de circulation risquant d'être impraticables.
- la gestion des carrières en activité et abandonnées a posé problème en Haïti. C'est plus particulièrement la Guadeloupe qui est concernée, avec de nombreuses zones d'extraction (autorisées ou non) dans les calcaires de Grande-Terre et de Marie-Galante (à comparer aux calcaires éocène de Carrefour La Boule). La sécurité des fronts de taille aussi bien en amont qu'en aval, en lien avec le réaménagement des sites doit être posée. Il existe des constructions implantées sans doute trop près des fronts qui eux même n'ont pas été sécurisés, en particulier dans le cas des anciennes exploitations illégales. Pour les carrières en activité cette fois (en Guadeloupe et en Martinique), il convient de s'assurer que l'exploitation prend bien en compte la sécurité des fronts de tailles et des installations sous sollicitation sismique, dans l'intérêt des usagers d'une part, et pour prévenir une rupture d'approvisionnement qui serait préjudiciable en situation post-crise sismique d'autre part.
- De multiples barrages dans les cours d'eau se sont produits en Haïti avec un risque résiduel qui n'est pas connu pour le moment. Ce type de risque est relativement mal connu aux Antilles françaises alors que qu'un phénomène important de même nature s'est produit lors du fort séisme historique de 1843 en Guadeloupe. Actuellement, un phénomène particulièrement spectaculaire affecte la vallée de la rivière du Prêcheur en Martinique. Le risque d'embâcle et de coulées associées mériteraient donc d'être mieux étudié et cartographié en Martinique et en Basse-Terre de Guadeloupe.
- D'importants phénomènes de liquéfaction accompagnés de propagation latérale de terrains sur faibles pentes, se sont produits en Haïti, en zone côtière et notamment dans la zone portuaire de Port-au-Prince. Les terrains affectés sont aussi bien naturels et que d'origine anthropique. Compte tenu de l'existence ce type de configuration, notamment en ce qui concerne les anciennes zones de remblai à Pointe-à-Pitre et à Fort-de-France (y compris les zones portuaires), il serait souhaitable de procéder à un diagnostic de la situation, évaluer les éventuelles conséquences pour la population et l'activité économique et le cas échéant, envisager des mesures préventives et/ou correctives.

4.9 Bibliographie

Documents post-sismiques consultés :

Bachhuber J., Rathje E., Kottke A. et Dulberg (2010), Haiti geologic map Port-au-Prince, GEER (Geo-engineering Extreme Events Reconnaissance)

Calais Eric (2010), site web perso sur le séisme d'Haïti : <http://web.ics.purdue.edu/~ecalais/haiti/>

Davidovici, V. (2010), Séisme de Port-au-Prince, Haïti 12 janvier 2010 – Mission interministérielle de la France du 5 au 9 février 2010 – Rapport d'expertise des bâtiments, Dynamic Concept, 48 p.

Eberhard M., S. Baldrige, J. Marshall, W. Mooney, G. Rix (2010) The Mw 7.0 Haiti earthquake of January 12, 2010 : USGS/EERI Advance Reconnaissance Team : Team Report V1.0.

Fierro E nd C. Perry (2010) Preliminary Reconnaissance Report – 12 January 2010 Haiti Earthquake. PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) report

Frankel, Arthur, Harmsen, Stephen, Mueller, Charles, Calais, Eric, and Haase, Jennifer, 2010, Documentation for initial seismic hazard maps for Haiti: U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1067, 12 p

Lacassin R., Klinger Y., Feuillet N., Armijo R., Taponnier P. (2010), Preliminary evaluation of the Haiti January 12, 2010, earthquake. Rapport de l'équipe tectonique. IPGP – 25 Janvier 2010.

Lin J., R.S. 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, 10 p.

Mompelat, JM, (2010), Mission d'expertise post-sismique du BRGM en Haïti du 19 au 25 février 2010, Observation préliminaires, Note interne BRGM, 8 p.

Mora S. (2010) Brief introductory note on earthquake hazards in Haiti. Rapport consultant Banque Mondiale.

Rathje E. et al. (2010), Geotechnical Engineering Reconnaissance of the 2010 Haiti Earthquake V1 February 22, 2010. GEER (Geo-engineering Extreme Events Reconnaissance) report.

UNOSAT. : Cartes et Atlas de dommages du séisme d'Haïti. UNOSTA programme opérationnel d'application satellite de l'UNITAR (United Nations Institute for Training and Research) http://unosat.web.cern.ch/unosat/asp/prod_free.asp?id=52

Références :

Ambraseys, N.N. (1988). Engineering seismology. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 17, 1-105.

Boisson D, Thimus JF., Guerrier K., B.J. Jean BJ. et H. Saint Jean H., 2008, Projet pilote de support géotechnique des zones habitables de Port-au-Prince, 4 feuilles.

Bonnefois-Claudet S., Baize S., Bonilla F. Berge-Thierry C., Campos J., Pasten C., Verdugo J. et Volant P., 2007, Comment caractériser les effets de site des structures complexes à partir du bruit sismique ambiant. Application au bassin de Santiago du Chili, 7^{ème} Colloque National de l'AFPS 2007 – Ecole Centrale Paris, 8 p.

Bureau des Mines et de l'Energie de la république d'Haïti, 2005, Notice explicative de la carte géologique d'Haïti au 1/250 000ème, 39 p.

Boore, D. M. & Atkinson, G. M. (2008), Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01s and 10.0s, *Earthquake Spectra*, 24(1), 99-138. DOI: 10.1193/1.2830434.

Calais, E. (2007) Mesures GPS en Haïti. Application à l'aléa sismique. Rapport d'étape – Juin 2007. Purdue University, USA. 16p.

Campbell, K. W. & Bozorgnia, Y. (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 10s, *Earthquake Spectra*, 24(1), 139-171. DOI: 10.1193/1.2857546.

Chiou, B. S.-J. & Youngs, R. R. (2008), An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra, *Earthquake Spectra*, 24(1), 173-215. DOI: 10.1193/1.2894832.

Field, E.H., and K.H. Jacob (1995). A comparison and test of various site-response estimation techniques, including that are not reference-site dependent, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, 1127-1143.

Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics d'Haïti – LNBTP, 2006, Inventaire des études géotechniques, Département de l'Ouest, 25 p.

Lachet, C., and Bard P.Y (1994). Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique, *J. Phys. Earth*, 42, 377-397.

Mann, P., Calais, E., Ruegg, J.-C., DeMets, C., Jansma, P.E. and Mattioli, G.S., 2002, Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS measurements and geological observations: *Tectonics*, v. 21, p. 1057, doi:10.1029/2001TC001304.

Mann, P., F. W. Taylor, R. L. Edwards, and T. L. Ku, 1995, Actively evolving microplate formation by oblique collision and sideways motion along strike-slip faults: An example from the northwestern Caribbean plate margin, *Tectonophysics*, 246, 1 – 69.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR of RTR1*, 30, 1, 25-32.

Wald D.J. & T.I. Allen (2007). Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification. , *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97, 1379-1395.

5. DIAGNOSTICS POST-SISMIQUES D'URGENCE

Rédaction : Gérard Loustalot et Claude Hauss

5.1 La gestion de la crise

5.1.1 Un pays en état de choc

Le séisme du 12 janvier dernier a plongé Haïti dans un total désarroi devant l'immensité de la tâche, les pouvoirs publics n'étant pas préparés à affronter une telle catastrophe issue d'une menace oubliée.

L'absence de culture du risque sismique et de réglementation, l'extrême vulnérabilité des constructions d'une capitale très densément peuplée, un séisme de forte magnitude dont l'épicentre se trouvait non loin de celle-ci, ont été les ingrédients de l'une des plus grandes catastrophes sismiques de l'histoire humaine.

Le pays a dès lors dû faire face à un cumul d'urgences autour de la recherche des survivants, de la gestion des morts, des blessés et de l'aide aux rescapés, avec des institutions et services publics eux-mêmes très touchés. L'ONU chargée avant la crise de la sécurité publique, était elle-même victime de l'effondrement de son siège. Présidence, ministères et services publics de tous ordres ont perdu bâtiments, infrastructures et personnel en nombre important.

5.1.2 Nécessité d'inspecter les bâtiments non effondrés

Dans les 15 jours qui ont suivi le séisme, la fin des opérations de secours proprement dites a progressivement laissé place à l'organisation de l'aide humanitaire et la reconstruction du pays, opération de longue haleine qui nécessitera plusieurs décennies.

Dès lors, la nécessité d'évaluer le bâti non effondré s'est imposée afin de répondre aux exigences de :

- sécurisation des abords des bâtiments menaçant ruine afin d'éviter d'alourdir le bilan des victimes ;
- sécurisation des voies principales de communication ;
- programmation des interventions de démolitions urgentes ;
- sécurisation des bâtiments stratégiques dans la fonction de gestion de la crise.

Dans un second temps, cette évaluation devait permettre de :

- faciliter la reprise rapide et la continuité des activités ;
- informer les populations sur l'état des bâtiments et permettre leur réintégration chaque fois que possible ;
- sécuriser les axes secondaires de déplacements.

En l'absence d'anticipation et de préparation du pays à affronter ce type d'évènement, les premières inspections des bâtiments ou installations stratégiques ont été effectuées de manière désordonnée par les ONG présentes sur les lieux du sinistre.

Il est rapidement apparu nécessaire de coordonner ces interventions et de les organiser. Aussi, les autorités haïtiennes ont créé un Bureau d'Evaluation Technique des Bâtiments (BETB) au sein du Ministère des Travaux Publics, des Transports et des Communications (MTPTC), avec l'assistance de l'UNOPS (bureau des nations unies pour les services d'appui aux projets).

Pour les premiers diagnostics d'urgence, le MTPTC a contracté dans un premier temps avec une ONG française présente sur les lieux de sa propre initiative. Cette ONG s'étant montrée défailante, et dépourvue de toute méthode technique, la convention a été rompue et il a été fait appel à une société d'ingénierie américaine, sous couvert de l'UNOPS (organisme des Nations Unies). C'est donc la société Myamoto International, spécialiste des évaluations d'urgence des bâtiments, qui a apporté son savoir faire en la matière.

Même si la mobilisation des pouvoirs publics et la réactivité des divers protagonistes de l'opération ont été exemplaires, il paraît évident que l'anticipation et la préparation avant séisme doivent être recherchés afin que cette phase d'évaluation organisée soit opérationnelle au plus tôt, ce qui reste complexe face au chaos généré par un séisme destructeur.

Tel est le sens de la méthode de diagnostic d'urgence des bâtiments mise au point par l'AFPS et son chapitre Guadeloupe.

5.2 Les inspections d'urgence : un enjeu majeur

Dans le chaos qui suit immédiatement une crise sismique de forte intensité, les diagnostics d'urgence représentent un enjeu majeur. Il s'agit de statuer rapidement, et en limitant les erreurs d'appréciation, sur la solidité résiduelle des bâtiments. Des conclusions de ces diagnostics dépendront des décisions lourdes de conséquences prises en aval, sur l'occupation ou non de bâtiments, tant stratégiques que courants.

Dans la conception commune de l'AFPS et des pouvoirs publics français, **le diagnostic d'urgence ne décide pas, il apprécie un risque et informe.**

Il est destiné à être utilisé par des autorités publiques et exploitants de bâtiments, qui en dernier ressort décident au vu du diagnostic, de l'interdiction d'accès, ou de son autorisation, et du risque éventuel qu'ils acceptent de prendre étant donné les circonstances exceptionnelles d'une catastrophe majeure. Il ne faut donc pas négliger l'impact des diagnostics d'urgence sur les décisions prises à la suite de leur lecture. Les personnes et autorités exploitant les diagnostics, le font dans un processus de prise de décision que l'urgence ne permet pas de dérouler dans la sérénité et le recul intellectuel qui seraient souhaitables. Les décisions prises sont donc fortement influencées par le diagnostic d'urgence, faute d'avoir le temps nécessaire à une analyse complémentaire. Ces décisions sont nécessairement lourdes de conséquences sur la remise en marche de la société après la crise, et sur la sécurité directe des personnes. **Il importe donc que les décideurs utilisant les diagnostics d'urgence puissent avoir une confiance absolue dans ces diagnostics et dans ceux qui les mettent en œuvre.**

Les bâtiments stratégiques ont bien entendu un impact important sur l'organisation des secours et la remise en route des activités. On ne saurait statuer à la légère sur la solidité résiduelle du seul centre hospitalier général d'une île. Son évacuation poserait des problèmes organisationnels d'une grande complexité, avec un impact important sur l'offre de soins, et son occupation à tort risquerait d'aboutir à son anéantissement sans solution alternative.

Les bâtiments courants ont quant à eux un impact immédiat sur la sécurité de personnes particulières qui les occupent. On ne saurait statuer à la légère sur leur solidité, et ainsi faire prendre un risque aux personnes, ou dans le cas contraire obliger sans raison suffisante les habitants à devenir des sans-abris.

Le diagnostic d'urgence est destiné à la prise de décision rapide dans une situation chaotique. Il est également destiné à être complété par un diagnostic utilisant des moyens d'ingénierie classique (le calcul et la modélisation des structures), lorsque la situation de première urgence est passée.

Il est par conséquent important de considérer qu'un diagnostic d'urgence, s'il peut avoir droit à une certaine marge d'erreur dans son appréciation, cette erreur doit être bornée. Cependant, il doit toujours être réalisé avec une obligation de moyens garantissant à ceux qui l'exploitent de pouvoir prendre des décisions en connaissance de cause et en toute confiance.

La nécessité d'une méthode et d'une organisation dédiées au diagnostic d'urgence dans les zones fortement soumises au risque sismique, relève donc d'un certain bon sens.



Figure 72 - Ecoles, hôpitaux, centre des télécoms, commerces, bureaux, habitat : peut-on ou non utiliser ces bâtiments ?

Le diagnostic d'urgence est un enjeu majeur, et ne peut être réalisé à la légère.

5.3 Les inspections d'urgence en Haïti

5.3.1 Objectifs

L'enjeu principal de la démarche consistait en l'évaluation des dégâts de manière homogène et centralisée, avec comme objectifs de :

- coordonner les propositions d'assistance et les intégrer dans l'évaluation afin d'éviter les duplications ;
- démultiplier rapidement les équipes d'évaluation par la formation d'inspecteurs qualifiés ;
- associer, développer et intégrer au maximum l'expertise locale des professionnels haïtiens ;
- poser les bases de la phase de renforcement et de reconstruction.

Le Bureau d'Evaluation Technique des Bâtiments (BETB) a ainsi été chargé par le MTPTC de :

- réaliser l'évaluation des bâtiments des zones affectées par le séisme, à raison d'environ 100 000 inspections en 3 mois ;
- produire des documents cartographiques et de synthèse ;
- réaliser une base de données patrimoniale des constructions publiques, des bâtiments économiques stratégiques et des établissements recevant du public ;
- préparer les phases de renforcement et de reconstruction des bâtiments ;
- diffuser l'information auprès des partenaires, des acteurs internationaux, des professionnels de la construction et de la population.

5.3.2 La base de la méthode technique : l'ATC-20

La méthode technique retenue pour ces évaluations d'urgence est la méthode américaine ATC-20 adaptée à la typologie des constructions haïtiennes par le bureau d'études Miyamoto International qui s'est vu confier une mission d'assistance à maîtrise d'ouvrage pour coordonner les aspects techniques (mise au point de la méthode, organisation des inspections, formation des inspecteurs, contrôle qualité).

La méthode ATC-20 a été développée par l'association californienne Applied Technology Council, elle-même émanation de la Structural Engineers Associations of California. Elle est destinée à être utilisée par des professionnels du bâtiment, qui ne sont pas nécessairement ingénieurs diplômés.



Figure 73 - Manuels techniques et de terrain de la méthode ATC-20

La méthode a été développée pour être utilisée dans sa région d'origine, et est donc essentiellement orientée vers les typologies constructives fréquemment rencontrées en Amérique du nord. Ces typologies ne correspondent pas forcément à celles rencontrées aux Antilles, et notamment en Haïti. Ainsi par exemple, les bâtiments en maçonnerie ne sont-ils envisagés qu'avec des planchers en bois. Les bâtiments en

maçonnerie avec planchers en béton, ou avec hourdis creux et dalle de compression, comme il en existe beaucoup en Haïti ne sont pas traités.

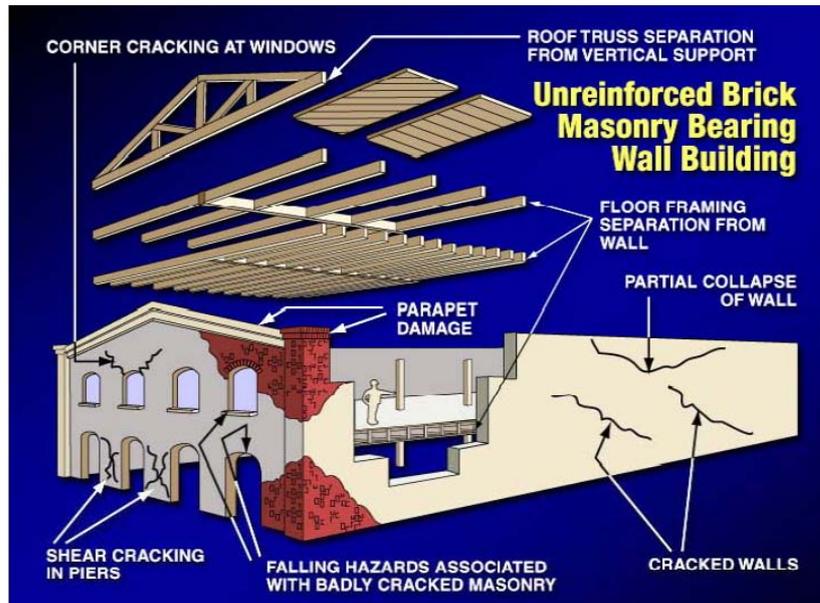


Figure 74 - Typologie structurelle de bâtiment en maçonnerie traité par l'ATC-20

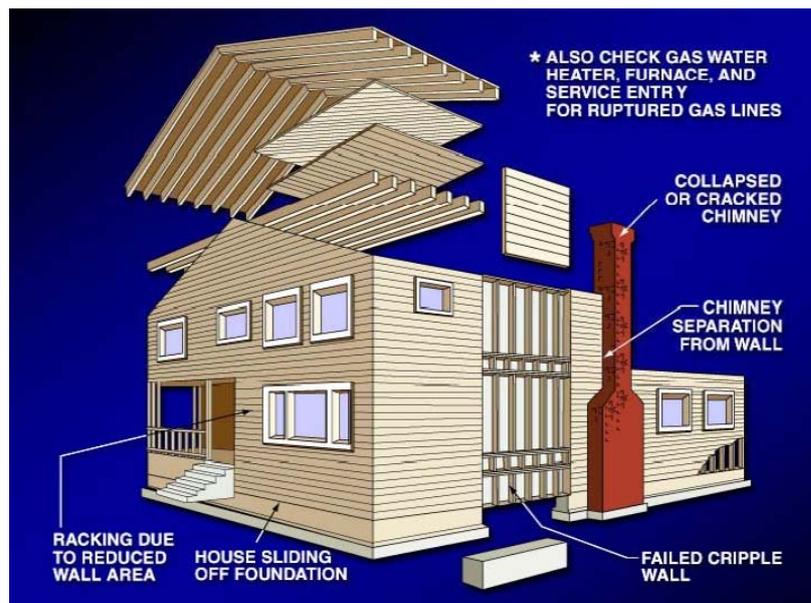


Figure 75 - L'habitat individuel traité par l'ATC-20 est en panneaux bois et typique de l'Amérique du nord

La méthode peut s'appliquer selon deux processus en fonction de l'endommagement rencontré :

Une méthode d'évaluation rapide (« rapid evaluation method »)

Prévue pour des cas simples et peu discutables, pour lesquels il est possible de conclure sur constat visuel et sans avis d'expert, et en général sans même pénétrer dans le bâtiment. Une fiche descriptive sommaire des dommages en une seule page est remplie. Si toutefois il n'est pas possible de conclure, le bâtiment est affiché jaune « RESTRICTED USE » et une inspection détaillée est demandée. Préalablement à l'utilisation de cette méthode simplifiée, l'inspecteur doit vérifier si ses 6 critères d'applicabilité sont respectés.

Condition:	Yes	No	More Review Needed
1. Collapse, partial collapse, or building off foundation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Building or story noticeably leaning	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Severe racking of walls, obvious severe damage and distress	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Chimney, parapet, or other falling hazard	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Severe ground or slope movement present	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Other hazard present (SEVERED GAS LINE)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Recommendations:

No further action required

Detailed evaluation required (circle one) Structural Geotechnical Other _____

Barricades needed in the following areas: _____

Other: BUILDING REQUIRES MAJOR REPAIRS.

Posted at the Assessment: Yes No

Comments: HOUSE HAS MOVED 1 TO 2- FEET OFF ITS FOUNDATION. CRIPPLE WALL FAILURE SEVERED GAS LINE HAS BEEN SHUT-OFF BY LOCAL GAS COMPANY.

ATC-20 Rapid Evaluation Safety Assessment Form

Inspection
Inspector ID: _____ Inspection date and time: _____ AM PM
Affiliation: _____ Areas inspected: Exterior only Exterior and interior

Building Description
Building name: _____ Address: _____
Building contact/phone: _____
Number of stories above ground: _____ below ground: _____
Approx. "Footprint area" (square feet): _____
Number of residential units: _____
Number of residential units not habitable: _____

Type of Construction
 Wood frame Concrete shear wall
 Steel frame Unreinforced masonry
 Tilt-up concrete Reinforced masonry
 Concrete frame Other: _____

Primary Occupancy
 Dwelling Commercial Government
 Other residential Offices Historic
 Public assembly Industrial School
 Emergency services Other: _____

Evaluation
Investigate the building for the conditions below and check the appropriate column.
Observed Conditions: Minor/None Moderate Severe Estimated Building Damage (excluding contents)

Observed Conditions:	Minor/None	Moderate	Severe	Estimated Building Damage (excluding contents)
Collapse, partial collapse, or building off foundation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> None
Building or story leaning	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 0-1%
Racking damage to walls, other structural damage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 1-10%
Chimney, parapet, or other falling hazard	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 10-30%
Ground slope movement or cracking	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 30-60%
Other (specify) _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 60-100%
				<input type="checkbox"/> 100%

Comments: _____

Figure 76 - Extrait de la fiche ATC-20 d'évaluation rapide

Une méthode d'évaluation détaillée (« detailed evaluation method »)

Une fiche d'évaluation en deux pages est remplie. Elle est uniquement descriptive, et l'inspecteur doit utiliser son jugement d'expert pour conclure. Il dispose de l'aide du manuel de terrain (« field manual »). La fiche ne comporte donc pas d'élément d'aide à la décision. La fiche détaillée introduit cependant la possibilité de commenter les descriptions, ce qui n'est pas prévu dans le processus simplifié. La motivation du jugement de l'inspecteur n'est pas clairement mise en évidence, et dépend fortement des commentaires libres qu'il appose sur la fiche.

Instructions: Examine the building to determine if any hazardous conditions exist. A "yes" answer in categories 1, 2, or 4 is grounds for posting building UNSAFE. If condition is suspected to be unsafe and more review is needed, check appropriate Unknown box(es) and post LIMITED ENTRY. A "yes" answer in category 3 requires posting and/or barricading to indicate AREA UNSAFE. Explain "Yes", "Unknown" findings and extent of damage under "Comments."

Condition	Hazardous Condition Exists			Comments
	Yes	No	Unknown	
1. Structure Hazardous Overall				
Collapse/partial collapse	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Building or story leaning	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Other _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
2. Hazardous Structural Elements				
Foundations	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Roof/floors (vertical loads)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Column/pilasters/corbels	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Diaphragms/horizontal bracing	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Walls/vertical bracing	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Moment frames	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1/2" CRACKING @ JOINTS
Precast connections	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NO PUNCHING SHEAR
Other <u>PLAT SLAB SYSTEM</u>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	CRACKS OBSERVED

Evaluation

Investigate the building for the conditions below and check the appropriate column. There is room on the second page for a sketch.

	Minor/None	Moderate	Severe	Comments
Overall hazards:				
Collapse or partial collapse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Building or story leaning	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Other _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Structural hazards:				
Foundations	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Roofs, floors (vertical loads)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Columns, pilasters, corbels	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Diaphragms, horizontal bracing	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Walls, vertical bracing	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Precast connections	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Other _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Nonstructural hazards:				
Parapets, ornamentation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Cladding, glazing	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Ceilings, light fixtures	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Interior walls, partitions	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Elevators	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Stairs, exits	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Electric, gas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Other _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Geotechnical hazards:				
Slope failure, debris	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Ground movement, fissures	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Other _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
General Comments: _____				

Figure 77 - Extrait de la fiche ATC-20 d'évaluation détaillée

Le manuel de terrain aborde de façon très exhaustive l'ensemble des thématiques techniques et procédurales nécessaires à l'inspecteur, mais chacun des chapitres correspondants reste cependant assez sommaire. Il a été conçu dans le nécessaire compromis entre portabilité et exhaustivité. Des manuels

techniques de référence plus complets existent, mais leur format ne les destinent pas aux inspections de terrain.

Les constructions sont abordées par typologie, et pour chacune d'entre elles le manuel de terrain liste les points particuliers à observer.

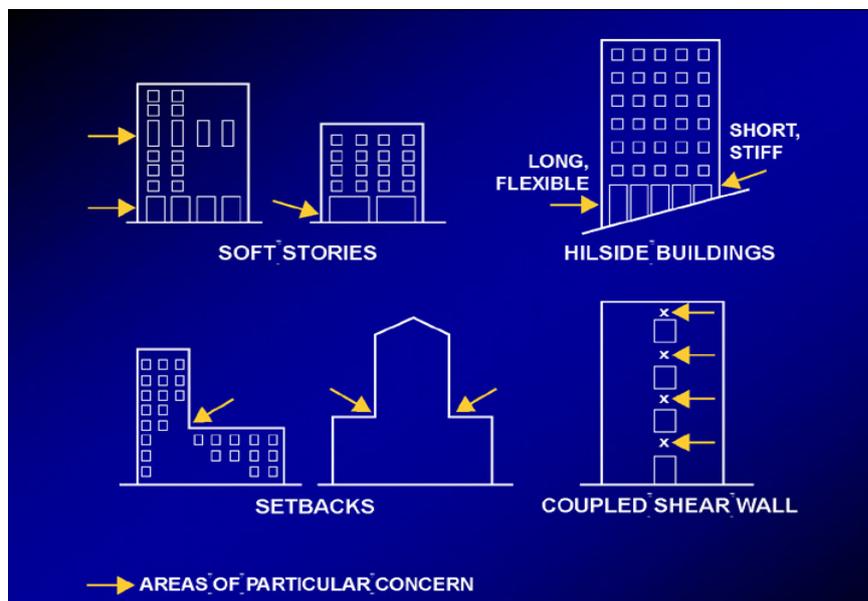


Figure 78 - Exemple d'endroits particuliers à observer dans les bâtiments en béton, selon l'ATC-20

Le manuel de terrain décrit également les procédures à observer dans divers cas comme l'impossibilité de pénétrer dans un bâtiment, la nécessité de modification d'un affichage après un second diagnostic, les règles à observer dans la prise de décision de pénétrer dans un bâtiment endommagé etc ...

Le jugement de l'inspecteur aboutit au collage d'une affichette sur le bâtiment, selon les trois possibilités suivantes :

- VERT : « INSPECTED » (inspecté) ;
- JAUNE : « RESTRICTED USE » (usage limité) ;
- ROUGE : « UNSAFE » (dangereux).

La méthode de l'AFPS a trouvé dans l'ATC-20 plusieurs idées intéressantes qu'elle a réadaptées pour les Antilles, dont notamment l'affichage limité à trois couleurs et la teneur de celui-ci, ou encore le format du manuel de terrain. La méthode AFPS est cependant plus complète dans les éléments descriptifs des dommages, de prise de décision et de traçabilité. Elle n'est pas spécifiquement adaptée aux structures des bâtiments nord-américains, mais orientée vers les structures rencontrées aux Antilles.

5.3.3 La déclinaison utilisée en Haïti

L'adaptation de la méthode ATC-20 réalisée pour son utilisation en Haïti a été axée sur plusieurs points :

- Utilisation par des opérateurs moins aguerris (les opérateurs américains se sont formés avant le séisme, et ont pu prendre le temps nécessaire à cette formation, contrairement aux opérateurs haïtiens) ;
- Traduction en Français ;
- Prise en compte de typologies constructives locales ;
- Nécessité dans l'urgence de procéder en une seule passe de diagnostic par bâtiment (abandon des notions de diagnostic rapide et de diagnostic détaillé) ;
- Utilisation de PDA, d'un traitement informatique, et de la localisation des bâtiments par GPS.

Dans un premier temps, la méthode consiste en la saisie d'un formulaire à des fins d'assistance à la prise de décision et de traçabilité.

Ce formulaire de deux feuillets est présenté ci-après. Y sont apportées en vert les observations principales que nous avons à mentionner eu égard notamment au formulaire mis au point par l'AFPS et présenté au chapitre 5.4.

MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS TRANSPORTS ET COMMUNICATIONS				
<u>Evaluation rapide de bâtiments</u>				
				
DTP-BE #1				
Inspection				
Id. Inspecteur : _____		Date et Heure d'inspection : _____ <input type="checkbox"/> AM <input type="checkbox"/> PM		
Affiliation : _____		Zone inspectée: <input type="checkbox"/> Extérieur uniquement <input type="checkbox"/> Extérieur et intérieur		
Description du bâtiment		Type de construction		
Nom du bâtiment :	Structure <input type="checkbox"/> Structure en béton <input type="checkbox"/> Structure en béton armé	Dalle Plancher <input type="checkbox"/> En béton <input type="checkbox"/> En béton armé <input type="checkbox"/> En bois	Murs <input type="checkbox"/> Murs en béton armé <input type="checkbox"/> Murs de blocs non armés <input type="checkbox"/> Murs de blocs armés <input type="checkbox"/> Maçonnerie de roches <input type="checkbox"/> Murs de briques <input type="checkbox"/> Bois + maçonnerie	
Adresse :	<input type="checkbox"/> Structure en acier / tôles <input type="checkbox"/> Structure en bois / tôles <input type="checkbox"/> Murs porteurs	Toiture <input type="checkbox"/> En béton armé <input type="checkbox"/> En bois / tôle <input type="checkbox"/> En acier / tôle	Les portiques ou structures poteaux/poutres manquent	
Contact/Téléphone :	Nombre d'étage : _____	Nombre de sous-sol : _____		
Coordonnées GPS:	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"/> Bâtiment religieux		
Evaluation				
Étudiez les bâtiments pour vérifier leur état et cochez la colonne appropriée ci-dessous.				
Etat observé	Mineur/Aucun	Modéré	Grave	Domage 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 émiétés	<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"/>	
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
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ajout intéressant dans le contexte haïtien				
Observations : _____				

Figure 79 - Formulaire utilisé en Haïti, avec nos commentaires

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 en interdire l'accès par la signalisation ACCES NON AUTORISE. Les états modérés et peu graves peuvent permettre une signalisation Utilisation restreinte. La signalisation INSPECTÉ doit être affichée à l'entrée principale. Les signalisations ACCES LIMITE et ACCES NON AUTORISE doivent être placées à toutes les entrées.

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

Enregistrez toutes les restrictions telles qu'indiquées: _____

Décision non issue d'une logique émanant de la compilation et de la hiérarchisation des dommages mais plutôt d'une appréciation générale globale

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_Roche

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

Irrégularités verticales :

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

Éléments complémentaires ne concernant pas le diagnostic d'urgence mais pouvant apparaître intéressants pour la gestion ultérieure de la base de données du bâti

Figure 80 - Formulaire utilisé en Haïti (suite), avec nos commentaires

Dans un second temps, il est procédé au marquage du bâtiment inspecté par un code couleur comme suit :

Couleur	Signification	Action	Décision
vert	Bon état	Retour autorisé	Inspecté
jaune	Partiellement endommagé et/ou renforcement nécessaire	Condamnation temporaire du bâtiment/de la partie affectée, périmètre de sécurité et recommandation sur intervention.	Accès limité
rouge	Bâtiment dangereux	Condamnation définitive et périmètre de sécurité	Accès non autorisé

5.3.4 L'organisation mise en place

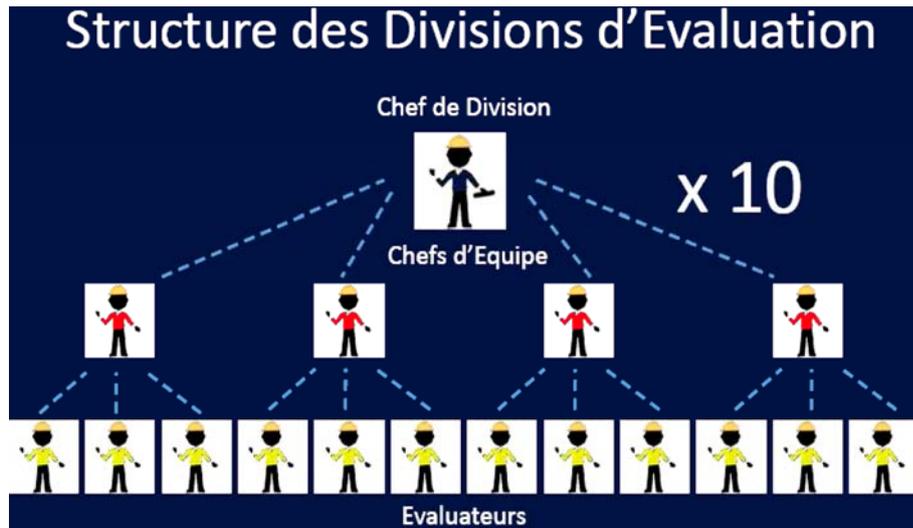
Dans un premier temps, 130 évaluateurs haïtiens ont été formés à la méthode. Les évaluateurs sont des techniciens du bâtiment ou des travaux publics.

Le mode opératoire retenu est le suivant, il a permis un démarrage des évaluations le 11 mars 2010, soit 1,5 mois après le séisme :

- Création de 10 divisions autour de chefs de division (ingénieurs séniors) ;
- Chaque division comprend 4 chefs d'équipes et une douzaine d'évaluateurs qui opèrent sur le terrain par binômes ;
- Les secteurs géographiques à inspecter sont pré-identifiés par le bureau de coordination, basés sur la décongestion des camps de réfugiés, l'étude de risque multi-aléa etc...
- A partir de l'identification de ces secteurs prioritaires, une cartographie journalière des zones à évaluer par chaque division est produite. Celle-ci est effectuée à partir d'une analyse géographique par quartier, blocs constitués de carrés de 200 maisons, fermés par des limites géographiques facilement identifiables, rues, ravines...
- Chaque division est acheminée sur le terrain par un minibus le matin, et récupérée le soir pour retour au BETB vers 16 h ;
- Report des informations de la journée au BETB ;

1 500 à 2 000 évaluations sont ainsi effectuées et traitées quotidiennement.

Des moyens logistiques spécifiques sont mise en place, comme la rotation de mini-bus pour acheminer les évaluateurs sur le terrain, ou la rotation d'agents chargé de l'approvisionnement des équipes en peinture. Le BETB est installé dans des locaux de type bungalows préfabriqués montés dans la cour du Laboratoire National des Travaux Publics, qui depuis le séisme abrite également le Ministère de Travaux Publics.



Les Chefs de division formés par Miyamoto International



Carte pour la planification journalière des divisions



Marquage des bâtiments



Figure 81 - Illustrations de l'organisation mise en place
(© Christophe Musaraganyi, UNOPS)

A la date de notre visite, le 27 mai 2010, plus de 80 000 évaluations étaient ainsi réalisées, soit environ 30 inspections/jour en moyenne par binôme.

Pour gérer efficacement cette manne d'informations, le dispositif est basé sur l'automatisation complète des informations traitées, de la saisie par l'inspecteur sur le terrain à l'alimentation d'une base de données pour éditer des cartes de synthèse, des statistiques, etc...Le BETB dispose de traceurs couleur au format A0 et de moyens de reprographie autonomes.

Cette organisation repose sur une composante informatique performante basée sur :

- la mise en place d'une base de données nationale des inspections des bâtiments ;
- une aide à l'évaluation sur le terrain.

Pour cela, les inspecteurs ont été dotés de PDA (personal digital assistant) leur permettant pour chaque bâtiment inspecté de :

- saisir le formulaire numérique ;
- le géolocaliser (fonction GPS intégrée) ;
- prendre des photos, annexées au formulaire.

De retour au bureau d'évaluation, les PDA sont synchronisés par un opérateur avec les bases de données pour permettre leur analyse et traitement.

Un contrôle qualité est opéré tout au long du processus : sur le terrain par le chef de division ou des coordonnateurs du BETB, au bureau par les informaticiens.

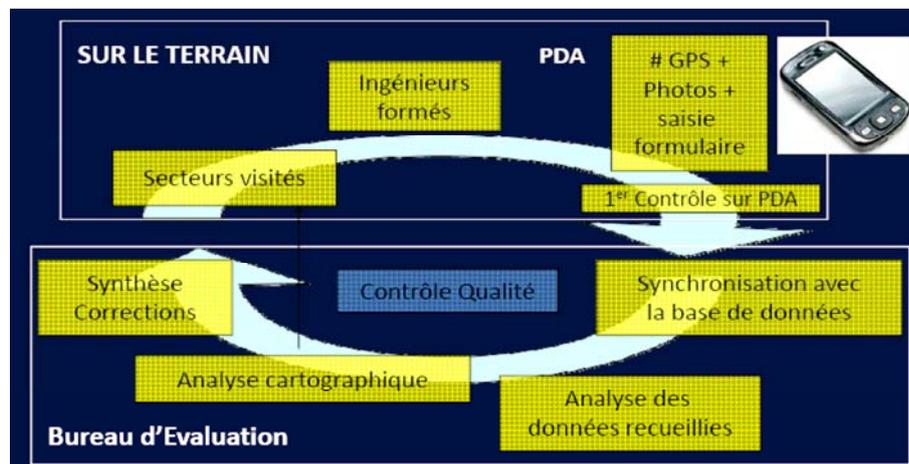


Figure 82 - Principes du recueil de l'information
(© Christophe Musaraganyi, UNOPS)

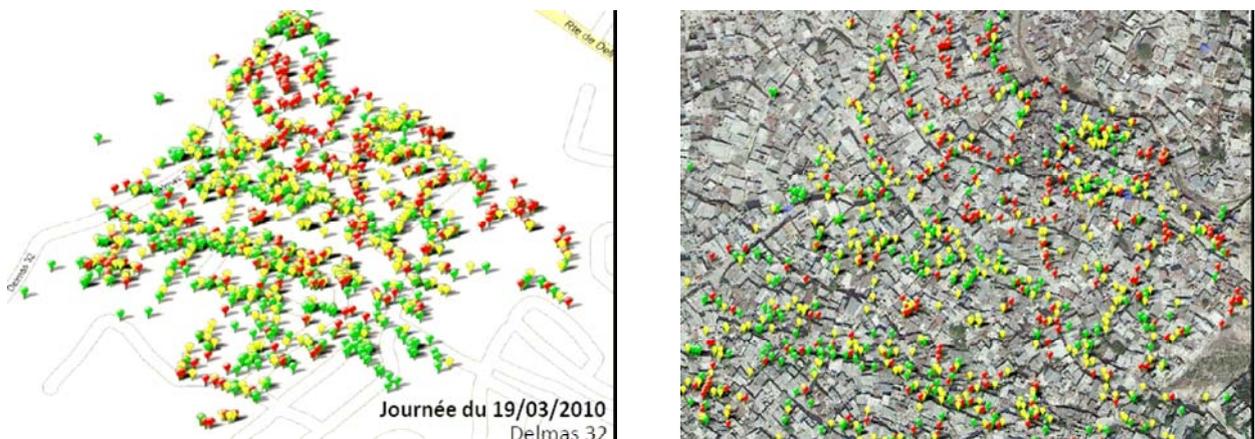


Figure 83 - Exemple de représentation d'une journée d'évaluation grâce aux coordonnées GPS
(© Christophe Musaraganyi, UNOPS)



Recharge des batteries des PDA



Transfert des données des PDA vers un PC



Salle logistique



Salle de coordination au BETB



Préparation des sacs des inspecteurs avec bombes de peinture, pochoirs et PDA



Le bâtiment du BETB construit après le séisme

Figure 84 – Le PC du BETB

La signalétique des bâtiments inspectés est effectuée au moyen de pochoirs et de bombes de peintures rouge, verte ou jaune. Le pochoir comprend le sigle du ministère (MTPTC) et le numéro de la division ayant effectué l'inspection (n° 1 à 10). Cet affichage simple s'est avéré très efficace, apportant au propriétaire du bâtiment inspecté les informations principales, à savoir le fait que l'inspection a bien été réalisée et le code couleur retenu en raison du niveau de danger évalué de la construction.

Ce mode de signalisation permet en outre une bonne durabilité du marquage et son adaptation sur tous types de supports (y compris maçonnerie brute, enduits grossiers...).



Figure 85 - Exemples de pochoirs et de la signalétique mise en œuvre

5.3.5 Bilan

Le dispositif mis en place à la hâte, sans anticipation et en situation d'urgence, s'est avéré d'une efficacité remarquable.

Le bilan intermédiaire à la date de notre visite (27 mai 2010) laissait augurer d'une satisfaction des objectifs initiaux établis à 100 000 diagnostics en 3 mois.

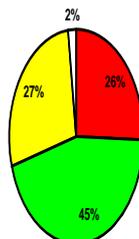
Cet objectif a pu être atteint grâce à une bonne organisation et un bon système d'information :

- toutes les évaluations sont saisies sur PDA, et il faut 1 h pour récupérer 3000 évaluations avec contrôle ;
- aucune évaluation n'est saisie sur papier ;
- le bureau dispose des coordonnées GPS de tous les bâtiments inspectés.

Il paraîtrait en effet difficile de saisir manuellement 2000 formulaires par jour, ce qui nécessiterait des moyens humains conséquents et occasionnerait d'importants risques d'erreurs de saisies.

En outre, les données traitées sont valorisées dans un site internet (Database Web Based) permettant leur libre accès de n'importe où (accès autorisé par login et mot de passe) pour visualiser sur carte les données recueillies dans une journée, les cumuls depuis l'origine, l'édition de rapports de synthèse par date, par zone géographique, par type de bâtiment etc...

Les résultats globaux de l'ensemble des évaluations au 23 juin 2010 (157 280 bâtiments inspectés) étaient de :



Les tendances confirment qu'en avançant dans le temps les proportions de constructions vertes augmentent, ce qui est logique car les zones les plus affectées par le séisme ont été traitées en première urgence. Cependant, le fait de poursuivre les inspections dans les quartiers présentant une très grande majorité de constructions vertes (Pétionville, Delmas...) reste important afin d'inciter les populations à rejoindre leur habitation.

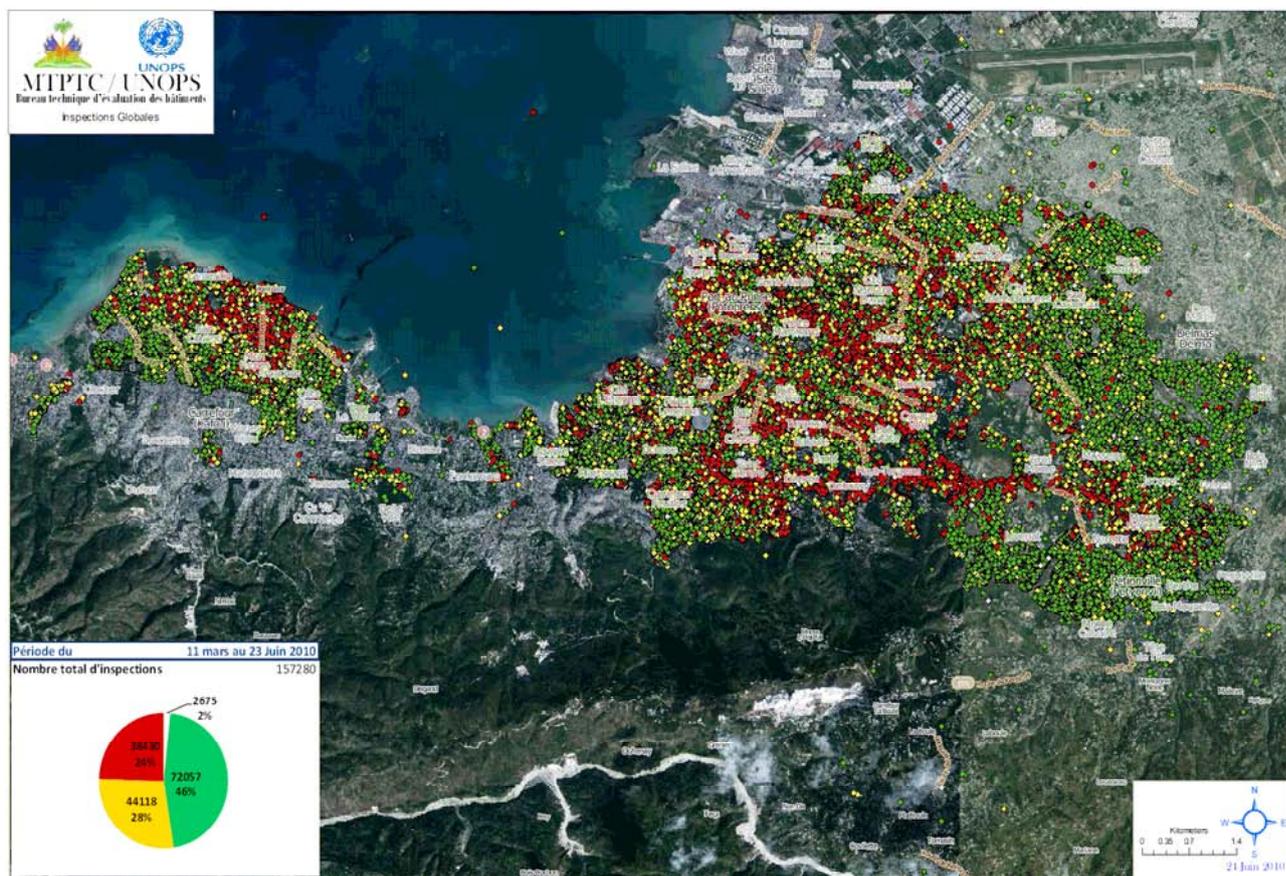


Figure 86 - Synthèse globale des résultats sur Port-au-Prince et ses environs au 23 juin 2010
(© Christophe Musaraganyi, UNOPS)

5.3.6 Perspectives

Fort de cette expérience concluante, les évaluations devraient se poursuivre pour atteindre de l'ordre de 1 million d'inspections, avec un renfort des effectifs d'inspecteurs en y associant les ONG et militaires à former à la méthode, ceci afin de disposer de l'ordre de 280 inspecteurs, 17 divisions et une capacité de plus de 3000 évaluations/jour.

Dans un deuxième temps, la structure mise en place pourrait être pérennisée pour le suivi des opérations de confortement et de reconstruction.

5.4 Démarche élaborée par l'AFPS en Guadeloupe

5.4.1 Objectifs

Le séisme des Saintes en novembre 2004, puis celui du Nord-Martinique en novembre 2007 nous ont rappelés, s'il en était besoin, qu'en matière de gestion de crise sismique l'efficacité de la réponse dépendait en grande partie de l'état de préparation et de l'anticipation des procédures à mettre en œuvre. Ces crises de faible niveau, sans commune mesure avec la crise majeure probable dans ces régions, ont poussé à se poser la question de la réponse possible dans un tel cas.

Face à ce constat récurrent sur toutes les crises sismiques, le chapitre Guadeloupe de l'AFPS avait, dès la fin de l'année 2006, proposé aux autorités de mettre en œuvre bénévolement une méthode d'évaluation d'urgence des bâtiments, accompagnée d'un vivier d'inspecteurs préalablement formés et prêts à intervenir à la demande.

Un objectif précis a ainsi été défini :

« En situation de crise sismique, organisation locale de l'AFPS afin de proposer sa contribution technique aux pouvoirs publics, pour l'établissement de diagnostics de solidité des bâtiments, en vue d'apprécier le risque pour les personnes. ».

Il s'agit bien de concevoir une **organisation qui vient s'inscrire dans le dispositif** existant de gestion de crise sans s'y substituer. Les diagnostics seront exécutés dans le cadre d'une situation **d'urgence immédiate** et **ne visent qu'à l'évaluation du risque induit pour les personnes** par l'état des ouvrages fragilisés par le séisme.

5.4.2 Une démarche de longue haleine

La méthode technique est à ce jour utilisable, un vivier d'environ 80 inspecteurs a été recensé et les supports de formation ont été réalisés. Ces éléments quoique déjà utilisables en cas de nécessité, méritent encore quelques perfectionnements et compléments, essentiellement rédactionnels et pédagogiques.

La signature prochaine d'une convention entre l'Etat et l'AFPS devra permettre de réaliser les sessions de formation et de constituer les kits des inspecteurs.

En parallèle, la mise au point d'une convention-cadre de partenariat entre l'Etat et l'AFPS devra permettre de préciser les rôles et limites d'intervention, les modalités de mobilisation de l'AFPS, les durées d'intervention, l'organisation à mettre en place etc...

L'objectif est que cette action puisse aboutir dans le courant de l'année 2011.

Cette concrétisation sera l'aboutissement de plus de 4 années de travail de bénévoles du groupe Diagnostics d'Urgence de l'AFPS depuis 2006.

Elle a de plus été enrichie par les expériences pratiques de terrain suivantes :

- A l'issue du séisme des Saintes du 21 novembre 2004, l'AFPS s'était mobilisée sur cette thématique en dépêchant une délégation locale d'une dizaine de membres sur Terre de Bas puis Terre de Haut dans les 2 et 3 jours après le séisme, afin d'effectuer les premiers diagnostics d'urgence des bâtiments et d'en informer les autorités. Cette première expérience, effectuée sans méthode et sans organisation prédéfinie, avait toutefois permis l'inspection d'environ 300 bâtiments dans chacune des 2 îles, principalement des maisons individuelles ;
- Au lendemain du séisme du Nord-Martinique du 29 novembre 2007, les autorités de Guadeloupe avaient sollicité les représentants des associations et organisations professionnelles (AFPS, Association des Ingénieurs conseils et bureaux d'études de la Guadeloupe, Conseil régional de l'ordre des architectes et CAUE) pour intervenir le week-end pour inspecter les établissements scolaires afin de vérifier s'ils pouvaient être rouverts dès le lundi. Les volontaires de l'AFPS ont pu ainsi appréhender les difficultés organisationnelles et pratiques d'une telle mobilisation et tester la méthode, alors encore en cours d'élaboration. Cette expérience avait été restituée dans le rapport de mission post sismique de l'AFPS ;

- Enfin, la mission post sismique du séisme de l'Aquila (Abruzzes – Italie) survenu le 6 avril 2009 avait de même consacré un volet dédié à cette thématique après avoir procédé au test de la méthode en cours de mise au point par le chapitre Guadeloupe de l'AFPS.

L'ensemble de ces expériences a permis des avancées significatives des travaux du groupe Diagnostics d'Urgence en constituant autant d'occasions de mise en pratique des outils afin qu'ils deviennent les plus opérationnels et fonctionnels possibles.

Il sera de ce fait précieux que les futures missions post-sismiques intègrent les diagnostics d'urgence dans leur plan d'action, afin de poursuivre cette démarche de perfectionnement de la méthode, et d'acquisition d'expérience dans son application en situation quasi-éelle.

5.4.3 La Méthode

La méthode mise au point vise à apprécier le risque résiduel pour les personnes suivant une démarche de type « dire d'expert ». Mais l'enjeu majeur que représente la sauvegarde des vies humaines rend nécessaire la sécurisation et l'homogénéisation de cette démarche.

Il est donc nécessaire d'appuyer le « dire d'expert » sur une méthodologie à respecter impérativement par chaque inspecteur de terrain.

La méthode technique mise au point est inspirée initialement des méthodes américaine ATC-20 et italienne MEDEA. Les adaptations et mises au point successives ont amené la méthode AFPS à prendre son « indépendance » vis-à-vis de ses inspiratrices.

Certaines originalités sont le propre de la méthode AFPS, comme la possibilité de transmission condensée et codée, ou l'évaluation par l'inspecteur du degré de confiance accordé à chacune des informations qu'il porte sur la fiche.

La méthode AFPS repose sur une fiche d'analyse de terrain, ainsi que sur des modèles d'affiches à apposer aux bâtiments inspectés, outils présentés ci-après. Il s'agit donc d'une méthode essentiellement visuelle.

page 2 : typologie des dégâts et évaluation

Cette page est destinée au relevé des dommages constatés sur le site. Elle n'est pas destinée à être transmise immédiatement, mais doit être conservée pour des raisons de traçabilité et de reconstitution des décisions prises.

 DIAGNOSTIC POST-SISMIQUE D'URGENCE FICHE D'EVALUATION RAPIDE DU NIVEAU DE SECURITE		Carnet n°	Fiche n°	Page n°						
		v 9.01-ch	125	19	2/2					
TYPOLOGIE DES DEGATS ET EVALUATION SEULS LES INSPECTEURS AGREES PAR L'AFPS SONT HABILITES A UTILISER CETTE FICHE (L : localisé - G : généralisé - C : certitude - E : évaluation - T : témoignage - N : ne sais pas)		Nuis à Légers (D1)	Modérés (D2 - D3)	Importants (D4-D5)	Etendue		Indice de confiance			
		Vert	Jaune	Rouge	L	G	C	E	T	N
A - Sol :										
Dégradation du terrain (glissement, affaissement)		<input type="checkbox"/>								
Dégâts préexistants		<input type="checkbox"/>								
Conclusion pour le sol		<input type="checkbox"/>								
B - Environnement extérieur :										
Construction voisine menaçante		<input type="checkbox"/>								
Chutes d'éléments provenant d'autres bâtiments		<input type="checkbox"/>								
Autres : (à préciser)		<input type="checkbox"/>								
Conclusion pour l'environnement extérieur		<input type="checkbox"/>								
Commentaires sol et environnement										
C - Eléments structuraux :										
<i>Structure verticale</i>										
Murs en maçonneries : <input type="checkbox"/> non chaînées		<input type="checkbox"/>								
Murs en pierres : <input type="checkbox"/> chaînées		<input type="checkbox"/>								
<input type="checkbox"/> chaînage inconnu		<input type="checkbox"/>								
<input type="checkbox"/> Voiles BA		<input type="checkbox"/>								
<input type="checkbox"/> Poteaux BA		<input type="checkbox"/>								
<input type="checkbox"/> Poteaux CM		<input type="checkbox"/>								
<i>remplissage :</i> <input type="checkbox"/> maçonneries		<input type="checkbox"/>								
<input type="checkbox"/> béton		<input type="checkbox"/>								
<input type="checkbox"/> Poteaux Bois		<input type="checkbox"/>								
<i>Structure horizontale</i>										
<input type="checkbox"/> Dalles BA		<input type="checkbox"/>								
<input type="checkbox"/> Poutres BA		<input type="checkbox"/>								
<input type="checkbox"/> Poutres CM		<input type="checkbox"/>								
<input type="checkbox"/> Poutres Bois		<input type="checkbox"/>								
<i>Toiture</i>										
<input type="checkbox"/> Dalle anticyclonique		<input type="checkbox"/>								
<input type="checkbox"/> Charpente Bois		<input type="checkbox"/>								
<input type="checkbox"/> Charpente métallique		<input type="checkbox"/>								
<input type="checkbox"/> Toiture terrasse		<input type="checkbox"/>								
<input type="checkbox"/> Autre : (à préciser)		<input type="checkbox"/>								
<i>Escaliers</i>										
<input type="checkbox"/> Autres : (à préciser)		<input type="checkbox"/>								
<input type="checkbox"/> Dégâts préexistants		<input type="checkbox"/>								
DEGRADATION DE LA REPRISE DES CHARGES VERTICALES		<input type="checkbox"/>								
DEGRADATION DE LA REPRISE DES CHARGES HORIZONTALES		<input type="checkbox"/>								
Conclusion pour les éléments structuraux		<input type="checkbox"/>								
Commentaires structures										
D - Eléments non structuraux :										
Eléments intérieurs lourds ou dont la chute peut être dangereuse		<input type="checkbox"/>								
Eléments extérieurs lourds ou dont la chute peut être dangereuse		<input type="checkbox"/>								
Eléments légers dont la chute peut être dangereuse		<input type="checkbox"/>								
Vitrage		<input type="checkbox"/>								
Réseau hydraulique, électrique ou gaz, produits dangereux		<input type="checkbox"/>								
Autres : (à préciser)		<input type="checkbox"/>								
<input type="checkbox"/> Dégâts préexistants		<input type="checkbox"/>								
Conclusion pour les éléments non structuraux		<input type="checkbox"/>								
Commentaires éléments non structuraux										

Figure 88 - Fiche AFPS, page 2

Le dos des pages 1 et 2 : le dos de la page 1 est utilisable pour y porter des croquis complémentaires et des informations libres si nécessaire, et le dos de la page 2 apporte une aide rapide à l'inspecteur notamment sur les codes d'identification des communes et les niveaux d'endommagement.

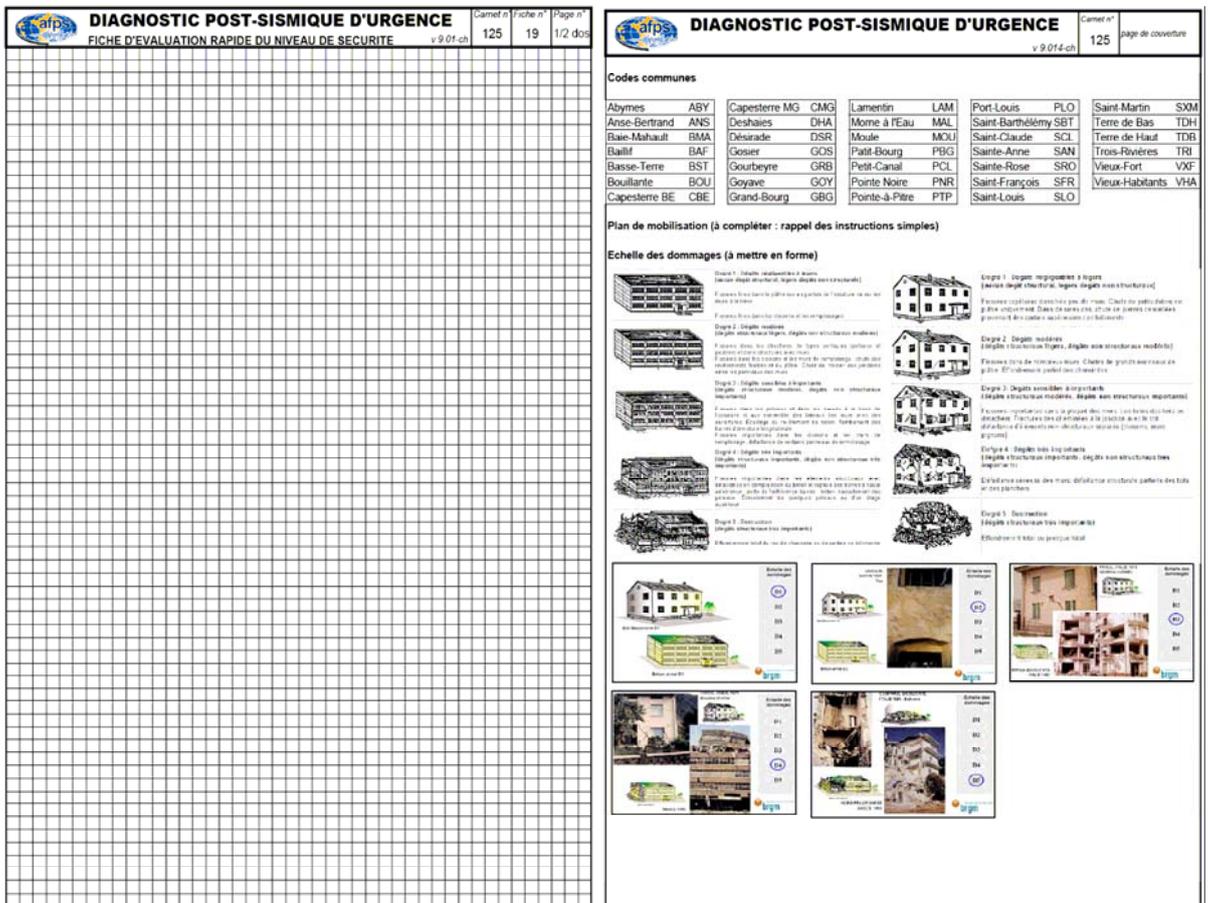


Figure 89 – Dos des pages 1 et 2 de la fiche AFPS

Les affiches

A apposer aux bâtiments en fin de diagnostic d'urgence, elles doivent rigoureusement refléter la conclusion de l'inspecteur, les limites de sa mission, et être en tous points compatibles avec le contexte juridique de l'intervention.



Figure 90 – Affiches de l'AFPS

Observation importante

Les fiches d'évaluation d'urgence présentées ici restent la propriété de l'AFPS et ne sont destinées à être utilisées que par des inspecteurs dûment formés par celle-ci. L'AFPS ne saurait être tenue pour responsable d'une utilisation non contrôlée de ces documents, et ne cautionne aucune utilisation sans accord dûment formalisé.

5.4.4 L'organisation envisagée

Afin de disposer d'un vivier d'inspecteurs volontaires suffisant, formés et engagés dans le dispositif, le recensement des volontaires s'est fait non seulement au niveau des ingénieurs, mais aussi au niveau des architectes, techniciens et professionnels du bâtiment justifiant d'une solide expérience en la matière. Ce vivier d'inspecteurs devra être maintenu à jour par l'AFPS et rester opérationnel, par notamment l'organisation d'exercices de mise en situation et de rappels de formation.

La formation initiale devrait être dispensée sur une durée de 3 jours, partagée entre les aspects techniques et les aspects organisationnels et comportementaux.

L'organisation retenue devra faire l'objet d'une mise à jour selon les dispositions spécifiques ORSEC séisme retenues définitivement par les autorités préfectorales.

Celle-ci devrait être basée sur un coordonnateur de l'AFPS interlocuteur privilégié des autorités en Centre Opérationnel Départemental (COD), qui sera lui même chargé de coordonner les inspecteurs de terrain. Ceux-ci seront en position d'attente, prêts à intervenir sur ordre du coordonnateur et ne pourront agir de leur propre initiative. Si les communications téléphoniques sont coupées, les inspecteurs convergeront vers les PC Communaux les plus proches afin d'attendre les consignes émanant du coordonnateur depuis le COD, au moyen des communications satellitaires (valise Inmarsat ou téléphone Iridium). Le cas échéant et suivant l'ampleur du séisme, le coordonnateur pourrait être secondé d'un relais de l'AFPS en COD.

5.4.5 Les attentes de la mission en Haïti

Pour cet aspect diagnostics d'urgence, la mission d'évaluation en Haïti devait permettre de tester la méthode en situation réelle en opérant des tests sur des bâtiments peu à fortement endommagés mais non effondrés, afin de la valider, en détectant le cas échéant ses limites et les améliorations à y apporter.

Le volet organisationnel devait également être examiné, afin d'appréhender les difficultés pratiques et logistiques rencontrées dans l'exercice de l'inspection d'un bâtiment et dans la retranscription des résultats auprès des autorités. Le cas échéant, l'expérience devait servir à l'amélioration des dispositifs envisagés en Guadeloupe.

Le bilan et les enseignements de la mission sont présentés dans le chapitre suivant.

5.5 Bilan et enseignements de la mission

5.5.1 Choix des bâtiments test

Avant le départ de la mission, nous a été communiqué par le MTPTC-UNOPS un tableau de synthèse de l'ensemble des établissements scolaires inspectés, avec les géolocalisations par coordonnées GPS. Aussi, afin de préparer au mieux la mission, une trentaine de bâtiments scolaires classés jaune par le MTPTC et situés à proximité de l'hôtel hébergeant la mission dans le centre de Port-au-Prince, ont été intégrées dans un GPS portable afin de faciliter les investigations de recherche sur place.

Cette préparation a permis:

- De trouver sans difficultés les bâtiments pré-identifiés, avec une très bonne précision. Les géolocalisations communiquées par le MTPTC-UNOPS effectuées par les PDA se sont avérées très précises, levant ainsi nos doutes en la matière (les expériences faites avec les GPS de certains téléphones mobiles n'ont en effet pas été toujours concluantes) ;
- D'inspecter, parmi ces bâtiments, 7 établissements scolaires présentant une typologie jugée intéressante eu égard au bâti rencontré aux Antilles, et présentant des niveaux d'endommagement

ou une complexité d'analyse nécessitant d'exploiter pleinement les grilles d'analyses et d'y apporter ainsi un regard critique constructif.

Une des conditions requises pour inspecter les bâtiments doit être la nécessité absolue (hors bâtiment rouge sur la seule inspection extérieure) de pouvoir pénétrer dans tous les locaux intérieurs. Tel n'a pu être le cas pour un certain nombre de bâtiments qui n'ont de ce fait pas été traités.

Toutefois, il est à noter l'excellent accueil général accordé aux membres de la mission par les occupants ou gardiens des lieux qui nous ont souvent et volontiers ouvert leurs portes.

Enfin, certains bâtiments identifiés comme « collèges » sont en fait de petites institutions privées constituées d'un étage d'une maison individuelle ou de locaux précaires et parfois vétustes dont l'inspection ne présentait aucun intérêt pour nos travaux. Ils n'ont donc pas été retenus pour l'expérience.

5.5.2 Résultat des inspections réalisées

La synthèse des résultats des bâtiments inspectés est la suivante:

Etablissement (et coordonnées GPS)	Classement proposé suivant méthode AFPS	Classement affiché par le MTPTC	Commentaires
Mission Bon Samaritain (18,54167 N / 72,33254 W)	J	J	Passage au vert possible après mesures conservatoires simples
Institut Français d'Haïti (18,53951 N / 72,33173 W)	V	J	Suivant méthode AFPS aucun élément ne justifie un classement jaune
Ecole Nationale Caroline (18,54330 N / 72,33421 W)	V	J	Eléments non structuraux dégradés (claustra) mais ne présentant plus de danger (à reconstituer)
Centre d'Etudes Classiques (18,54124 N / 72,33160 W)	J	J	Eléments non structuraux à réparer
Centre National Baha'i (18,54191 N / 72,33298 W)	R	J	Bâtiment mitoyen partiellement effondré très menaçant
Evêché (18,540 N / 72,338 W)	J	Non inspecté	Passage au vert possible après mesures conservatoires simples
Collège St Louis Roi de France (18,53599 N / 72,32986 W)	J	J	Eléments non structuraux à réparer

Figure 91 – Synthèse des tests réalisés

La méthode AFPS a abouti à classer différemment 3 bâtiments par rapport à celle mise en œuvre par le MTPTC.

Cependant, compte tenu du petit échantillon étudié (7 bâtiments) et que seuls des cas nécessitant réflexions ont été retenus dans l'échantillonnage, il ne peut en être tiré des conclusions générales. En effet, dans la majeure partie des cas (environ 70 % des cas inspectés par le MTPTC sur Port-au-Prince) le classement en rouge ou vert ne souffrirait d'aucune contestation possible et ce, quelque soit la méthode utilisée.

Pour les 30 % restants (jaunes), l'approche de la méthode AFPS paraît être un peu plus fine, en distinguant notamment les éléments structuraux des éléments non structuraux pour statuer sur le danger d'occupation du bâtiment. Cette différenciation permet également une appréciation de la nature d'éventuels travaux de mise en sécurité (bien qu'il ne s'agisse pas là de l'objectif principal du diagnostic d'urgence).

La typologie du bâti étudié a manqué de variété, en effet, 6 bâtiments sur 7 ont été conçus suivant le principe d'ossature de poteaux et poutres en béton armé, avec remplissage a posteriori en parois maçonnées lourdes. Ce type de conception, très répandu, est utilisé quasi systématiquement en Haïti pour des bâtiments conséquents, et notamment pour les établissements scolaires. Sa vulnérabilité et son comportement non maîtrisé ont toujours été particulièrement soulignés par tous les retours d'expérience depuis de nombreuses années. Pour ce type de bâtiment, il n'est pas établi que l'ossature en poteaux et

poutres fonctionne en portique, les nœuds n'étant souvent pas munis des armatures nécessaires à assurer des encastremements.

Les structures contemporaines en voiles de BA sont très peu répandues (uniquement pour des bâtiments remarquables récents), celles en maçonneries chaînées ou non sont utilisées pour de petits bâtiments comme les habitations, et sont souvent très vulnérables en raison de dispositions constructives non parasismiques. Par ailleurs on retrouve souvent des structures mixtes ossature BA / maçonnerie non chaînée difficilement qualifiables quant à leur comportement structurel.

Pour ce qui est des bâtiments anciens, ils sont pour la plupart constitués de maçonneries de pierres ou briques non chaînées, de structures bois ou mixtes bois/maçonnerie. Hormis les bâtiments en bois, la plupart d'entre eux, âgés de 150 ans ou plus, sont effondrés ou très gravement endommagés.

5.5.3 Bilan technique et organisationnel

Les principaux enseignements des exercices de mise en situation sont les suivants:

5.5.3.1 Observations sur la fiche de saisie:

Page 1 : synthèse

Le formulaire est clair et facile d'accès. Il comprend toutes les informations à porter à la connaissance des autorités (l'identification du bâtiment, localisation, décision, transmission codée...).

En matière d'ergonomie, les améliorations suivantes pourraient être discutées :

- visibilité du champ « nom du bâtiment » qui mériterait de figurer en entête de la fiche ;
- un champ de saisie supplémentaire pourrait être prévu pour préciser le nom ou le numéro d'identifiant du bâtiment lorsque l'entité inspectée comporte plusieurs bâtiments. De même, pourrait être précisé dans ce champ le fait qu'un même bâtiment puisse faire l'objet de deux classements distincts (ex. 2 ailes du bâtiment). Ces informations devront en outre être précisées par croquis ;
- « classement susceptible d'être modifié » devrait être placé en fin de formulaire, ou tout du moins après la décision. Cette possibilité de modification ultérieure devrait aussi pouvoir être appliquée de la couleur rouge à la couleur jaune ou verte. Si par exemple le bâtiment est menacé par un bâtiment voisin, cette menace peut disparaître ultérieurement, et par conséquent modifier le classement. Cependant, est-on encore dans la situation d'urgence ? ;
- le tableau « évaluation des dommages et décision » est à compléter comme décrit ci-dessous.

Les observations et tests réalisés ont montré que l'aide à la décision sur le cas où l'on a simultanément :

- structure verte
- sol vert
- environnement jaune

n'était pas satisfaisant, car il ne prenait plus en compte l'influence des éléments non structuraux, ceux-ci étant toujours jugés non prépondérants. Il s'avère au contraire, selon nos observations, que si les éléments de structure, de sol ou d'environnement ne déclèlent pas de danger important, alors les éléments non structuraux peuvent devenir ceux qui emportent la décision.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
EVALUATION DES DOMMAGES ET DECISION															
STRUCTURES	R			J	J	J	J	V	V	V	V	V	V	V	V
SOL		R		J	J	V	V	J	V	V	V	J	J	J	
ENVIRONNEMENT			R	J	V	J	V	J	J	V	V	V	V	V	V
ELTS NON STRUCTURAUX										R	J	V	R	J	V
RESULTAT	R	R	R	J	J	J	J	J	V	J	J	V	J	J	V

Figure 92 – Aide à la décision AFPS : cas insuffisamment discriminant

Nous proposons donc l'ajout du cas suivant dans l'aide à la décision :

EVALUATION DES DOMMAGES ET DECISION																		
STRUCTURES	R			J	J	J	J	V	X	V	V	V	V	V	V	V	V	V
SOL		R		J	J	V	V	J	X	V	J	J	V	V	V	J	V	
ENVIRONNEMENT			R	J	V	J	V	J	X	J	V	V	V	V	V	V	J	
ELTS NON STRUCT.									X	R	J	R	R	J	V	V	V	
RESULTAT	R	R	R	J	J	J	J	J	X	J	J	J	J	J	V	V	V	

Figure 93 – Aide à la décision AFPS : proposition de modification

Il apparaît ici utile de rappeler la logique utilisée pour la prise de décision :

Ordre chronologique	Logique adoptée	Observations
1	Si une structure, un sol ou un environnement sont rouges alors le résultat sera rouge	Les autres facteurs n'interviennent plus dans la décision
2	Priorité est donnée à la structure : si une structure est jaune, le résultat sera jaune	Sauf bien sûr si le sol ou l'environnement sont rouges d'ito précédent
3	Si une structure est verte, alors interviennent les autres éléments de jugement	

Page 2 : typologie des dégâts et évaluation

La fiche s'est avérée être complète et cohérente, et n'a pas posé de problèmes particuliers aux inspecteurs, hormis pour ce qui concerne la définition des éléments structuraux et non structuraux.

Ainsi par exemple, dans le formulaire de saisie, les murs maçonneries de remplissage entre poteaux de structures en charpente métallique sont inclus dans la partie destinée aux éléments structuraux, alors que ceux-ci, ne participent pas a priori à la reprise des charges sismiques horizontales ni à la descente des charges verticales. Ne devraient-ils pas être intégrés à la partie dédiée aux éléments non structuraux ? Pour nos évaluations, ils ont ainsi été considérés comme des « éléments intérieurs lourds » au titre des éléments non structuraux.

Les murs de remplissages devraient-ils être positionnés dans les éléments non structuraux ?

C - Eléments structuraux :

Structure verticale

Murs en maçonneries : non chaînées

Murs en pierres : chaînées

Voiles BA

Poteaux BA

Poteaux CM

Remplissage : maçonneries

béton

Poteaux Bois

D - Eléments non structuraux :

Eléments intérieurs lourds ou dont la chute peut être dangereuse

Eléments extérieurs lourds ou dont la chute peut être dangereuse

Eléments légers dont la chute peut être dangereuse

Vitrage

Réseau hydraulique, électrique ou gaz, produits dangereux

Autres : (à préciser)

Dégâts préexistants

Figure 94 – Questionnement sur l'influence réelle des maçonneries sur la solidité globale (Page 2 du formulaire AFPS)

Cependant, ce classement peut paraître discutable au regard du rôle qui peut être joué par ces murs dans la préservation de bâtiments non parasismiques tels que rencontrés en Haïti (voir chapitre suivant).

5.5.3.2 Difficultés d'appréciation

En plus du pilote de cette action, qui est non spécialiste des structures à l'origine, mais participe aux travaux du groupe Diagnostics d'Urgence de l'AFPS, trois ingénieurs structures de la mission se sont prêtés à l'exercice du remplissage d'une fiche d'inspection au moins une fois.

Le sol, l'environnement extérieur et les éléments structuraux n'ont pas fait l'objet de difficultés particulières d'appréciation ou de divergences de points de vue entre inspecteurs.

Endommagements localisés

Pour les éléments structuraux, le détail d'analyse par composant doit aboutir à une conclusion qui doit être fonction de l'appréciation globale de l'inspecteur quant à la dégradation de la reprise des charges verticales ou horizontales. En effet, il se peut que dans une structure quelques éléments soient dégradés sans que l'inspecteur estime une dégradation globale préjudiciable à la solidité et la stabilité de l'ouvrage. Par exemple, la fiche d'évaluation de l'établissement « Mission Bon Samaritain » a indiqué 2 poteaux de structure endommagés (en jaune) liés à l'impact lors de l'effondrement du bâtiment voisin, et la conclusion pour les éléments structuraux était finalement estimée verte.

Des éléments structuraux avec dégâts modérés localisés ne doivent pas aboutir forcément à une conclusion jaune pour les éléments structuraux, et peuvent au contraire aboutir à une conclusion verte

TYPOLOGIE DES DEGATS ET EVALUATION

SEULS LES INSPECTEURS AGREES PAR L'AFPS SONT HABILITES A UTILISER CETTE FICHE

(L : localisé - G : généralisé - C : certitude - E : évaluation - T : témoignage - N : ne sais pas)

	Nuls à Légers (D1)	Modérés (D2 - D3)	Importants (D4-D5)	Etendue		Indice de confiance				
	Vert	Jaune	Rouge	L	G	C	E	T	N	
C - Eléments structuraux :										
Structure verticale										
<input type="checkbox"/> Murs en maçonneries : <input type="radio"/> non chaînées	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Murs en pierres : <input type="radio"/> chaînées	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Voiles BA	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Poteaux BA	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Poteaux CM	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
remplissage : <input type="radio"/> maçonneries	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Poteaux Bois	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Structure horizontale										
<input checked="" type="checkbox"/> Dalles BA	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Poutres BA	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Poutres CM	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Poutres Bois	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Toiture										
<input type="checkbox"/> Dalle anticyclonique	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Charpente Bois	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Charpente métallique	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Toiture terrasse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Autre : (à préciser)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Escaliers	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Autres : (à préciser)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dégâts préexistants	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
DEGRADATION DE LA REPRISE DES CHARGES VERTICALES	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
DEGRADATION DE LA REPRISE DES CHARGES HORIZONTALES	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conclusion pour les éléments structuraux	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Commentaires structures : 2 poteaux endommagés (fissurés) à réparer, liés à l'impact de l'effondrement du bâtiment voisin -										

Figure 95 - Application de la page 3 du formulaire : cas des éléments structuraux

Il est important que l'inspecteur garde cette liberté d'appréciation mais que celle-ci soit encadrée par le fait de renseigner consciencieusement la fiche. Le fait d'aller directement à la conclusion sans suivre ce cheminement logique paraît en effet très dangereux en termes de responsabilités et il devra être vivement conseillé à l'inspecteur, même ingénieur senior, de renseigner cette page 3 du formulaire, afin de garantir

aux utilisateurs aval qu'une obligation de moyens a bien été satisfaite, et aussi de protéger l'inspecteur de recherches de responsabilités excessives.

Éléments non structuraux

Par contre, pour ce qui est des éléments non structuraux, de grandes divergences d'appréciation sont apparues entre inspecteurs. Aussi, bien que l'influence sur le résultat final soit limitée (jaune ou vert), il sera important de définir si un bâtiment présentant des murs de remplissage ou des claustras fissurés ou déjà tombés, ou encore des plafonds suspendus légers dégradés, peut être considéré comme vert pour les éléments non structuraux si l'inspecteur estime que ces éléments ne présentent pas de dangers pour les occupants. D'autre part, des parois extérieures tombées (claustra, murs de séparation), donc qui ne sont plus dangereuses pour les occupants, peuvent aboutir à une conclusion verte même si l'occupation du bâtiment restera dangereuse vis-à-vis des chutes de hauteur (protections à reconstituer).

Ces cas devront rester à l'appréciation de l'inspecteur qui pourra se référer au guide inclus dans le kit de l'inspecteur, sachant que l'impact des éléments non structuraux dans la décision finale reste limité et ne peut aboutir à un classement rouge (interdiction d'accès).

Maçonneries de remplissage

Le cas d'Haïti mérite toutefois réflexion quant à l'appréciation du rôle joué par des éléments non structuraux constitués de parois de remplissage lourdes en parpaings de 15 cm qui, bien que non liaisonnés à la structure poteaux/poutres, ont indéniablement apporté de la raideur dans le plan, ont dissipé de l'énergie par leur endommagement (bielles de compression), ont limité les déplacements de l'ossature et ont de ce fait pu jouer un rôle dans le non-effondrement et la préservation de certains bâtiments. Aussi, peut-on considérer qu'en leur absence l'ouvrage présente une résistance aux séismes comparables à la situation antérieure ? Certainement pas pour les bâtiments conçus et construits en dépit des règles parasismiques élémentaires (éléments sous-dimensionnés, manque de ferrailage et de confinement dans les zones critiques, mauvaise qualité des bétons et de la mise en œuvre...). Dans ces cas, doit-on considérer ces parois de remplissage lourdes comme des éléments de structure secondaire plutôt que des éléments non structuraux ?

Ces considérations vont bien évidemment au-delà de l'objectif du diagnostic d'urgence mais l'inspecteur pourra utilement recommander une reconstitution de ces parois à l'identique pour que le bâtiment inspecté se comporte comme dans son état initial vis à vis des sollicitations sismiques.



Figure 96 - Mur de remplissage dégradé entre les éléments d'un portique BA (Évêché)

Il sera en effet primordial de rappeler clairement, dans la formation de l'inspecteur et dans le guide devant figurer dans son kit, la définition et les objectifs du diagnostic d'urgence et notamment ses différences avec le diagnostic de vulnérabilité réalisé avant séisme.

Définir précisément la question posée à l'inspecteur

In fine, on constate souvent que les divergences ou difficultés d'appréciation proviennent non pas de l'évaluation des dommages, mais de **différentes interprétations de la question posée à l'inspecteur**. Il faudra donc repréciser clairement cette question, qui est bien « peut-on occuper le bâtiment sans risque vital pour les occupants ? », et non pas « y a-t-il un risque quelconque à occuper le bâtiment ? », et replacer cette problématique dans une situation d'extrême urgence et non pas dans les situations de l'exploitation courante des bâtiments. L'application de la méthode est en effet bornée par deux risques :

- L'erreur par manque de précaution et/ou excès d'optimisme, dont la conséquence est le risque encouru par les occupants ;
- L'erreur par excès de précaution et/ou excès de pessimisme, dont la conséquence est l'interdiction généralisée d'accès aux bâtiments, avec la désorganisation sociale qui s'en suit.

5.5.4 Exemples

Parmi les 7 bâtiments inspectés, les résultats partiels et illustrés de 3 bâtiments sont présentés ci-après afin notamment de mettre en évidence les difficultés d'appréciation exposées au chapitre précédent.

5.5.4.1 Collège Saint-Louis



TYPOLOGIE DES DEGATS ET EVALUATION

SEULS LES INSPECTEURS AGREES PAR L'AFPS SONT HABILITES A UTILISER CETTE FICHE

(L : localisé - G : généralisé - C : certitude - E : évaluation - T : témoignage - N : ne sais pas)

	Nuls à Légers (D1) Vert	Modérés (D2 - D3) Jaune	Importants (D4-D5) Rouge	Etendue		Indice de confiance				
				L	G	C	E	T	N	
D - Eléments non structuraux :										
Eléments intérieurs lourds ou dont la chute peut être dangereuse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eléments extérieurs lourds ou dont la chute peut être dangereuse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eléments légers dont la chute peut être dangereuse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vitrage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Réseau hydraulique, électrique ou gaz, produits dangereux	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Autres : (à préciser)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dégâts préexistants	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conclusion pour les éléments non structuraux	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Commentaires éléments non structuraux : Murs de remplissage instables ou partiellement effondrés à l'étage - Dito pour claustras en façade -										



Dans ce cas, l'ampleur des dommages aux éléments non structuraux à l'étage du bâtiment a abouti à une conclusion rouge pour les éléments non structuraux (décision jaune au final)

Figure 97 – Exemple d'application au Collège Saint-Louis



Figure 98 – Exemple d'application au Collège Saint-Louis

Les éléments lourds tombés ne sont plus dangereux, mais certains éléments dégradés demeurent instables

5.5.4.2 Évêché



TYPLOGIE DES DEGATS ET EVALUATION

SEULS LES INSPECTEURS AGREES PAR L'AFPS SONT HABILITES A UTILISER CETTE FICHE

(L : localisé - G : généralisé - C : certitude - E : évaluation - T : témoignage - N : ne sais pas)

	Nuls à Légers (D1) Vert	Modérés (D2 - D3) Jaune	Importants (D4-D5) Rouge	Etendue		Indice de confiance					
				L	G	C	E	T	N		
D - Eléments non structuraux :											
Eléments intérieurs lourds ou dont la chute peut être dangereuse	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eléments extérieurs lourds ou dont la chute peut être dangereuse	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eléments légers dont la chute peut être dangereuse	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vitrage	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Réseau hydraulique, électrique ou gaz, produits dangereux	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Autres : (à préciser)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dégâts préexistants	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conclusion pour les éléments non structuraux	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Commentaires éléments non structuraux - murs de remplissage fissurés - démontage plafonds, ventilation etc du dernier niveau.											



Zones ponctuelles de dégradation des trumeaux, dégâts estimés modérés (jaune).



Les plafonds et gaines de ventilation dégradés ont là aussi été estimés en dégâts modérés (jaune)

Figure 99 – Exemple d'application au bâtiment de l'Evêché

5.5.4.3 École Nationale Caroline



TPOLOGIE DES DEGATS ET EVALUATION

SEULS LES INSPECTEURS AGREES PAR L'AFPS SONT HABILITES A UTILISER CETTE FICHE

(L : localisé - G : généralisé - C : certitude - E : évaluation - T : témoignage - N : ne sais pas)

Nuls à Légers (D1) Vert	Modérés (D2 - D3) Jaune	Importants (D4-D5) Rouge	Etendue		Indice de confiance				
			L	G	C	E	T	N	

D - Eléments non structuraux :											
Eléments intérieurs lourds ou dont la chute peut être dangereuse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eléments extérieurs lourds ou dont la chute peut être dangereuse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eléments légers dont la chute peut être dangereuse	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vitrage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Réseau hydraulique, électrique ou gaz, produits dangereux	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Autres : (à préciser)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dégâts préexistants	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conclusion pour les éléments non structuraux	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Commentaires éléments non structuraux *Reconstituer claustra ou système de fermeture aux endroits dégradés -*



Les dégradations des claustras sont très ponctuelles sur la façade arrière et liées à l'impact du bâtiment voisin lors de son effondrement

Des dégâts importants localisés ont été estimés pour ces éléments dégradés, avec une conclusion verte pour les éléments non structuraux en raison de l'absence d'autres dommages.

Figure 100 – Exemple d'application à l'Ecole Nationale Caroline

5.5.5 Observations sur l'organisation des inspections

Quel que soit le mode de transmission de l'information retenu, le cahier de fiches de saisie manuelle avec copie chimique de la première page (carbone) devra figurer dans le kit de l'inspecteur. Ce dernier devra être formé à la méthode et prêt à se mettre à la disposition de l'AFPS dès la survenue d'un séisme.

Le mode opératoire de transmission de l'information aux autorités à longuement été débattu au sein du groupe Diagnostics d'Urgence de l'AFPS sans trouver de solution idéale pouvant être mise en place préalablement, et quelle que soit l'ampleur et la localisation du séisme.

La fiche de saisie de l'inspecteur comporte ainsi un volet transmission pouvant permettre de communiquer les résultats de manière codée (par SMS, téléphone ou téléphone satellite). Ce mode de transmission est rapide (test effectué en 10 mn) et efficace, permettant au destinataire du message de disposer de tous les éléments utiles de la décision de l'inspecteur. La succession prédéfinie des séquences et leur nombre de caractères fixes, permettent en cas de non lisibilité de certains champs d'identifier clairement desquels il s'agit, sans altérer les autres champs (important en cas de transmission vocale sur un répondeur par exemple).

En outre, il est à noter que les communications téléphoniques sur Port-au-Prince ont pu être rétablies très rapidement par les opérateurs de téléphonie mobile, notamment à l'aide d'antennes relais mobiles auto-alimentées qui ont été acheminées lors des premières rotations aériennes avec Haïti. En effet, il nous a été signalé qu'à peine 24 à 48 h après le séisme, le téléphone mobile fonctionnait en local, bien que fortement saturé.

Il sera important qu'en Guadeloupe, les pouvoirs publics se rapprochent des opérateurs téléphoniques pour connaître les dispositions qu'ils mettraient en œuvre (moyens, délais) au lendemain d'un séisme majeur, et le cas échéant ajuster certaines obligations ayant trait à la concession de service public.



Figure 101 – Antenne mobile autonome

Le délai moyen d'une inspection approfondie (nécessitant d'inspecter tous les locaux) d'un bâtiment moyennement complexe, comme par exemple un bâtiment scolaire est de l'ordre de 30 mn.

Certains cas peuvent être traités en 10 mn (temps nécessaire à remplir la fiche pour un bâtiment effondré), et d'autres en 1 heure (conclusion indéfinie ou bâtiment imposant ou complexe).

A défaut d'un système d'adressage précis (souvent défaillant en Guadeloupe), la géolocalisation du bâtiment inspecté par ses coordonnées GPS paraît être la solution à privilégier. C'est ainsi qu'il est prévu que l'inspecteur dispose d'un GPS portable dans son kit.

Cependant, à la lumière de l'organisation mise en place en Haïti (voir chapitre 2), il paraît évident que suivant la date de survenue du séisme, son ampleur et sa localisation, d'autres outils de communication pourraient s'avérer plus judicieux, tels que les PDA (personnal digital assistant) qui permettent, outre la géolocalisation, de renseigner le formulaire sous forme numérique, de prendre des photos, de communiquer et de permettre le traitement automatisé de l'information. Ce dispositif s'avèrerait très précieux pour centraliser et traiter l'information de plusieurs dizaines de milliers de bâtiments qui devraient être inspectés à l'issue d'un séisme majeur impactant l'ensemble du département.

En l'état actuel de nos réflexions, il ne paraît cependant pas opportun d'acquérir ce matériel par anticipation, compte tenu des évolutions technologiques en la matière et des délais de livraison par voie aérienne qui peuvent être très rapides (quelques jours après le séisme). Cependant, des informaticiens pourront utilement être sollicités en complément du vivier d'inspecteurs, afin qu'ils soient opérationnels et réactifs le jour J pour définir et mettre en place les systèmes de gestion et de communication des informations appropriés.

Le kit de l'inspecteur, dans une version minimale pourrait ainsi être dépourvu de moyens de géolocalisation ou de communication, et pourrait se limiter à des formulaires sous forme papier, qui lui permettront de faire les premiers diagnostics d'urgence dans l'attente de le doter éventuellement de moyens logistiques plus performants.

Bien évidemment, l'organisation à mettre en place devra aussi dépendre du nombre d'inspecteurs bénévoles disponibles, de la durée de mobilisation de ceux-ci, de l'ampleur et de l'étendue des dommages, et de la priorisation des bâtiments à inspecter communiquée par les autorités (inspections de bâtiments stratégiques ou sensibles ou inspections systématiques etc...).

En effet, pour une mobilisation de bénévoles ne pouvant raisonnablement excéder 1 semaine, la mise en place d'une logistique comparable à celle mise en place en Haïti paraît illusoire et excessive. Par contre, un tel dispositif apparaîtrait pertinent voire indispensable pour des interventions au delà de cette durée, pour gérer l'information d'environ 1000 inspections/jour, réalisées par 50 inspecteurs effectuant 20 inspections/jour.

Les inspections menées pour tester la méthode sur Haïti ont été faites individuellement sans que cela pose de difficultés particulières, mais il est indéniable que la posture lors d'exercices ne peut être comparée à une situation réelle avec la prise de responsabilités qui en est issue. Le fait d'opérer en binôme (comme pour Haïti) restera toujours préférable mais dépendra du rapport entre le nombre d'inspecteurs mobilisés et la quantité de bâtiments à évaluer.

Ainsi, la convention-cadre liant l'AFPS au Préfet de Région et les dispositions du Plan ORSEC devront préciser ces points fondamentaux d'organisation des inspections, idéalement à partir de scénarios.

Pour éclairer sa décision et pour justifier ses choix, il est important que l'inspecteur fasse des photos d'ensemble et de détail des ouvrages inspectés. Cela lui permettra en outre de confronter son avis à celui d'un inspecteur senior, de consulter le guide ou des archives ultérieurement, s'il a un doute sur sa conclusion. De même, il pourra utilement demander à ce que le bâtiment fasse l'objet de l'avis d'un autre inspecteur en cochant la case correspondante dans le formulaire. De plus, les photographies permettront d'établir le bilan en gardant la trace de l'évènement et pourront être précieuses dans le cas où la responsabilité de l'inspecteur serait abusivement recherchée.

EVALUATION DES DOMMAGES ET DECISION														
STRUCTURES	R			J	J	J	J	V	V	V	V	V	V	V
SOL		R		J	J	V	V	J	V	V	V	V	J	J
ENVIRONNEMENT			R	J	V	J	V	J	J	V	V	V	V	V
ELTS NON STRUCT.									R	J	V	R	J	V
RESULTAT	R	R	R	J	J	J	J	J	V	J	J	V	J	V

L'INSPECTEUR DEMANDE UN AUTRE AVIS OUI NON

Figure 102 – Extrait de la fiche AFPS, page 1 : demande d'un avis complémentaire

Dans le kit de l'inspecteur, est prévu un certain nombre d'affichettes prêtes à poser pour afficher le résultat de l'inspection à l'entrée du bâtiment.

La solution de l'affichette ne sera bonne que si:

- elles ne sont pas décollées, intentionnellement ou non ;
- elles sont visibles à l'entrée du bâtiment, ou à chaque entrée si le bâtiment comporte plusieurs entrées.

Or, les garanties de bon collage et de durabilité de ces affichettes devront être acquises. Il est à noter qu'en Haïti, beaucoup de murs grossièrement enduits, bruts ou crépis des façades de constructions ou murs de clôtures auraient rendu difficile la solution d'affichettes collées. La solution des affichettes collées étant néanmoins utilisée en Californie, il serait judicieux d'interroger les utilisateurs sur leur retour d'expérience en la matière.

L'autre solution serait d'utiliser un pochoir et des bombes de peinture comme pratiqué en Haïti. Cette solution offre l'avantage de s'adapter à quasiment tous les supports et reste la plus durable vis à vis d'actes de malveillance ou d'intempéries. Son inconvénient majeur réside dans la difficulté d'approvisionner les inspecteurs en bombes de peinture et nécessite pour cela une logistique appropriée (à l'instar du véhicule circulant dans les rues de Port-au-Prince pour approvisionner les inspecteurs en consommables).

5.6 Conclusion

Cette mission d'évaluation en Haïti a été riche d'enseignements nous permettant de faire progresser la méthode et l'organisation des diagnostics d'urgence post-séisme développée par le chapitre Guadeloupe de l'AFPS. Cette méthode, destinée à être utilisée sur les Antilles Françaises est également en voie d'adaptation au territoire national.

L'organisation mise en place en Haïti s'est avérée remarquable d'efficacité et source d'inspiration pour nos propres travaux.

L'objectif initial qui était fixé à 100 000 évaluations en 3 mois a été atteint et même largement dépassé puisque, à raison de 2000 inspections par jour, c'est de l'ordre de 150 000 évaluations qui ont ainsi pu être réalisées dans cette période.

Cet objectif ambitieux, alors même que le pays n'avait absolument pas anticipé ce type de démarche, n'aurait pu être atteint sans la mise en œuvre d'une organisation rigoureuse et l'automatisation des procédures de saisie et de report des informations sur une base de données unique.

Les principaux enseignements de cette mission pour nos travaux sont ainsi les suivants :

La composante informatique

Le traitement et la gestion efficace d'une masse considérable de données a constitué l'une des clés de la réussite de l'opération de diagnostics d'urgence en Haïti.

Fort de ce constat, le groupe Diagnostics d'Urgence de l'AFPS devrait s'entourer dès que possible d'un informaticien pour intégrer le process du traitement de l'information dans la méthode et l'organisation mise au point en Guadeloupe. S'il ne s'agit pas encore de se doter par anticipation (avant le séisme) des outils nécessaires (PDA, PC, logiciels...) il faudra au moins intégrer un mode opératoire permettant d'automatiser les procédures le moment venu.

En effet, il n'apparaît pas opportun de doter dès à présent les inspecteurs de PDA, GPS ou tout autre moyen technique car les évolutions technologiques en la matière font que ceux ci risquent de ne plus être adaptés aux moyens disponibles à la date de survenue du séisme.

Aussi, le seul formulaire d'inspection papier devra demeurer dans le kit de l'inspecteur pour lui permettre d'effectuer les premiers diagnostics d'urgence immédiatement après le séisme, dans l'attente de moyens techniques adaptés aux besoins du moment, suivant les objectifs fixés (nombre d'inspections/jour, durée de mobilisation...) et les outils disponibles sur le marché (acheminement en 1 semaine maxi par voie aérienne).

La géolocalisation par GPS

Sur Haïti mais également dans beaucoup d'endroits en Guadeloupe, le système d'adressage des constructions est souvent défaillant et, quand bien même celui-ci existerait, il resterait difficile d'identifier précisément la localisation des constructions après un séisme majeur en raison de destructions massives. Aussi, le seul moyen efficace et rapide de localiser précisément les bâtiments inspectés est la géolocalisation au moyen d'un GPS. L'inspecteur devra ainsi être doté de ce moyen de localisation.

Au delà de cette première fonctionnalité, son utilisation conjuguée à une base de données du bâti stratégique (écoles, grands ERP, bâtiments publics, bâtiments collectifs vulnérables...), permettrait le moment venu au coordonnateur AFPS (en lien avec le COD) d'établir la liste des bâtiments prioritaires à évaluer, et de permettre aux inspecteurs disposant de la géolocalisation de ces bâtiments dans leur GPS de s'y rendre aisément.

La création d'une base de données du bâti

Elle permettrait d'une manière générale de faciliter la gestion d'une crise sismique.

Il est à noter que même si les données sont souvent disponibles ou en construction (études de vulnérabilité, cartes des enjeux des PPRN, Plans Communaux de Sauvegarde, etc...), l'accès à l'information reste difficile et la centralisation dans une base de données unique fait encore défaut.

Un projet d'étude en ce sens est en cours dans le cadre du Plan Séisme Antilles, opération qui présenterait un grand intérêt pour la préparation mais aussi la gestion d'une crise et qui doit de ce fait être encouragée. Outre la cartographie, cette base de donnée a pour objectif de rassembler des données concernant la vulnérabilité sismique des bâtiments géolocalisés, les résultats des diagnostics effectués, la classe d'importance, la superficie, l'effectif, les annuaires etc

Cette base de données devrait ensuite être valorisée pour la gestion des événements à travers notamment l'outil cartographique OGERIC déployé par le MEEDDM et déjà opérationnel en Guadeloupe, et qui consiste en une aide à la décision en temps réel en situation de crise par l'affichage d'informations géographiques en Centre Opérationnel Départemental (COD).

A noter également qu'au gré de leurs cahiers des charges, les multiples études de vulnérabilité réalisées aux Antilles ne l'ont pas forcément été sur une même base de niveau d'agression sismique (spécifique probabiliste, réglementaire PS-92, réglementaire EC-8 etc). Une homogénéisation serait souhaitable.

La prise de photos des ouvrages inspectés

Elle s'avère être très précieuse à des fins de traçabilité et de confrontation ultérieure de points de vue avec d'autres inspecteurs pour affiner la prise de décision, le cas échéant.

En conclusion

La méthode technique développée par l'AFPS s'est avérée performante, fiable et simple d'utilisation. Les mises en situation opérées sur place ont permis un test vraie grandeur qui s'est avéré concluant, avec toutefois des recommandations pour améliorer le formulaire de saisie, tant sur la forme que sur le fond.

Cette prise en main aisée et le fait que la décision soit encadrée par un cheminement rationnel ne doivent pas occulter le fait que ce type d'exercice nécessite des pré-requis et un accompagnement de l'inspecteur. La **formation de l'inspecteur**, l'assistance à la prise de décision au moyen d'un **guide**, le **maintien de ce savoir-faire** par des rappels de formation et des exercices de mise en situation devront permettre de maintenir un vivier d'inspecteurs performant et opérationnel.

Il apparaît donc maintenant urgent de valider définitivement la méthode (après les ultimes ajustements issus de la présente mission) et d'engager les formations des inspecteurs pour permettre au dispositif d'être opérationnel au plus tôt. Pour cela, il faudra élaborer le projet de convention liant l'AFPS à la Préfecture et régler les ultimes questions préalables qui demeurent, à savoir :

- **Responsabilités** en cas d'erreur de diagnostics: faut-il une couverture d'assurance complémentaire, prise en charge par l'Etat ? (question traitée au niveau national – agrément sécurité civile en cours) ;

- Les inspecteurs doivent-ils être **membres de l'AFPS** ? Doivent-ils agir sous couvert de l'AFPS ou en leur nom personnel ? (définition des responsabilités) ;
- Quelles sont les **conditions de déclenchement** de l'intervention de l'AFPS dans le système ORSEC ? Comment définir une crise majeure ? Quelle durée d'intervention ?
- Des indemnités d'intervention peuvent-elles être prévues en cas de perte de journées travaillées ? (**limites du bénévolat**) ;
- Cas des inspecteurs **personnels techniques de l'Etat ou des collectivités** : Devraient être mobilisés par leur employeur pour les inspections de leurs bâtiments. Formés à la méthode. Non insérés dans le vivier des inspecteurs AFPS ?
- Quid du maintien des connaissances (périodicité formation, mise à jour liste...) ?

Pour conclure, en matière de séisme, nous savons que la préparation et l'anticipation sont les seuls garants d'une gestion efficace d'un événement. La démarche entreprise bénévolement par le chapitre Guadeloupe de l'AFPS depuis près de 4 ans s'inscrit pleinement dans cette perspective. Il apparaît important maintenant qu'une étape soit franchie par l'aboutissement définitif de la méthode et l'intégration de celle-ci dans le dispositif ORSEC départemental.

6. VULNERABILITE DU BATI

Rédaction : François Dunand et Claude Hauss

6.1 *Objet des observations*

La vulnérabilité d'un bâtiment existant s'évalue AVANT le séisme, en vue d'apprécier le risque qu'il fait prendre à ses occupants, et finalement statuer sur la nécessité ou non de le renforcer. En première approche, cette vulnérabilité est en général estimée visuellement par un expert, dont les observations sont qualifiées selon diverses échelles et diverses méthodes (RISK-UE, méthode des cahiers AFPS n°24 et 25, méthode adaptée spécifiquement aux Antilles françaises etc.).

Cette grille de lecture structurelle a été appliquée dans de nombreux diagnostics réalisés aux Antilles françaises. Le séisme d'Haïti est la première occasion de confronter les effets d'un séisme réel à un bâti analogue à celui-ci. Il était donc important de vérifier si les observations post-sismiques réalisées en Haïti précisaient, modifiaient ou éventuellement contredisaient les appréciations faites en Guadeloupe et en Martinique.

La mission étant intervenue 5 mois après le séisme, les observations ont été réalisées en essayant de tenir compte des éventuelles transformations et réparations qui ont pu être effectuées depuis le séisme. Celles-ci sont cependant encore très peu nombreuses.

Au vu du nombre et de la qualité des missions post sismiques antérieures à celle de l'AFPS, le comportement sismique des différents types de bâtiments a déjà été décrit et commenté maintes fois de façon exhaustive, et peu de facteurs de vulnérabilité n'ont pas déjà été mis en évidence ou illustrés. Ainsi, l'objectif de la mission pour cette thématique était plutôt :

- De se focaliser sur les typologies de bâtiments similaires à celles rencontrées aux Antilles françaises, afin de pouvoir y transposer les observations ;
- D'apprécier les conséquences des facteurs de vulnérabilité propres à ces typologies ;
- De proposer des illustrations des facteurs de vulnérabilité ;
- D'étudier les facteurs de vulnérabilité rencontrés de façon générique, plutôt que ceux rencontrés sur des cas isolés.

Dans ce chapitre sont décrits et commentés les facteurs de vulnérabilité observés pour les différentes typologies de bâtiments suivantes :

- Ossatures poteaux-poutres en béton armé avec remplissage en maçonnerie ;
- Maçonneries historiques en pierre et/ou brique ;
- Habitats précaires en maçonnerie de parpaing ;
- Maçonneries contemporaines en blocs de parpaing ou en brique ;
- Ossatures en bois.

Une partie du chapitre illustre des facteurs de vulnérabilité considérés comme des détails, mais qui peuvent porter à conséquences, et qui peuvent apparaître pour plusieurs des typologies précédentes.

Enfin, une dernière partie illustre des facteurs de vulnérabilité qui n'ont pas ou peu porté à conséquence.

6.2 *Localisation des observations*

Les observations ont principalement été menées dans l'agglomération de Port au Prince qui comporte différents quartiers (Delmas, Turgeau, Canapé Vert, Saint Gérard, ...) et différentes communes : Port au Prince, Pétionville et Carrefour (Figure 103).

Les cartes préliminaires de localisation des dommages basées sur l'analyse d'images satellites et réalisée par le SERTIT (Service Régional de Traitement d'Image et de Télédétection) de Strasbourg, ont permis en première approche de d'identifier les zones endommagées à des degrés divers et de planifier nos observations (Figure 103).

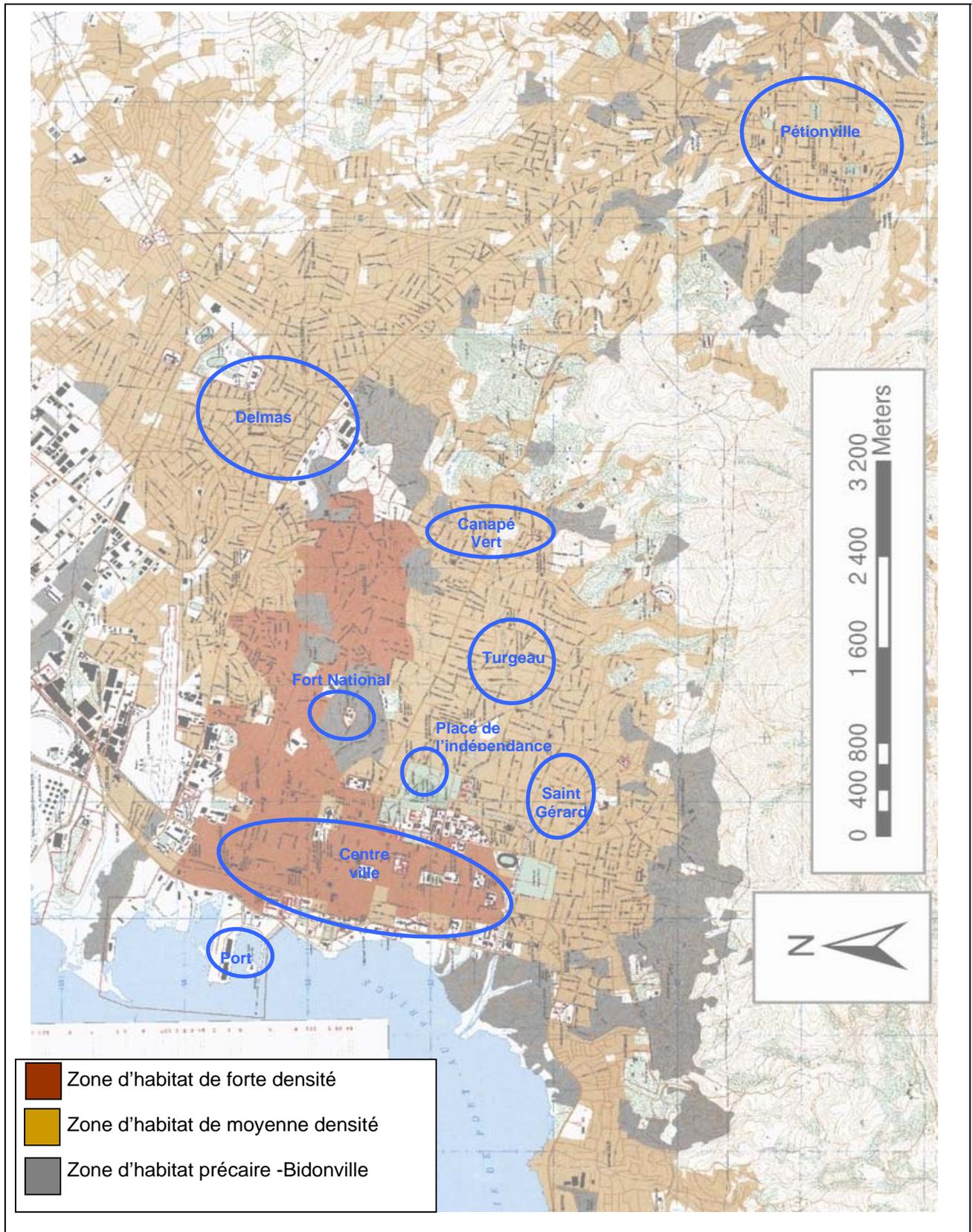


Figure 103 - Plan de Port au Prince
(Extrait de la carte Topographique de Port-au-Prince)
(Defense Mapping Agency).

6.3 L'incidence de la qualité des matériaux et de la mise en œuvre

La construction en Haïti utilise beaucoup le béton, soit sous la forme classique du béton armé, soit sous forme de blocs creux (appelés parpaings). Il est notoire que le matériau béton nécessite des infrastructures de production qui doivent nécessairement être proches du lieu d'utilisation. La production de ce matériau est donc toujours tributaire des conditions locales de ressources en granulats, en moyens de transport, en savoir-faire de conception et de mise en œuvre. Ces conditions locales ont une grande influence sur la qualité finale du matériau mis en place.

Les observations faites en Haïti montrent clairement la mauvaise qualité du béton et des parpaings utilisés. En particulier, le dosage en ciment est généralement trop faible, et la nature calcaire des granulats le plus souvent utilisés dans la région de Port-au-Prince aboutissent à des résistances et des densités nettement insuffisantes. Les conditions économiques sont bien entendu pour beaucoup dans cette situation (prix du ciment en particulier). Le béton de centrale n'est quasiment pas utilisé, et les parpaings sont de fabrication artisanale et non contrôlée.

La mise en œuvre souffre également en Haïti d'un déficit de formation des maçons. Ce déficit de formation se traduit principalement dans deux domaines :

- L'absence de connaissance des dispositions parasismiques élémentaires (chaînages, longrines ...) ;
- L'absence de connaissance du risque lié à la mauvaise qualité des matériaux, et à l'utilisation des matériaux de récupération (aciers maintes fois pliés et dépliés, granulats issus du concassage de gravats de démolition etc...).

Les très mauvaises qualités de matériaux et des mises en œuvre constatés en Haïti ne peuvent cependant à eux seuls justifier l'élimination des observations post-sismiques d'un processus de retour d'expérience utile aux Antilles françaises. Les observations ont au contraire montré que si la vulnérabilité des bâtiments s'en est trouvée accrue, les mécanismes de celle-ci n'en ont pas été bouleversés.

Il ne nous a pas été possible de procéder à des mesures sur les matériaux, ou d'accéder à des mesures existantes (très rares). Nous ne pouvons donc que rester à un niveau qualitatif sur ce sujet.

6.4 Analogies du bâti avec les Antilles françaises

Nombre de constructions des années 1950 à 1975 aux Antilles françaises ont pu être réalisées avec des bétons de mauvaise qualité, et des parpaings artisanaux. Aujourd'hui encore, il n'y a pas de parpaings normés NF en Guadeloupe et en Martinique, même s'ils sont fabriqués en usine, et nul ne garantit leur résistance. Les parpaings sont pourtant utilisés pour la quasi-totalité des constructions individuelles.

Sur le point de la formation des maçons aux dispositions parasismiques élémentaires, signalons que l'enseignement en lycée professionnel aux Antilles Françaises ne les a toujours pas totalement intégrés. Ce déficit est par nécessité souvent comblé par la pratique en entreprise, et par la présence du contrôle technique ou d'un maître d'œuvre sur certaines constructions individuelles.

Mais l'auto-construction, (le fameux « koudmen ») ne vaut parfois pas bien mieux aux Antilles françaises qu'en Haïti, et reste la grande zone d'ombre de la construction parasismique.

On observe sur les bâtiments de petite dimension en maçonnerie ou béton armé de nombreuses analogies morphologiques entre Haïti et les Antilles françaises (Figure 105).



Figure 105 - Exemple de morphologies de bâtiments haïtiens aisément reconnaissables aux Antilles françaises

6.5 Procédés et modes constructifs particuliers

Deux procédés ou modes constructifs particuliers et non répandus aux Antilles françaises ont attiré notre attention :

- Le mode de remplissages de façade en maçonnerie lourde hors plan de l'ossature (Figure 106) ;
- Le procédé des planchers en dalle de compression sur hourdis creux suspendus (Figure 107 à Figure 109).

Ces deux usages qui sont contraires aux règles de bonne construction parasismique, ont démontré leur très grande vulnérabilité. Ils sont la cause de nombreux effondrements de l'habitat individuel.



Figure 106 - Il n'est pas rare que la façade en maçonnerie lourde ne soit pas dans le même plan que l'ossature, en étant rejetée à l'extérieur de celle-ci.



Figure 107 - Les hourdis creux sont posés avec une orientation irrégulière et ne reposent sur aucun appui : ils sont suspendus par simple adhérence.



Figure 108 - Désolidarisation des hourdis creux (en fait des parpaings couchés) et de la dalle de compression.



Figure 109 - Rupture des hourdis creux.

6.6 Vulnérabilité de certains types de bâtiments

6.6.1 Ossatures poteaux-poutres en béton armé avec remplissage en maçonnerie a posteriori

Les ossatures poteaux-poutres en béton armé avec des remplissages en maçonnerie représentent la majorité des constructions urbaines de l'agglomération de Port-au-Prince. Ce sont des bâtiments généralement de 2 à 5 niveaux, avec quelques exceptions de plus de 10 niveaux.

6.6.1.1 Maçonneries de remplissages

Les maçonneries de remplissage sont composées généralement de blocs creux de béton de 15 cm montés sans armatures, après réalisation de l'ossature et sans liaison mécanique à celle-ci. On ne note que de très rares remplissages en brique creuse ou pleine.

Deux modes de rupture des panneaux de remplissages sont observés suivant leur mise en œuvre :

- **Déversement ou chute des panneaux de remplissage**
Certains panneaux de remplissage ne sont pas montés dans le plan de l'ossature, mais à l'extérieur de celle-ci, en extrémité de dalle en porte-à-faux. Pour ces panneaux, il n'existe aucun confinement dans leur plan et aucun maintien transversal. Le mode de rupture observé est un déversement ou une chute des remplissages hors de leur plan, vers l'intérieur ou l'extérieur (Figure 110 à Figure 113).
- **Fissuration en croix de panneaux de remplissage**
Lorsque les panneaux de remplissage sont montés dans le plan de l'ossature, il existe un minimum de confinement qui entraîne les panneaux avec les mouvements de l'ossature. Ce confinement n'est généralement pas suffisant car aucune disposition de liaison avec l'ossature n'est prise. Dans ce cas, c'est un endommagement en croix qui est observé, traduisant des dépassements de contraintes dans les bielles de compression (Figure 114 et Figure 115).

6.6.1.2 Chute de l'enduit de façade

Une particularité du mode constructif des bâtiments haïtiens en ossature est l'épaisseur de l'enduit qui est appliqué en façade. L'épaisseur peut dépasser les 5 cm par endroit avec pour fonction :

- de rattraper les défauts de coffrages et de verticalité ;
- de réaliser les motifs de décoration en façade.

Étant donné l'épaisseur de l'enduit et l'absence de système spécifique pour garantir son adhérence au support, il est souvent observé sa chute par plaques de plusieurs mètres carrés (Figure 116).

Ces chutes sont généralement observées au niveau des jonctions entre éléments :

- poteaux et poutres ;
- différentes parties de structure ;
- panneaux de remplissage et ossature.

6.6.1.3 Conception et réalisation des nœuds d'ossature

Les ossatures sont coulées en place dans des coffrages en bois (Figure 118). La mise en place du béton peut présenter des défauts avec des poches de gravier en pied de poteau (Figure 117).

Les aciers employés pour les bâtiments actuellement en construction sont de type HA, alors que les aciers existants sont généralement lisses. La conception des ferrillages présente les défauts suivants :

- Manque de cadres dans les zones cisailées (Figure 120) ;
- Fermeture des cadres à 90° (Figure 121) ;
- Mauvaise réalisation des liaisons entre poteaux et poutres, ne permettant pas d'assurer des encastremements (Figure 119).

En tout état de cause, aucune disposition de ferrailage aux nœuds n'est prise pour assurer un véritable fonctionnement en portique, avec transmission des moments de flexion et des efforts tranchants entre poteaux et poutres. Le fonctionnement de la structure s'apparente donc à un fonctionnement hybride d'un réseau de poteaux et poutres articulés ou pseudo-articulés, avec blocage des rotations par un remplissage de maçonneries non liées et aux caractéristiques hétérogènes et incertaines.

Il faut noter que ce genre de structures est présent aux Antilles françaises, et est très représentatif des constructions réalisées dans les années 1950 à 1975 : écoles, bâtiments administratifs de taille moyenne, habitat individuel ou petit collectif en recèlent en grande quantité.

6.6.1.4 Irrégularités

Les irrégularités de conception des structures qui ont conduit à des dommages sont de plusieurs types :

- **Effet de poteaux courts**
Les poteaux courts sont souvent créés par des remplissages partiels pour laisser place à des ouvertures. Les poteaux ainsi bloqués par le remplissage subissent des efforts de cisaillement pour lequel ils ne sont pas dimensionnés (cadres insuffisamment rapprochés) (Figure 122 et Figure 123).
- **Dalles à différentes hauteurs**
Lorsque les dalles d'un même bâtiment sont à des hauteurs différentes, la transmission des efforts horizontaux passe par les poteaux. Généralement, ceux-ci fonctionnent alors en poteaux courts (Figure 124).
- **Effet de transparence**
Pour laisser place à des commerces, les rez-de-chaussée des bâtiments urbains présentent généralement une densité de remplissages inférieure à celle des étages courants, particulièrement en façade sur rue. Cette différence de densité crée une importante variation verticale de rigidité, et surtout de la torsion (Figure 125, Figure 126).
Parfois, l'effet de transparence peut être localisé à d'autres niveaux que le rez-de-chaussée (Figure 127, Figure 128).
- **Irrégularité en plan**
L'architecture étant généralement simple, il a été observé peu d'irrégularités en plan. On note cependant des cas particulier pour des bâtiments d'importance avec des formes complexes induisant des phénomènes de concentration de contraintes (Figure 129).



Figure 110 - Port au Prince - Quartier Turgeau
(-72.330 ; 18.535).

Chute des remplissages en maçonnerie hors plan et non liée à l'ossature.



Figure 111 - Port au Prince – Quartier Saint Gérard
(-72.340 ; 18.529).

Chute des remplissages en maçonnerie non liée à la structure et absence de diaphragme en toiture.



Figure 112 - Boulevard Dessalines - Port au Prince – centre ville.
Chute des remplissages en maçonnerie hors plan et non liée à l'ossature.



Figure 113 - Centre d'études classiques – Port au Prince – quartier Saint Antoine (-72.332 ; 18.541).
Chute des remplissages en maçonnerie hors plan et non liée à l'ossature.



Figure 114 - Immeuble Hexagone – Pétionville (-72.290 ; 18.514).
Endommagement en croix des remplissages en maçonnerie.



Figure 115 - Bâtiment de l'évêché – Port au Prince – Centre ville (-72.338 ; 18.540).
Endommagement en croix des remplissages en maçonnerie.



Figure 116 - Immeuble Sogebank – Port au Prince – Quartier Delmas (-72.310 ; 18.551).
Epaisseur d'enduit de plus de 5 cm pour rattraper les défauts de verticalité et pour réaliser la décoration.
L'enduit éclate au niveau des jonctions entre les éléments.



Figure 117 - Collège Saint Louis Roi de France –
Port au Prince – Quartier Turgeau (-72.330 ;
18.536)
Mauvais bétonnage : poche de graviers en pied de poteau.



Figure 118 - Port au Prince - Quartier Turgeau (-
72.329 ; 18.536).
Mise en place de coffrages et ferrillages pour une
ossature en béton armé.



Figure 119 - Hôpital Turgeau – Port au Prince – Quartier Canapé Vert (-72.324 ; 18.532).
Faiblesse du ferrillage des nœuds de permettant pas d'assurer les encastremets.



Figure 120 - Immeuble Unibank – Pétionville (-72.289 ; 18.514).
Endommagement par cisaillement en tête de poteau : manque de cadres et ouverture de ceux-ci.



Figure 121 - Détail de ferrailage des cadres avec une fermeture à 90°.



Figure 122 - Léogane – Rue principale. Cisaillement d'un poteau par effet de poteau court induit par un remplissage partiel. Au vu de l'espacement des cadres, le poteau n'était manifestement pas dimensionné au cisaillement.

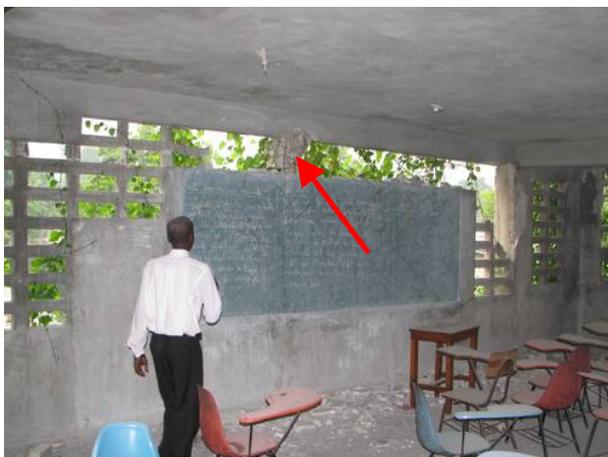


Figure 123 - Collège Saint Louis Roi de France – Port au Prince – Quartier Turgeau (-72.330 ; 18.536).

Cisaillement d'un poteau par effet de poteau court induit par un remplissage partiel de hauteur variable



Figure 124 - Léogane. Dalles de toitures à des hauteurs différentes : endommagement des poteaux.



Figure 125 - Rue du Centre – Port au Prince – centre ville.

Perte d'un niveau par effet de transparence au rez-de-chaussée : variation de la densité de remplissage et torsion.



Figure 126 - Boulevard Dessalines - Port au Prince – centre ville.

Perte de deux niveaux par effet de transparence au rez-de-chaussée.



Figure 127 - Port au Prince – Quartier Delmas (-72.310 ; 18.551).
Perte du premier étage : la transparence n'est pas forcément localisée au rez-de-chaussée.



Figure 128 - - Port au Prince – centre ville.
Perte du deuxième étage et du rez-de-chaussée par effets de transparence.



Figure 129 - Immeuble Teleco – Port au Prince – (-72.323 ; 18.536).
Irrégularité en plan en forme de « V » entraînant des mouvements de rotation des ailes. Les contraintes sont concentrées à la jonction des ailes : endommagement des remplissages.



6.6.2 Maçonneries contemporaine en blocs de parpaing ou en briques

Les bâtiments contemporains en maçonnerie de blocs de parpaing ou de briques sont les plus courants pour les habitations jusqu'à 3 niveaux (Figure 130, Figure 131).

6.6.2.1 La réalisation

Ce type de bâtiment demande peu de moyens matériels pour la réalisation, ce qui en fait un type répandu. Cependant, les conditions de réalisation demandent un minimum de technicité et de qualité des matériaux qui ne sont pas toujours respectés :

- Le sable et les granulats sont généralement en calcaire de faibles caractéristiques.
- Le gâchage du mortier est souvent réalisé avec un sous-dosage important en ciment (Figure 132).

La résistance du mortier est faible, comme le montre sa désagrégation dans les murs (Figure 133).

La réalisation des maçonneries montre deux particularités (Figure 133) :

- L'épaisseur de mortier entre les parpaings est souvent réduite au strict minimum.
- L'épaisseur d'enduit est souvent significative (> 2-3 cm) afin de rattraper les défauts de verticalité.

6.6.2.2 Le chaînage

La conception des chaînages présente généralement deux défauts majeurs :

- Les remplissages sont composés de blocs de béton de 15 cm montés préalablement aux chaînages verticaux. Les parpaings sont systématiquement alignés verticalement au niveau des chaînages (Figure 134). Cette disposition ne permet pas d'assurer une bonne liaison entre les panneaux de maçonnerie et les chaînages. Le bâtiment se comporte alors de façon similaire à une ossature avec un remplissage a posteriori, et dont les nœuds poteaux-poutres ne sont pas correctement ferrillés (Figure 135).
- Les chaînages sont disposés de façon aléatoire dans les murs et non aux angles et encadrements de portes et fenêtres (Figure 136, Figure 138, Figure 137, Figure 139). Cette disposition ne permet pas d'assurer le confinement des remplissages et conduit à leur rupture avec une fissuration en croix.

6.6.2.3 Irrégularités

Les particularités architecturales, si elles ne sont pas prises en compte au dimensionnement, peuvent induire des points de faiblesse dans les bâtiments :

- **Irrégularité verticales**
Les coursives en porte à faux ou les étages en encorbellement peuvent subir des mouvements verticaux lors du séisme. Ces mouvements, sans engendrer leur ruine, peuvent créer des désordres dans les remplissages (Figure 140).
- **Irrégularité en plan**
Les irrégularités de forme en plan ou la répartition dissymétrique des remplissages peuvent induire des phénomènes de torsion qui concentrent les efforts dans certains éléments (Figure 141).
- **Niveau transparent**
Les rez-de-chaussée des bâtiments sont souvent attribués aux commerces ou aux locaux recevant le public (véranda, salon). Ces espaces comportent moins de remplissage que le ou les étages, ce qui crée un niveau inférieur trop souple (Figure 142, Figure 143).



Figure 130 - Vue générale d'un bâtiment en maçonnerie contemporaine en blocs de parpaings.



Figure 131 - Vue générale d'un bâtiment en maçonnerie contemporaine en blocs de parpaings.



Figure 132 - Le mortier est brassé à la main avec un dosage en ciment très faible, et en eau aléatoire.



Figure 133 - Le mortier ne semble avoir qu'une très faible résistance et se désagrège facilement. L'épaisseur de mortier entre les parpaings est réduite au minimum. Pour rattraper la verticalité des murs en parpaings, l'épaisseur d'enduit est significative (>2-3cm).



Figure 134 - Chantier de construction d'une maison en maçonnerie. L'alignement vertical des parpaings ne permet pas d'assurer une liaison entre les chainages verticaux et les panneaux de remplissage. La peinture sur les parpaings montre qu'ils ont été récupérés de constructions démolies.



Figure 135 - Léogane. Liaisons entre les chainages et les panneaux de remplissage non assurée. Le bâtiment se comporte alors comme une ossature poteaux-poutres à remplissage a posteriori et dont les ferrillages ne sont pas adaptés.



Figure 136 - Port au Prince - Quartier Delmas.
Absence de chainages verticaux dans les angles
et dans les encadrements de fenêtres.



Figure 137 - Léogane.
Absence de chainages verticaux et fissuration des
remplissages.



Figure 138 - Port au Prince - Quartier Delmas.
Chainage vertical au centre du trumeau, n'assurant pas un confinement de la maçonnerie.



Figure 139 - Léogane.
Absence de chainages verticaux et fissuration des
remplissages.



Figure 140 - Port au Prince - Quartier Delmas.
Etage en porte à faux engendrant un effet de
cisaillement vertical.



Figure 141 - Léogane.
Irrégularités en plan induisant des mouvements de torsion.



Figure 142 - Léogane.
Effet de transparence au rez-de-chaussée pour les commerces.



Figure 143 - Port au Prince - Quartier Turgeau (-72.330 ; 18.535).
Effet de transparence au rez-de-chaussée pour les espaces de réception (salon, véranda)



Figure 144 - Port au Prince - Quartier Delmas.
Effet de transparence, insuffisance de contreventement et probable torsion.

6.6.3 Habitat précaire en maçonnerie de parpaings

L'agglomération de Port-au-Prince comporte de grandes zones d'habitat précaire constituées de bâtiments en maçonneries de parpaings (Figure 145). Ces zones sont généralement localisées dans des terrains de forte pente pouvant dépasser 30% (Figure 146, Figure 147). Ces zones sont également très denses avec des constructions juxtaposées.

L'implantation dans les pentes impose d'y adapter les constructions avec des poteaux ou des murs de soubassement en aval.

La proximité des bâtiments et la pente induisent des effondrements qui peuvent se propager en aval sur plusieurs constructions (Figure 148).

Par ailleurs, cette typologie présente tous les facteurs de vulnérabilité des maçonneries contemporaines (chainages et irrégularités).

In fine, il est difficile de juger de la vulnérabilité de ces bâtiments car ils ne respectent ni dispositions ni principe constructif, tels que nous les connaissons.

La reconstruction ou le renforcement de ces bâtiments ont été observées à plusieurs reprises à partir de matériaux issus des chantiers de démolition et nettoyés (Figure 154, Figure 155).



Figure 145 - Habitat précaire sur les pentes surplombant Port-au-Prince et Pétionville

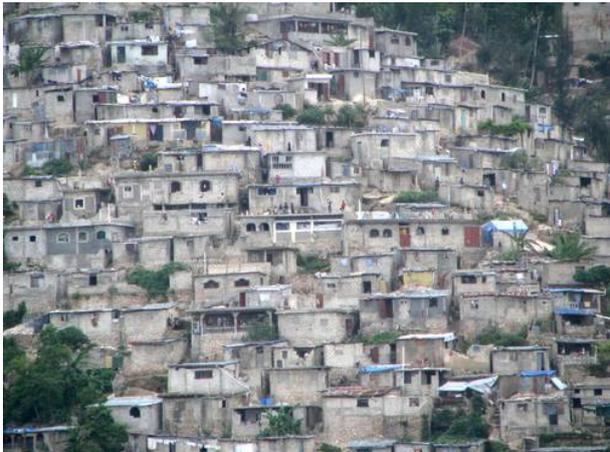


Figure 146 - Morne Calvaire – Pétionville (-72.292 ; 18.511).

Habitat précaire construit dans des pentes de plus de 30% sur des hauteurs de 1 à 2 niveaux.



Figure 147 - Carrefour.

Habitat précaire construit dans des pentes de plus de 30% sur des hauteurs de 1 à 2 niveaux.



Figure 148 - Port au Prince – Quartier Musseau (-72.291 ; 18.529).

Habitat précaire construit dans des pentes de plus de 30% sur les hauteurs jusqu'à 3 niveaux. L'effondrement de bâtiments peut atteindre les bâtiments en aval et se propager ainsi sur plusieurs constructions.



Figure 149 - Mise en œuvre des parpaings ne permettant pas d'assurer une liaison avec les chainages, même en présence des aciers verticaux.



Figure 150 - Absence de chainages dans les remplissages.



Figure 151 - Bâtiments de 3 niveaux sans diaphragme en toiture et présentant des irrégularités en plan.



Figure 152 - Bâtiments construits dans de fortes pentes et empilement des niveaux. Présence d'irrégularités en plan et en élévation.



Figure 153 - Enchevêtrement des bâtiments de réalisations différentes et présentant des comportements au séisme variables. Il est difficile à postériori de justifier les différences d'endommagement.



Figure 154 - Léogane. Recyclage des parpaings issus les chantiers de démolition.



*Figure 155 - Fort National – Port au Prince (-72.331 ; 18548).
Chantier de reconstruction de l'habitat précaire à partir de parpaings récupérés et nettoyés. Les
granulats et le mortier sont à base de gravats récupérés lors de la démolition et concassés
manuellement.*



*Figure 156 - Léogane.
Nettoyage et recyclage des cages d'armatures
pour revente au poids ou réutilisation.*



Figure 157 - Route de Pétionville.

6.6.4 Ossatures en bois

Dans l'agglomération de Port-au-Prince, on note la présence de quelques bâtiments remarquables en ossature bois. Ils sont généralement très anciens et présentent un état très vétuste (dégradation avancée du bois). Cependant, leur réalisation apparaît correcte tant au point de vue de la structure que des assemblages.

Pour ces bâtiments, seuls quelques dommages sismiques ont été observés, malgré leur état de délabrement (Figure 158 à Figure 162).

Pour certains bâtiments, les murs externes sont de type « colombage » : composés de montants en bois avec un ou deux parements en planches. L'intervalle entre les montants est comblé par de la maçonnerie. Etant donné la vétusté des parements en planche, il est observé la chute des remplissages en maçonnerie (Figure 163).



Figure 158 - Maison en ossature bois – Port au Prince - Quartier Turgeau (-72.331 ; 18.5368).
Pas de dommages (supplémentaires) malgré un état vétuste de la structure.



Figure 159 - Maison en bois – Léogane.
Pas de dommages malgré un état vétuste de la structure.



Figure 160 - Hangar en bois – Léogane.
L'hyperstaticité et la redondance des éléments permettent d'assurer la stabilité malgré la perte d'un poteau.



Figure 161 - Rue du centre – Port au Prince –
Centre ville.
Bâtiment en ossature bois : pas de dommages
malgré un état vétuste de la structure et une
irrégularité en élévation.



Figure 162 - Collège Saint Louis Roi de France –
Port au Prince – Quartier Turgeau. (-72.330 ;
18.536).
Bâtiment en ossature bois.



Figure 163 - Maison en bois – Léogane.

Murs externes du rez-de-chaussée en « colombage » : dommages uniquement aux remplissages maçonnés.

6.6.5 L'environnement, les éléments secondaires et les détails

L'environnement, les éléments secondaires et les détails, s'ils ne conduisent pas à la ruine des structures, peuvent causer des dommages et des victimes. Ci-après sont listés des exemples qui apparaissent récurrents sur les typologies étudiées.

- **Escaliers** (Figure 164, Figure 165)
Les escaliers hors du plan du bâtiment présentent souvent des dommages et sont les premiers éléments touchés, alors que leur rôle est fondamental dans l'évacuation des occupants ;
- **Débords de toiture** (Figure 166)
Les débords de toiture en porte à faux et en béton peuvent chuter, même si leur portée est faible. Dans le cas où les débords de toiture sont localisés sur des coursives ou des issues, leur chute peut entraver l'évacuation des occupants ;
- **Faux plafonds** (Figure 167)
Les faux plafonds contemporains qui sont montés sur des structures métalliques légères et contreventées ne présentent que peu de vulnérabilité. Sans dispositions parasismiques ils peuvent chuter. Il existe aussi des faux-plafond en bois cloués dont la chute peut blesser les occupants ;
- **Chute des claustras** (Figure 168 à Figure 170)
Les claustras en maçonnerie sont des éléments largement répandus dans les bâtiments scolaires. Leur faible ductilité conduit généralement à leur chute qui peut blesser les occupants ;
- **Chute des cloisons** (Figure 171)
Les cloisons lourdes en parpaings ou briques et qui n'ont aucun rôle structurel peuvent chuter si elles ne sont pas maintenues latéralement et chaînées verticalement ;
- **Proximité d'un bâtiment vulnérable** (Figure 172)
Dans un contexte urbain où les bâtiments sont proches, l'effondrement d'un bâtiment peut endommager ses voisins même si ceux-ci ne sont pas vulnérables. Cependant, en l'absence de phénomène de liquéfaction, les bâtiments ont souvent tendance à s'effondrer sur eux-mêmes plutôt que de basculer.



Figure 164 - Caserne Dessalines- Port au Prince – Centre ville (-72.340 ; 18.542).

Escalier extérieur hors du plan du bâtiment. La chute de l'escalier peut empêcher l'évacuation des occupants.



Figure 165 - Boulevard Dessalines - Port au Prince – Centre ville.

Escalier extérieur hors du plan du bâtiment. La chute de l'escalier peut empêcher l'évacuation des occupants.



Figure 166 - Boulevard Dessalines – Port au Prince – Centre ville.

Chute des débords de toiture en béton en porte à faux.



Figure 167 - Ecole Bon Samaritain – Port au Prince – Centre ville. (-72.333 ; 18.542).

Chute des faux plafonds en plaques de bois clouées sur une structure porteuse en bois.



Figure 168 - Collège Saint Louis Roi de France – Port au Prince – Quartier Turgeau (-72.330 ; 18.536).

Chute des claustras en maçonnerie.



Figure 169 - Ecole nationale Caroline – Port au Prince – Centre ville.

Chute des claustras en maçonnerie.



Figure 170 - Port au Prince - Quartier Turgeau.
Chute des claustras en maçonnerie.



Figure 171 - Centre d'étude classique – Port au Prince – Centre ville. (-72.332 ; 18.541).
Chute des cloisons en maçonnerie non liée à la structure.



Figure 172 - Ecole Bon Samaritain – Port au Prince – Centre ville. (-72.333 ; 18.542).
L'effondrement d'un bâtiment peut affecter un bâtiment à proximité. Détail du poteau et des remplissages impactés.



6.6.6 Bâti historique en maçonnerie de pierre ou de brique

Les bâtiments historiques sont construits généralement en maçonnerie épaisse de briques et quelques uns en maçonnerie de pierre. Ce sont généralement des bâtiments datant du début du 19^{ème} siècle, destinés au culte, à l'enseignement, à l'administration, aux hôpitaux, ou à la fonction militaire. Ce type de construction est bien représenté aux Antilles françaises. Il a montré en Haïti son extrême vulnérabilité

On note la présence d'une typologie particulière de maçonnerie qui est confinée par une ossature en fer (Figure 186 Figure 185). Cette typologie ne montre pas de dommages apparents. Son fonctionnement n'est pas celui d'une ossature avec un remplissage correctement lié, mais plutôt d'une maçonnerie armée et fortement confinée, avec des résultats remarquables.

6.6.6.1 Conception des murs anciens

Les murs en maçonnerie épaisse des bâtiments historiques sont généralement composés de deux parements en briques ou pierre correctement appareillés, et d'un remplissage en tout venant. L'épaisseur totale est de 70 à 100 cm. L'absence de cohésion du remplissage entre les parements et le manque de liaison entre ceux-ci conduisent à leur écartement hors plan puis à leur effondrement (Figure 179 à Figure 182).

Ces murs cumulent deux handicaps importants :

- Le manque de cohésion interne engendre une grande fragilité ;

- Une masse très importante due à la forte épaisseur, engendre d'importants efforts sismiques.

L'ensemble pouvant se caractériser par un ratio masse / résistance trop important et inadapté en situation sismique.

Toutes les observations faites lors de la mission ont montré l'extrême vulnérabilité de ce type de construction. Il nous est arrivé d'observer l'intégrité inexplicable de structures en maçonneries de parpaings de béton affectées de nombreuses pathologies de vulnérabilité, mais aucune des constructions de maçonnerie épaisse n'a été exempte de dommages sévères.



Figure 173 - Constitution des murs épais en maçonnerie de briques ou de moellons avec remplissage en tout-venant

6.6.6.2 Absence de diaphragme

L'une des pathologies observée sur les bâtiments historiques en maçonnerie épaisse est l'absence systématique de diaphragme horizontal en toiture ou aux étages intermédiaires. La technologie contemporaine des murs était en effet celle de planchers en bois. De tels planchers ne permettent pas de maintenir latéralement les murs entre eux afin d'éviter qu'ils sortent de leur plan et déversent (Figure 174 à Figure 176). Ils ne peuvent jouer le rôle de diaphragmes indéformables dans leur plan.

Pour certains bâtiments des tirants entre murs ont été disposés afin d'assurer un maintien de ceux-ci. Cependant, il a été observé la désolidarisation de ces tirants avec les murs dans lesquels ils sont ancrés (Figure 178), ce phénomène étant consécutif au manque de cohésion interne des murs.

6.6.6.3 Cisaillement des trumeaux

Les trumeaux sont des éléments de murs plus hauts que longs. En l'absence d'autres murs, ils sont les seuls éléments à reprendre les efforts horizontaux. Lorsqu'ils sont de section insuffisante ou en nombre insuffisant, ils montrent un mode de rupture en cisaillement par fissuration en croix (Figure 183, Figure 184).



Figure 174 - Eglise du sacré cœur – Port au Prince
- Quartier Turgeau (-72.330 ; 18.535).
Absence de diaphragme ou de tirants en toiture



Figure 175 - Rue du centre – Port au Prince –
Centre ville.
Absence de diaphragme ou de tirants en toiture



Figure 176 - Hôpital – Port au Prince – Centre ville
(-72.341 ; 18.539).
Absence de diaphragme ou de tirants en toiture



Figure 177 - Port au Prince – Centre ville.
Absence de diaphragme ou de tirants en toiture
permettant de maintenir les murs en tête.



Figure 178 - Caserne Dessalines - Port au Prince – Centre ville (-72.340 ; 18.545).
Désolidarisation des tirants transversaux entre les façades, conduisant au déversement d'une partie de
la façade.





Figure 179 - Eglise du sacré cœur – Port au Prince - Quartier Turgeau (-72.330 ; 18.535).
Murs composés de parements en briques ou en moellons, et d'un remplissage en tout venant.



Figure 180 - Eglise du sacré cœur – Port au Prince - Quartier Turgeau (-72.330 ; 18.535).
Murs composés de parements en briques correctement appareillées et séparés par un vide.



Figure 181 - Caserne Dessalines - Port au Prince – Centre ville (-72.340 ; 18.545).
Murs composés de parements en briques correctement appareillées et d'un remplissage en tout venant.



Figure 182 - Léogane.
Mur composé de parements en moellons correctement appareillées et d'un remplissage en tout venant.



Figure 183 - Lycée Toussaint l'Ouverture – Port au Prince – Centre ville (-72.344 ; 18.542).
Cisaillement en croix des trumeaux.



Figure 184 - Mairie de Leogane (-72.633 ; 18.512).
Cisaillement en croix des trumeaux.



Figure 185 - Eglise de l'évêché – Port au Prince – Centre ville (-72.338 ; 18.540).
Structure en maçonnerie de brique confinée dans une ossature métallique. Pas de dommages observés.



Figure 186 - Institution Saint Louis de Gonzague – Port au prince – Centre ville (-72.344 ; 18.546).
Structure en maçonnerie de brique confinée par des profilés métalliques. Pas de dommages observés.

6.6.7 Les contre exemples

Lors des visites, nous avons parfois été surpris d'identifier des facteurs de vulnérabilité qui n'ont pas conduit à des dommages. Ce qui montre la très grande variabilité de comportement des bâtiments non conçus en avec des règles parasismiques. Ces observations relativisent également l'impact de la qualité des matériaux.

Une particularité de l'architecture des bâtiments du centre ville de Port-au-Prince est de présenter une avancée en porte-à-faux des étages sur la largeur des trottoirs (Figure 187). Pour certains bâtiments, ces irrégularités en élévation ont montré des dommages et pour d'autres, peu ou aucun dommage (Figure 188, Figure 189). Il est difficile de justifier à posteriori des raisons de ces différences de comportement, alors que le dimensionnement n'est manifestement pas correct, y compris en dehors de toute situation sismique. Les remplissages en maçonneries ont probablement pu assurer la création de bielles de compression imprévues qui ont sauvé le bâtiment.

La Figure 190 montre un retrait sur les deux derniers niveaux qui n'a pas porté à conséquence.

Nous avons également noté des détails qui avaient soulevé des interrogations lors de l'analyse du bâti scolaire des Antilles française :

- **Brise soleil en béton**
On ne remarque aucun dommage sur l'exemple de brise soleils en béton de la Figure 191 ;
- **Poteaux courts pour un rez-de-chaussée simple**
Pour des bâtiments en maçonnerie d'un seul niveau, il apparaît que l'effet de poteaux courts n'est pas toujours fatal, même avec une toiture en béton (Figure 192). En effet, ces poteaux n'ont que peu d'efforts à reprendre : seulement la masse de la toiture. L'exact contre-exemple a cependant pu être observé lors du séisme des Saintes en Guadeloupe (2004), pourtant réputé nettement moins violent ;
- **Garde corps en maçonnerie**
Les garde corps en maçonnerie, s'ils sont correctement réalisés, ne sont pas forcément vulnérables (Figure 193) ;
- **Auvents métalliques**
Du fait de leur faible masse, les auvents métalliques, même avec une réalisation sans respect des règles de l'art, ne présentent qu'une faible vulnérabilité au séisme (Figure 194). Attention cependant à la problématique du vent extrême ;
- **Coursives en porte à faux et balcons**
De nombreuses coursives ou balcons en porte-à-faux ont été observés sans dommages (Figure 195) ;



Figure 187 - Rue du centre – Port au Prince – Centre ville.
Irrégularité verticale en porte-à-faux : pas de dommages



Figure 188 - Boulevard Dessalines – Port au Prince – Centre ville.
Irrégularité verticale en porte-à-faux : légers dommages



Figure 189 - Port au Prince – Centre ville.
Premier étage en porte à faux : pas de dommages.



Figure 190 - Boulevard Dessalines – Port au Prince – Centre ville.
Irrégularité en élévation avec un retrait sur les deux derniers niveaux. Le bâtiment voisin perd un niveau par effet de transparence.



Figure 191 - Caserne Dessalines- Port au Prince – Centre ville (-72.340 ; 18.542).
Les brises-soleil en béton n'ont pas subi de dommages.



Figure 192 - Caserne Dessalines- Port au Prince – Centre ville (-72.340 ; 18.542).
L'effet de poteau court n'a pas eu de conséquences pour cette structure en rez-de-chaussée.



Figure 193 - Centre d'étude classique – Port au Prince – Centre ville. (-72.332 ; 18.541).
Gardes corps en maçonnerie sans dommages.



Figure 194 - Hôpital – Port au Prince – Centre ville (-72.341 ; 18.539).
Auvent métallique en porte à faux avec de faibles sections : vulnérabilité faible au séisme du fait du peu de masse en jeu.



Figure 195 - Ecole Bon Samaritain – Port au Prince – Centre ville. (-72.333 ; 18.542).
Coursive et balcon en porte à faux : pas de dommages.



Figure 196 - Rue du centre – Port au Prince – Centre ville.
Axes structurels non concourants. Bâtiment exempt de tout dommage

6.7 Quelques bâtiments parasismiques

On peut poser les affirmations suivantes sans grand risque d'erreur :

- Les bâtiments endommagés ou effondrés n'ont manifestement pas bénéficié d'une conception ni d'une réalisation respectant les règles parasismiques ;
- Certains des bâtiments non parasismiques qui sont peu ou pas endommagés le sont sans explication satisfaisante ;
- Tous les bâtiments modernes réalisés avec application de règles parasismiques (françaises ou nord-américaines), ont remarquablement bien résisté.

Ces observations démontrent une fois de plus qu'un bâtiment ayant bénéficié d'une ingénierie parasismique résiste, alors que dans le cas contraire, il PEUT résister, mais pour des raisons très aléatoires et non quantifiables ou prédictibles avec certitude.



Figure 197 - Quartier de Canapé Vert - Turgeau : bâtiment de l'opérateur téléphonique DIGICEL, affecté par quelques très rares dommages secondaires. Aucune interruption de l'exploitation.



Figure 198 - L'hôpital de Turgeau (-72.324 ; 18.532) fait face au bâtiment DIGICEL, et a été inauguré en 2009.



Figure 199 - Port au Prince – Centre ville. Bâtiment de la Banque Nationale (ingénierie et construction par une entreprise française). Aucun dommage.



Figure 200 - Bâtiment effondré à quelques pas de la Banque Nationale...



Figure 201 - Port au Prince – Centre ville. Bâtiment de l'Evêché (-72.338 ; 18.540). Ce bâtiment est le seul connu avec application d'un calcul selon les règles PS-92 et ayant subi un séisme majeur. Seuls les remplissages de maçonnerie et les équipements non structurels sont vraiment endommagés. Quoique exploitable sans danger, le bâtiment a été évacué, probablement faute d'un diagnostic convainquant.



Figure 202 - En face de l'évêché : la Cathédrale en béton est totalement détruite.

6.8 Enseignements

La présente mission n'a pas apporté de bouleversements dans l'évaluation de la vulnérabilité telle qu'elle a été pratiquée à grande échelle aux Antilles françaises, mais a pu apporter des précisions utiles.

Elle a confirmé la prépondérance des principaux facteurs déjà identifiés comme tels : transparences, défaut de contreventement et torsion excessive sont souvent fatals aux bâtiments. Elle a également confirmé l'extrême vulnérabilité des ossatures à remplissages en parpaings non liés à celle-ci, et des maçonneries non chaînées. Ces observations ont maintes fois été faites partout dans le monde, elles sont à nouveau confirmées, mais cette fois pour un bâti morphologiquement proche de celui des Antilles françaises.

Certains éléments peu observés auparavant dans un bâti comparable ont également été confirmés : chutes de claustras et de porte-à-faux de dalles.

D'autres facteurs, qualifiés d'importants dans la vulnérabilité n'ont quant à eux pas toujours été confirmés par les observations : descentes de charges indirectes et étages en encorbellement en particulier, ont parfois été peu ou pas endommagés.

Enfin, il a été constaté l'extrême vulnérabilité des bâtiments à caractère historique constitués de murs épais à parements de maçonnerie en moellons ou en brique, et remplissage en tout-venant.

La mauvaise qualité des matériaux et de la mise en œuvre constatée dans beaucoup de constructions n'a pas sensiblement modifié les appréciations relatives sur la vulnérabilité, car elle n'a pas bouleversé la hiérarchie des facteurs.

La qualité du béton et du fer expliquent l'étendue des dégâts en Haïti

| 25/01/2010 | 16:27 | Règles et normes



© AFP-IFRC-Eric Quintero
Quelque 60% des bâtiments d'Haïti ne respectent pas les normes, estiment

C'est le constat que dressent les deux experts français de l'ONG [redacted] après avoir étudié pendant trois jours une trentaine de grands bâtiments publics de Port-au-Prince.

Figure 203 - Exemple d'article de presse technique aux conclusions hâtives

7. RESEAUX

Rédaction : Yves Guilleminot

Les réseaux sont des éléments importants dans la situation post séisme pour le redémarrage des activités vitales tant du point de vue de la sécurité civile que des conditions sanitaires.

Les réseaux examinés par la mission AFPS sont :

- L'eau potable et l'assainissement
- L'électricité
- Le téléphone

Les réseaux routiers sont évoqués dans le chapitre dédié à la sismologie.

7.1 Eau et assainissement

7.1.1 Eau potable

7.1.1.1 Fonctionnement général

En janvier 2009 le Parlement haïtien a créé une Direction Nationale d'Eau Potable et Assainissement (DINEPA) dans le Ministère des Travaux Publics, du Transport et des Communications (MTPTC), ainsi que quatre Offices Régionaux d'Eau Potable et d'Assainissement (OREPA).

Les institutions publiques principales dans le secteur de l'eau potable en Haïti sont deux entreprises publiques qui ont été chacune créée par une loi spécifique : la CAMEP (Centrale autonome métropolitaine d'eau potable), qui est responsable de l'aire métropolitaine de Port-au-Prince, et le SNEP (Service national d'eau potable), qui est responsable des villes secondaires et, en théorie, des zones rurales.

La Région de Port-au-Prince (Métropole) est alimentée en eau (potable ou non) à partir de 17 sources et 13 forages. L'eau collectée est stockée dans 17 réservoirs (1 château d'eau, 1 cuve métallique et 15 réservoirs en béton, enterrés, demi-enterrés ou aériens). A l'origine, l'eau est potable, mais après transport dans le réseau, sa potabilité n'est plus garantie. Le traitement de potabilité est effectué à l'arrivée par les particuliers (ou la DINEPA pour les distributeurs d'eau potable).

7.1.1.2 Effets du séisme

Nous avons rencontré M. Gérald Jean-Baptiste, directeur de la DINEPA puis Ruth Angerville (responsable études et planification) et Sergio Mazzucchelli (conseiller en développement institutionnel) dans les locaux de la DINEPA.

Il nous a été rapporté qu'il avait été constaté des endommagements sur les réservoirs. Une expertise est en cours par l'entreprise Freyssinet qui devrait rendre ses conclusions et propositions de remise en état et/ou de renforcement parasismique dans les prochains jours. Certains réservoirs ont d'ores et déjà été by-passés afin d'assurer la distribution.

Les réseaux n'auraient été que peu endommagés (ruptures, déboitements, etc.) sans que l'ampleur en ait pu être déterminée compte tenu d'une part de la vétusté du réseau et d'autre part de l'absence de compteurs d'eau (facturation forfaitaire). On estimerait que la perte en ligne est de l'ordre de 50 % du débit ; à noter que cette perte est parfois constatée dans des villes françaises dont le réseau est très vétuste ; à titre de comparaison, le réseau d'eau potable de la ville de Paris a un « rendement » de 80% environ.

Il n'aurait été constaté aucune détérioration de la qualité de l'eau, en tout cas bien moins qu'en cas de pluies cycloniques, qui, elle, impactent fortement les nappes et les captages.

On peut admettre qu'en temps normal l'eau distribuée par la CAMEP n'est pas potable étant donné le mauvais état structurel et sanitaire des réservoirs et l'extrême vétusté des canalisations. La distribution, 5 mois après le séisme, est toujours assurée par des camions citerne appartenant à des entreprises privées, ou par les ONG qui ont mis en œuvre des réservoirs souples et assurent localement la purification.



Figure 204 – Approvisionnement et eau potable par un distributeur privé
(Photo Unicef)



Figure 205 - Epuration locale de l'eau
(Photo Croix Rouge)

7.1.2 Assainissement

7.1.2.1 Fonctionnement général

Il n'y a pas d'institution responsable de l'assainissement en Haïti.

Il n'y a pas de réseau d'eaux usées à Port au Prince. Les eaux usées sont sensées être traitées par fosses septiques individuelles, mais on constate de nombreux rejets (si ce n'est l'essentiel), dans les canaux d'eaux pluviales à ciel ouvert. L'évacuation des eaux usées et de ruissellement se fait alors à ciel ouvert, par ces canaux allant se déverser dans la mer. Il existe quelques réseaux enterrés, mais ils sont hors d'usage (depuis avant le séisme).

	Population	Surface	Densité
Port au Prince	876 000	36.04	24 306
Aglo PaP	2 296 000	152.02	15 103
Paris	2 193 000	105.40	20 806
Londres	7 685 000	1 579.00	4 867

Pour information, rappelons la consommation globale d'eau par an et par habitant :

- Pays riches 1 500 m³/an
- Pays pauvres 100 m³/an

A noter qu'il y a un siècle, le besoin était de 20 litres/jour soit 7 m³/an environ.

7.1.2.2 Effets du séisme

Les exutoires

De nombreux matériaux de démolition ont été entreposés dans les canaux à ciel ouvert, mais il semble bien que le curage de ces évacuations ne soit pas réalisé systématiquement.

Les ordures ménagères sont déversées dans ces canaux, créant sans doute des dangers sanitaires, bien que l'on nous ait affirmé qu'il n'y a pas eu d'épidémie.



Figure 206 - Egouts à ciel ouvert
(Rapport USGS_EERI_V1.1), (Fr Dunand)



Figure 207 - Egouts à ciel ouvert

Camps de déplacés

La mise en œuvre de camps de déplacés a nécessité l'installation de « sanisettes » devant être régulièrement vidangées. Les excréta ont été déversés dans des fosses creusées dans la décharge de Truitier à ciel ouvert (quartier de Cité-Soleil), qui s'est vite avérée incapable de recueillir le flux quotidien. Des fosses ont été également creusées pour les « déchets médicaux » (appellation « politiquement correcte » pour désigner les membres amputés dans les opérations d'urgence).



Figure 208 - La décharge de Truitier en février 2010
(Eyrard-Photo)

7.1.3 Les mesures d'urgence

La situation précaire du réseau d'eau potable et de ses réservoirs avait conduit, avant le séisme, à élaborer un plan de modernisation et fait envisager la création d'un réseau d'assainissement. Le séisme a conduit à accélérer le processus dont les grandes lignes sont décrites dans le document « Programme de réforme et

d'investissements dans le secteur de l'eau potable et de l'assainissement en Haïti ». Il est envisagé la création des Offices Régionaux pour l'Eau Potable et l'Assainissement, celle de réseaux d'assainissement en ville puis dans les campagnes, la rénovation les réseaux de distribution, la création de nouveaux, l'éducation de la population, etc. Ce document annonce un coût de 450 M de dollars US sur l'ensemble du territoire.



Figure 209 - Publication de la DINEPA

7.1.4 Recommandations concernant les Antilles Françaises

La principale conséquence du séisme semble avoir été les conditions sanitaires consécutives à l'absence de réseaux et d'équipement de traitement des eaux usées et eaux vannes.

La situation aux Antilles est différente.

- Les agglomérations ne sont pas de la taille de Port-au-Prince ;
- Les équipements publics sont plus modernes.

Les points à vérifier seraient :

- Quelles dispositions sont prévues pour assurer rapidement la fourniture et la distribution d'eau potable ?
- Quel est l'état du réseau d'eaux usées ?
- Quelle est la vulnérabilité des stations d'épuration ?
- Quels espaces pourrait-on réserver pour des « camps de déplacés » et quel assainissement prévoir pour ces zones ?
- Quelles zones pourrait-on prévoir pour décharges des gravats de démolition ?

7.2 Electricité

7.2.1 Fonctionnement

L'électricité est produite et distribuée par EDH « Electricité d'Haïti. L'électricité est produite par des centrales fonctionnant avec des combustibles fossiles (charbon) ou des centrales hydroélectriques dont la plus importante, Péligre, a été réhabilitée en 2009. La plus récente des centrales alimentant Port-au-Prince, la centrale de Carrefour II a été mise en service en 2009 également. Grâce à son appoint, l'on devait, selon Serge Raphaël, directeur d'EDH, permettre (à fin 2009) d'atteindre globalement la fourniture de 12 heures d'électricité quotidiennes pour la région métropolitaine de Port-au-Prince.

7.2.2 Effets du séisme

Les centrales électriques ont été relativement épargnées par le séisme (hormis Carrefour I très endommagée), mais il n'en a pas été de même du réseau de distribution, essentiellement aérien. La secousse a en effet abattu la majorité des lignes électriques approvisionnant la capitale et ses faubourgs.



Figure 210 - Distribution électrique aérienne

Les lignes sont disposées sur des poteaux qui comportent des transformateurs Basse Tension en partie haute. Les ancrages de ces poteaux dans le sol ne présentent pas de disposition de fondation particulièrement soignée. De plus, la masse en partie haute n'a pas favorisé la stabilité des ouvrages.

Les dégâts constatés dans les centrales sont de type classique : manque de solidarisation des équipements à leurs supports,



Figure 211 – Transformateurs et Tableaux Carrefour I
(Univ Berkeley E. Fierro al, 2010)

Le transformateur de gauche est probablement hors d'usage. Etant donné les conditions insulaires, le délai de remplacement est de l'ordre de 6 mois. Les armoires de droite sont probablement réutilisables en les remettants en position.

Lors de nos visites, nous avons rencontré des transformateurs qui se sont déplacé et qui ont été remis en service sans autre forme de procès.



Figure 212 - Transformateurs ayant glissé et remis en place, site de Juvenaut

De même, des stockages de fuel ont subi des dommages (pattes d'éléphant, viroles déformées), mais là encore, rien que de très classique et qui ne remet pas en cause l'utilisation même provisoire une fois l'étanchéité constatée et la tuyauterie remise en place.



Figure 213 - Stockages fuel Carrefour
(Univ Berkeley E. Fierro al, 2010)

Nota : Lors de notre passage sur les centrales de Carrefour I et II, il n'a pas été possible d'accéder aux sites. Les seules informations disponibles sont les photos prises par M. Fierro, étant entendu que les défauts constatés lors de ces visites de janvier et février ont été « réparés » même provisoirement pour reprendre l'exploitation au plus vite.

7.2.3 Après le séisme

Fin février (Jo + 6 semaines), l'électricité a été rétablie dans près de la moitié de la capitale Port-au-Prince. A Jo + 2 mois, 85 % de la production d'avant séisme est rétablie.

A noter que la plupart des hôtels et institutions de quelque importance possèdent un groupe électrogène, du fait de la situation antérieure.

Lors de notre visite à l'Hôpital Universitaire d'Etat de Haïti, nous avons appris que le groupe électrogène était en panne depuis plusieurs mois et qu'aucun budget n'avait pu être dégagé pour l'approvisionnement de la pièce défectueuse (10 000 € environ).

7.2.4 Communication officielle

Selon M. René Jean-Jumeau, coordinateur de l'unité de gestion du secteur de l'énergie au MTPTC, la situation était sous contrôle et pas aussi catastrophique que ce que l'on prétendait. Nous n'avons cependant pas pu rencontrer les personnes responsables de l'exploitation, dont la plupart n'ont jamais répondu à nos appels.

7.2.5 Recommandations pour les Antilles françaises

La principale conséquence du séisme semble avoir été l'interruption de la fourniture de courant électrique suite aux dégâts des centrales de production, et suite à la destruction partielle des réseaux de distribution.

Les points à vérifier seraient :

- Sécurisation des équipements lourds (transformateurs, armoires, équipements connexes de refroidissement, réservoirs, etc...) ;
- Sécurisation des pylônes de transport haute tension ;
- Sécurisation des transformateurs de quartier ;
- Sécurisation des lignes terminales ;

7.3 Téléphone

7.3.1 Fonctionnement général

Le téléphone en Haïti est entre les mains de 4 opérateurs :

- Teleco, l'opérateur historique, est en charge du téléphone fixe. L'infrastructure associée était très peu développée : moins de 1 % des Haïtiens ayant une ligne de téléphone fixe.
- Digitel, Haïtel et Voilà sont les trois opérateurs de téléphonie mobile.

Une particularité de la téléphonie mobile en Haïti est que les réseaux ne sont pas interconnectés, c'est pourquoi les haïtiens en ont en général 3 portables. Le Conatel, organisme gouvernemental régulateur, se préoccupe de ce dysfonctionnement.

A noter que Teleco était en cours de rachat par Viettel, une entreprise Vietnamiennne.

Le taux de couverture par la téléphonie mobile a sans doute beaucoup évolué depuis les évaluations de 2007 (dernières disponibles) qui indiquaient 30 % de couverture géographique et 80 % des ménages équipés en ville, pour 25 % équipés de téléphone fixes.

Par contre, les Fournisseurs d'Accès Internet sont plus nombreux et pour la plupart dotés de la technique satellitaire, ce qui a permis une utilisation quasi immédiate du réseau pour communiquer. Les particuliers ont quant à eux du utiliser les liaisons hertziennes installées sur les pylônes fixes n'ayant pas subi de dommage (antennes encore bien orientées).

7.3.2 Effets du séisme

Lors du séisme, les dégâts ont été dus à l'écroulement des maisons qui supportaient les antennes, ou à leurs mouvements (une antenne ne peut supporter un déplacement de plus de 1° environ).



Figure 214 - Antenne fixe sur le toit d'une maison dite « rooftop »

Nous avons pu rencontrer sans rendez-vous préalable Mme Murielle Barthe-Gardere, Directrice des Ressources Humaines de l'entreprise, au siège haïtien de Digitel, qui a bien voulu répondre à un questionnaire envoyé le soir même.

Selon les réponses qu'elle nous a apportées :

- Tous les mâts fixes sont restés en service (ils seraient résistants aux séismes). Seuls les rooftops ont souffert quand leurs habitations support se sont écroulées ;
- Une cinquantaine d'antennes provisoires ont été installées pour pallier ce manque ;
- Des antennes mobiles ont été déployées, spécialement à proximité des camps de déplacés ;
- Le retour « à la normale » aurait pris 24 heures pour cet opérateur ;
- La principale difficulté a été la remise en service de l'aéroport qui a gêné l'arrivée des antennes mobiles ;
- Les équipements ne sont pas « certifiés résistants aux séismes » car il n'y a pas de normes à Haïti sur le sujet, mais ils sont conformes aux normes internationales.



Figure 215 - Antenne mobile

Une antenne mobile est composée d'une antenne proprement dite, support des récepteurs et réémetteurs, d'une alimentation électrique, et d'armoires d'électronique de puissance pour l'amplification du signal satellitaire reçu et sa réémission. Des armoires de climatisation peuvent être présentes pour assurer une température de 40 °C maximum.

7.3.3 Recommandations pour les Antilles françaises

L'expérience d'Haïti montre que les réseaux de téléphonie mobile ont été très rapidement rétablis, essentiellement parce que la demande était très forte et que la concurrence a joué son rôle. L'explosion de la demande de communications internationales consécutives à la situation de crise a joué un rôle moteur dans la motivation des opérateurs à rétablir rapidement la situation.

Les questions qu'il y a lieu de se poser sont :

- Doit-on prévoir un contrat état-opérateur pour une de remise en fonction dans un délai contractuel ?
- Les antennes et matériels sont-ils « résistants aux séismes » ?
- Les téléphones d'urgence « satellitaires » sont-ils toujours utiles ?
- Peut-on envisager la dévolution de numéros prioritaires en cas d'engorgement des réseaux ?

8. SYNTHÈSE DES ENSEIGNEMENTS POUR LES ANTILLES FRANÇAISES

Rédaction : Claude Hauss

Les divers enseignements pour les Antilles françaises sont décrits de façon détaillée dans les chapitres du présent rapport.

Nous en reprenons ici une synthèse résumée ci-dessous, en distinguant :

- **les actions de prévention à mener AVANT le séisme**
Elles visent principalement à limiter ses effets destructeurs par la promotion de la construction parasismique, du renforcement des existants vulnérables, la prise en compte de l'aléa dans l'aménagement du territoire, la formation des acteurs et décideurs ;
- **la préparation des actions à mener APRES le séisme**
La conjonction aux Antilles française d'un aléa fort avec une grande vulnérabilité du bâti, aboutit à un risque qui ne pourra être réduit que sur le très long-terme, en fonction du cycle de renouvellement du bâti et de l'aménagement, et des politiques incitant à son accélération. Il faut donc prévoir la gestion de l'APRES catastrophe.

8.1 Les actions de prévention

Elles sont déjà largement déclinées aux Antilles françaises. Néanmoins des pistes nouvelles peuvent être explorées :

Utiliser les images d'Haïti à des fins de communication et de formation

Le séisme d'Haïti montre pour la première fois les effets d'un séisme majeur sur des constructions et certains modes d'aménagement que l'on peut trouver en Martinique ou en Guadeloupe.

Il serait donc opportun de se servir des observations faites sur place à des fins pédagogiques et de communication aux Antilles françaises. La sensibilisation à l'aide d'images dans lesquelles il sera possible d'identifier des choses connues, sera beaucoup plus puissante. A minima, il serait pertinent de réactualiser tous les supports existants et en cours d'utilisation par des images provenant du séisme d'Haïti (guides, publications techniques, présentations diverses, supports de formation, conférences).

Encore améliorer la connaissance géologique et compiler toutes les informations disponibles

De nombreuses actions du domaine de la connaissance de la géologie et de la sismologie peuvent encore être entreprises ou améliorées, comme le décrit de façon très détaillée le chapitre dédié à la sismologie (révision de certaines cartes géologiques, synthèses des données existantes, diagnostic de situation vis-à-vis de la liquéfaction des sols dans les centres urbains etc ...).

Diagnostiquer le réseau routier

Une particularité du réseau routier de Martinique et surtout de Guadeloupe est la quasi absence de possibilités d'itinéraires alternatifs en cas d'obstruction d'une voie par un glissement de terrain ou une rupture d'ouvrage d'art. Un diagnostic complet du réseau routier envers ces risques est donc à établir ou compléter (et non seulement le diagnostic des ponts).

Evaluer le risque représenté par la maison individuelle

Toute politique de réduction de ce risque exige de reposer sur son évaluation préalable. Or aucune étude d'ingénierie n'a encore été réalisée en ce sens. Il semble pourtant indispensable d'approfondir les études basées sur des évaluations visuelles par un véritable programme de recherche et développement permettant

de calibrer ou recalibrer ces évaluations : mesures in situ, essais en laboratoire, essais de modélisation. La maison individuelle est aujourd'hui la grande zone d'ombre du risque sismique en Guadeloupe, alors que le séisme d'Haïti a largement démontré le danger que peut représenter une construction même en simple rez-de-chaussée.

Faire la synthèse des nombreux diagnostics de bâtiments réalisés

Les diagnostics réalisés ou en voie de l'être aux Antilles françaises représentent près de 5 500 bâtiments de toute nature et toute fonction, abritant plus de 230 000 occupants. Or leurs cahiers des charges ne sont pas toujours homogènes dans leurs exigences. Sur le seul point du niveau d'agression sismique à envisager, ils varient entre spectre probabiliste spécifique, niveau réglementaire EC-8 ou niveau réglementaire PS-92. Les classifications et conclusions qui en découlent peuvent être affectées par ce genre de choix. Il pourrait être utile de procéder à une homogénéisation et une intégration globale de l'ensemble de ces études et de leurs conclusions.

Réévaluer le risque représenté par les bâtiments historiques en pierre ou maçonnerie épaisse

Ces bâtiments ont montré leur extrême vulnérabilité en Haïti. Il serait utile d'engager une réflexion sur :

- la faisabilité de leur renforcement dans le respect de leur caractère historique remarquable ;
- le cas échéant d'évaluer la pertinence de la mise en œuvre de recommandations ou de règles provisoires, comme l'arrêt de l'exploitation pour certaines fonctions (scolaire par exemple).

8.2 La préparation de l'après

Elles sont déjà en cours par les pouvoirs publics, nous nous permettons cependant d'insister sur les points suivants, sans pour autant que cette liste ne soit exhaustive :

Mettre en place l'organisation opérationnelle des diagnostics d'urgence

Ce point est développé dans le chapitre consacré aux diagnostics d'urgence.

Etablir un plan de rétablissement du réseau routier

Sur la base du diagnostic préalable, établir un plan de réalisation d'itinéraires alternatifs et de moyens de rétablissement des franchissements endommagés (pont de Bananier, Pont de La Boucan en Guadeloupe par exemple, accès au Port qui est actuellement sur une route unique en cul de sac à travers la mangrove).

Généraliser la formation aux premiers secours

Puisqu'il a été vu que ceux-ci proviennent dans un premier temps de l'entourage proche.

Etablir un plan de relogement provisoire d'urgence

Les camps de réfugiés en Haïti ont été mis en place avec l'aide des ONG et des organisations internationales. Les difficultés sanitaires et de sécurité posées sont immenses, et la simple dignité humaine a du mal à être respectée. Le risque cyclonique et les intempéries aggravent les difficultés. L'identification préalable de lieux propices à cette fonction et leur prééquipement en eau, électricité et assainissement est-elle envisageable ?



Figure 216 - Les personnes sans-abris vivent dans des camps, et parfois dans des abris de fortune en pleine rue

Etablir ou renforcer les plans de sauvegarde des opérateurs de service public

Eau, électricité, assainissement et téléphone mobile doivent pouvoir être rétablis immédiatement après une catastrophe. Les moyens techniques de solutions provisoires de rétablissement peuvent être étudiés préalablement. Il a été démontré en Haïti que le téléphone mobile pouvait être rétabli en 24 heures à quelques jours.

Engager des diagnostics de risque systémique

Actuellement, les bâtiments et ouvrages courants neufs sont classés vis-à-vis des règles parasismiques selon leur degré stratégique (arrêté du 29 mai 1997). L'Eurocode parle de catégorie d'importance pour décrire la même notion. Leur dimensionnement sera modulé en fonction de ce classement, afin de graduer la protection : ainsi un plateau technique d'hôpital sera-t-il protégé contre un événement plus important qu'un établissement scolaire, lui-même plus protégé qu'un immeuble de logements. Cette notion s'attache au bâtiment ou à l'ouvrage pris isolément.

Il semble pertinent, considérant un territoire insulaire dans son ensemble et dans son état du moment (les bâtiments existants ne sont pas nécessairement parasismiques), d'étudier le risque systémique que peut représenter la perte de certains bâtiments ou ouvrages. Quelles conséquences pour les fonctions vitales de la perte d'un quai du port, d'une caserne de secours incendie, d'un centre de soins, d'un commissariat de police au sein de la chaîne à laquelle il participe ? Une telle étude doit permettre :

- D'établir une hiérarchie parmi les bâtiments nécessaires au fonctionnement de la société, selon des critères de fonctionnement réel d'un système, et non selon un classement limité à la seule fonction abritée ;
- De mettre au point préalablement au séisme des solutions alternatives permettant le rétablissement du système.

Prévoir la gestion des gravats de démolition

De grosses difficultés ont été constatées en Haïti devant la nécessité d'évacuer une très grande quantité de gravats de démolition. Est-il envisageable de prédéterminer des lieux de dépôt de ceux-ci ?

9. PROPOSITIONS DE L'AFPS POUR DES D' ACTIONS A MOYEN ET LONG TERME POUR LA REPUBLIQUE D'HAÏTI

Rédaction : Vincent Courtray, avec Jean-Marc Mompelat et Claude Hauss

9.1 Actions relatives à la prévention du risque sismique

9.1.1 Exemple d'analyse de guides techniques de construction parasismique

Lors de sa rencontre du 28 mai avec la directrice de cabinet de Monsieur le ministre des Travaux Publics, des Transports et des Communications, la mission AFPS a été sollicitée pour émettre des avis sur deux documents en cours de rédaction finale. Les services affaiblis du Ministère n'ont pas les ressources internes leur permettant d'apprécier et valider ces travaux :

- Le guide des bonnes pratiques pour la construction de petits bâtiments en Haïti
- L'étude de code de la construction – Mesures d'urgence – Haïti

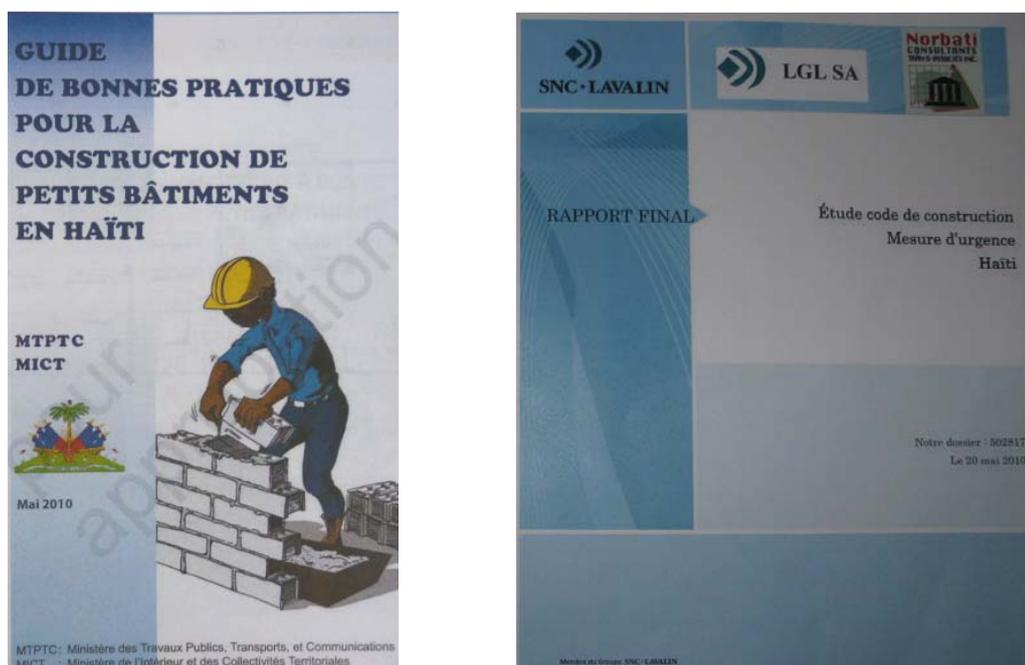


Figure 217 – Guide et document analysé pour le compte du MTPTC

Ces documents sont établis par des bureaux d'études étrangers choisis suite à des appels d'offres antérieurs au séisme, et dont les missions ont été réorientées dans l'urgence suite à l'événement. Cette procédure d'urgence n'a cependant pas permis de sélectionner les prestataires sur leur expertise en génie parasismique.

Le MTPTC nous a fait part de son intention d'éditer rapidement ces documents, et il a souhaité avoir l'avis de professionnels plus aguerris au génie parasismique et aux modes constructifs pratiqués aux Antilles.

La mission a remis dès le 30 mai l'avis demandé, par courrier électronique à la directrice de cabinet, Madame Viviane Saint-Dic et au directeur des Travaux Publics, Monsieur Alfred Piard.

Cet avis portant sur une quarantaine de points, donne des précisions sur des éléments techniques de construction, sur les schémas associés, sur le domaine d'application du guide qu'il conviendrait de préciser et attire l'attention sur l'ambiguïté de certaines expressions utilisées issues du québécois (nationalité ou pays

de formation des auteurs du projet de guide). **Il attire aussi l'attention sur certaines prescriptions contraires aux règles de construction parasismique.**

Les éléments détaillés sont donnés en annexe du présent rapport.

Il nous apparaît nécessaire, dans des démarches aussi importantes et lourdes de conséquences comme celles de l'établissement d'une réglementation technique et de recommandations de bonnes pratiques, que soit instauré le principe de base de la gestion de la qualité qui est celui du contrôle tierce-partie. Il semble en effet difficilement concevable, étant donné les enjeux majeurs, de confier les intérêts d'une nation toute entière à un seul prestataire.

9.1.2 Documents à l'usage des Antilles françaises utilisables en Haïti

Le travail réalisé ou en cours de réalisation aux Antilles par l'AFPS en vue de la rédaction d'un guide de règles de conception et de réalisation de maisons individuelles ou bâtiments assimilés selon l'Eurocode 8 aux Antilles pourra utilement être diffusé en Haïti, les typologies d'habitat entre les Antilles françaises et Haïti présentant des similitudes.

De même, les différents supports de communication établis aux Antilles françaises, particulièrement à destination des artisans ou des constructeurs de maisons pourront être proposés en Haïti afin de favoriser la culture de la construction parasismique.

La première étape serait de recenser les différents documents, guides et brochures existant en Haïti relatifs à la construction parasismique, et d'identifier les éventuels compléments à y apporter. A première vue et sous réserve de cet inventaire, il semble que des compléments seraient utiles.

9.1.3 Formation technique des professionnels et formation grand public

Dans ses échanges avec les pouvoirs publics français, L'AFPS a déjà évoqué « *sa collaboration à la mise au point de documents supports de formation et à l'assistance dans leur traduction en créole en direction des artisans et des apprentis, avec l'aide de ses chapitres Guadeloupe et Martinique* ». Cette cible des maçons, amateurs ou aguerris, est en effet à privilégier pour une diffusion rapide des connaissances sur les méthodes de construction parasismique.

9.1.4 Formation au sauvetage-déblaiement

Dans un autre registre, l'AFPS pourrait réfléchir à son positionnement par rapport à une formation grand public sur les rudiments des techniques de sauvetage-déblaiement adaptée à des populations disposant de peu de moyens et vivant dans les zones très exposées en Haïti (faille du nord – cap Haïtien).

Ce besoin a été fortement ressenti sur place. Il est en effet constaté que dans les premières heures suivant une catastrophe majeure, la désorganisation ou l'engorgement des moyens de secours, ou encore l'obstruction des voies de communication, laissent une grande partie de la population livrée à elle-même. Seule l'aide de proximité est disponible. Ce cas de figure prévaudrait également dans les contextes insulaires des Antilles françaises.

L'AFPS devra évaluer s'il est pertinent pour elle d'élargir son champ d'action à ce genre de compétences, qui est en général du ressort des ONG.

9.1.5 Collaborations franco-haïtiennes

L'AFPS a déjà souligné auprès des pouvoirs publics français « *qu'elle est le lieu de rencontre de toutes les professions intéressées par la prévention du risque sismique, ce qui permet l'obtention de consensus pour l'amélioration de la prévention de ce risque. Le modèle français pourrait très facilement être proposé aux professions correspondantes en Haïti : cette action pourrait être prise en charge par les Chapitres antillais, d'abord par une intégration aux activités antillaises puis par une assistance lorsque les mécanismes de vie de l'association haïtienne seraient en place. L'activité intense des membres de l'AFPS aux Antilles a permis la sensibilisation des architectes, ingénieurs et entrepreneurs locaux aux pratiques de bonne construction et l'adhésion d'un grand nombre d'entre eux, ce qui maintient la sensibilisation et diffuse les bonnes pratiques. Cette action pourrait prolonger cet effet sur Haïti* ».

A noter qu'un équivalent existe en République Dominicaine. Lors de la conférence internationale sur la reconstruction d'Haïti à Punta Cana (République Dominicaine) en juillet, il a été évoqué l'idée d'une entité unique pour toute l'île d'Hispaniola.

Lors de notre mission, il a été évoqué par Jérémy Fraissinet, conseiller auprès du ministre des Travaux Publics, des Transports et des Communications, une possible collaboration entre étudiants haïtiens et étudiants de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs des Travaux de la Construction de Caen (ESITC Caen) situé à Epron. L'AFPS pourrait parrainer cette action, en lien avec l'ambassade de France en Haïti. Des collaborations avec d'autres écoles sont sans doute également possibles.

9.1.6 Aménagement du territoire

Le Comité Interministériel à l'Aménagement du territoire (CIAT) joue un rôle important en Haïti comme force de proposition pour l'Aménagement du territoire. Un document nous a d'ailleurs été remis ; nommé « Haïti Demain » et daté de mars 2010, il a pour objectif de définir les objectifs et les stratégies territoriales pour la reconstruction d'Haïti.

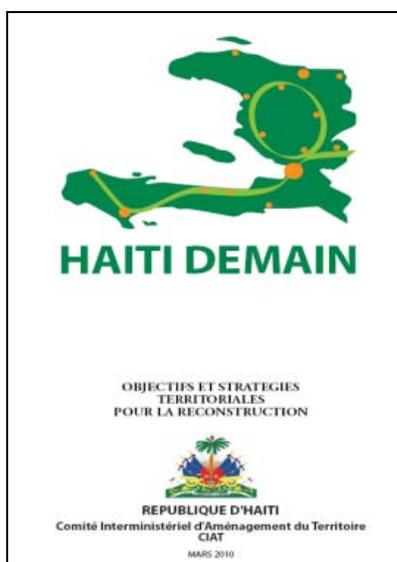


Figure 218 – Document « Haïti demain »

Une offre de services de la part du BRGM a été faite pour assister la République d'Haïti dans l'étude de la sismicité nationale et locale. Il est indispensable que le pays dispose d'éléments précis sur tous les aspects de l'évaluation de l'aléa sismique régional et local : études néotectoniques, aléa déterministe et probabiliste, réseaux sismologiques, microzonages sismique,... Ce point est particulièrement détaillé dans le chapitre du présent rapport dédié à la sismologie.

L'AFPS pourrait apporter son assistance et ses compétences pour définir les besoins en la matière, et suivre la réalisation de ces études spécifiques. Son expérience aux Antilles françaises est précieuse. En particulier sur les zones très exposées (par exemple les grandes villes situées le long de la faille septentrionale), des évaluations de la vulnérabilité et du risque pourraient être menées, puis la définition des mesures à prendre pour réduire ce risque à court terme, à moyen terme et à plus long terme. L'idée d'un « **Plan Séisme Haïti** » pourrait naître de ces réflexions.

Un autre aspect important de l'aménagement du territoire national relatif à la prise en compte des risques et en particulier du risque sismique est la nécessité de disposer, un peu selon le modèle français, de plans de prévention des risques (multirisques) ; L'AFPS pourrait apporter son savoir-faire sur ces PPR spécifiques au risque sismique.

9.2 Actions relatives à la reconstruction du bâti

Sur les aspects proprement dits de la reconstruction du bâti, l'action de l'AFPS sera limitée à la diffusion de pratiques liées à la construction ou au renforcement parasismique. Ici comme dans d'autres domaines,

l'expérience des Antilles françaises permettra d'apporter en Haïti des collaborations fructueuses permettant une reconstruction efficiente.

9.3 Actions relatives à la gestion de crise

Le chapitre consacré à la réalisation des diagnostics d'urgence des bâtiments démontre toute la richesse de la mission en Haïti pour l'amélioration de la démarche de diagnostic d'urgence établie dans le cadre du groupe de travail AFPS en Guadeloupe.

En Haïti, suite au séisme du 12 janvier 2010, une organisation spécifique a été mise en place pour répondre à l'objectif de diagnostiquer rapidement un grand nombre de bâtiments publics et privés. L'expérience haïtienne est un apport important pour enrichir le travail mené en Guadeloupe et pour proposer aux autorités françaises en charge de la protection civile une organisation adaptée.

Le travail ainsi déjà réalisé en Guadeloupe, incluant à la fois les principes de l'organisation et les méthodes (fiches d'analyse, fiches de suivi, formation des experts, suivi de la liste des experts mobilisables) pourrait être fourni aux autorités haïtiennes. Sa transposition pour Haïti semble aisée étant donné la proximité des typologies de bâtiments. Cependant, les moyens et méthodes mis en place à Port-au-Prince ont également fait la preuve de leur efficacité, et il n'est pas forcément pertinent de vouloir y substituer les travaux en cours de l'AFPS.

A court terme, il serait intéressant de pouvoir être associé au retour d'expérience de cette vaste opération de diagnostic menée par les Haïtiens. Parmi l'ensemble des bâtiments diagnostiqués, des dizaines de milliers sont utilisables, mais nécessitent des travaux de confortement, ou de réparation. L'AFPS pourrait proposer un suivi et une méthodologie pour ce gigantesque chantier.

9.4 Actions relatives à l'évaluation du risque

Les autorités haïtiennes ont attiré notre attention sur les craintes qu'elles nourrissent à propos de la ville de Cap Haïtien, peuplée d'environ 250 000 habitants, non affectée par le séisme du 12.01.2010, mais considérée comme située dans une zone à risque, et constituée d'un bâti particulier présentant de fortes caractéristiques de vulnérabilité. L'évaluation du risque propre à cette ville pourrait être réalisée par une synthèse des éléments de sismicité locale dont la détermination fait partie des actions à envisager impérativement en Haïti, complétée par une estimation de la vulnérabilité du bâti de cette ville.



Figure 219 - Bâti particulier de Cap Haïtien
(photos LNBTP)

9.5 Synthèse commentée des actions envisageables

La synthèse ci-dessous constitue l'avis des membres de la mission sur les propositions initiales de l'AFPS, rédigées avant le retour d'expérience. Il nous a semblé indispensable de compléter la structuration des actions envisagées par deux phases préliminaires.

Phase préliminaire 1 : dimensionnement des ressources nécessaires et définition du niveau d'action

De façon générale, il serait souhaitable de dimensionner plus précisément les ressources nécessaires aux actions envisageables. On observera que l'ensemble cumulé de celles-ci représente un plan ambitieux (voir liste ci-dessous), qui mettra fortement à contribution les membres de l'association. On évoque souvent dans cette liste d'actions la participation des membres des chapitres Guadeloupe et Martinique, bien évidemment en position privilégiée par la proximité linguistique, géographique, leur connaissance des modes et pratiques constructives, du milieu insulaire et tropical.

Le vivier des membres de l'AFPS aux Antilles a cependant une composition professionnelle très concentrée sur l'exercice de professions du bâtiment dans des entreprises privées, ce qui pourrait paraître comme un avantage technique, mais a l'inconvénient d'une bien moindre disponibilité au profit de l'association. Un appui important des membres de la métropole, plus nombreux, est donc indispensable.

Concomitamment à ce dimensionnement, il nous semble également nécessaire de préciser le positionnement du niveau d'action le plus pertinent : **fait-il FAIRE, ou faut-il PILOTER- VALIDER- CONSEILLER ?**

En effet, rédiger un guide technique ou piloter et valider une rédaction faite par d'autres sont deux actions tout aussi utiles, mais qui ne nécessitent pas forcément le même niveau d'expertise ni le même nombre d'intervenants. L'AFPS pourrait se positionner sur celle des deux actions qui mettrait au mieux à contribution son très haut niveau d'expertise collectif.

Phase préliminaire 2 : recensement des documents existants

Il faudrait veiller à ne pas ajouter à la confusion qui semble régner actuellement, du fait de la profusion de documents et propositions de guides techniques en tous genres qui existent en Haïti depuis le séisme de janvier. Une première action à proposer serait donc d'apporter une aide au **recensement de tout ce qui existe** et d'en faire une analyse critique, afin d'identifier les choses positives et cibler les bons compléments à apporter. L'expertise de l'AFPS semble toute indiquée pour une telle tâche. Le dimensionnement des actions exposées dans les points 1 à 3 ci-dessous en découle directement.

1- Rédaction de guides techniques sur la base de méthodes simplifiées

Ce travail devrait utiliser le patrimoine récent de l'AFPS (guide CP-MI Antilles, Règles Simplifiées Petit Bâtiments).

Notre avis : il est confirmé au vu de ce qui a été constaté sur site que la pratique de la construction en France et aux Antilles françaises est particulièrement adaptée pour apporter une réponse pertinente, et que les guides de l'AFPS constituent une excellente base de départ. Un travail de simplification doit cependant être mené. Sous réserve du recensement des existants.

2- Formation des artisans

Mise au point de supports de formation pour les artisans (bonnes pratiques sur le chantier).

Notre avis : nous confirmons la pertinence des actions actuellement menées en Guadeloupe et Martinique par les pouvoirs publics, les syndicats professionnels et l'AFPS, et leur transposition possible en faveur d'Haïti. L'expertise de l'AFPS pourrait utilement être mise à contribution sur une telle tâche. Sous réserve du recensement des existants.

3- Formation des ONG

Mise au point de documents supports à l'auto-construction destinée à être encadrée par les ONG.

Notre avis : semblable à celui des points 1 et 2, confirmation de la pertinence et de l'adaptation de l'expertise de l'AFPS, (sous réserve du recensement des existants). Il sera cependant nécessaire de mettre au point des procédures de limitation des responsabilités lorsque des méthodes rédigées par l'AFPS seront utilisées par des non professionnels et en dehors de son contrôle. Le statut des ONG en matière de responsabilité manque encore de jurisprudence, et les comportements observés sont parfois peu soucieux du respect des règles de prudence.

4- Documents et messages grand-public pour l'amélioration des pratiques de l'autoconstruction

Notre avis : confirmation de la pertinence et de l'adaptation de l'expertise de l'AFPS, sous réserve du recensement des existants.

5- Création d'une association haïtienne du génie parasismique

Notre avis : confirmation de la pertinence et de l'adaptation de l'expertise de l'AFPS pour une aide à cette démarche. Il semblerait cependant que la création d'une association commune entre Haïti et la République Dominicaine soit déjà en projet.

6- Mise à disposition des guides existants

Notre avis : confirmation de la pertinence et de l'adaptation de l'expertise de l'AFPS, sous réserve du recensement des existants. Cette action recoupe cependant les point 1 et 2, et il serait peut-être judicieux de refondre l'ensemble en un chapitre plus vaste d'adaptation et mise à disposition des guides et supports de formation existants notamment aux Antilles françaises, les uns étant issus de l'AFPS les autres de sources tierces.

La traduction en créole haïtien semble indispensable.

7- Collaboration au niveau des universités, écoles d'ingénieurs et établissements de formation divers

Notre avis : confirmation de la pertinence. L'action de l'AFPS est cependant à mieux définir sur ce point, ainsi que son articulation avec les acteurs publics et professionnels de la formation en France.

8- Etude de la sismicité locale et du zonage sismique

L'AFPS pourrait définir et conseiller sur la nature des études à mener.

Notre avis : confirmation de la pertinence. Mais la problématique n'est pas que locale (cf. recommandations dans le volet sismologique du présent rapport), mais doit être étendue à tous les aspects de l'évaluation de l'aléa sismique régional : études néotectoniques, aléa déterministe et probabiliste, réseaux sismologiques, microzonages sismique ...

9- Définition des besoins de protection en matière de risques anticycloniques et hydrologiques

Notre avis : l'AFPS devra évaluer s'il est pertinent pour elle d'élargir son champ d'action à ce genre de compétences. Le besoin en Haïti est quant à lui manifeste.

10- Conseil pour la reconstruction d'un aménagement du territoire et d'un urbanisme

Notre avis : l'AFPS devra évaluer s'il est pertinent pour elle d'élargir son champ d'action à ce genre de compétences. Le besoin en Haïti est quant à lui manifeste. Ce point pourrait être limité à des recommandations générales de prise en compte du risque sismique dans l'aménagement.

11- Mise en place d'une organisation pour les diagnostics d'urgences

Notre avis : malgré la pertinence constatée sur site de la méthode développée par l'AFPS, une telle procédure est déjà largement en cours sur place, avec une efficacité remarquable. Il ne semble donc pas opportun de vouloir y substituer une autre méthode. Il serait au contraire plus judicieux de proposer une extension méthodologique visant à exploiter les résultats : que faire de près de 200 000 diagnostics d'urgence ? Comment détecter sur cette base les bâtiments méritant une expertise complémentaire ayant une probabilité suffisante d'aboutir à la faisabilité d'une réparation ? Quels types de travaux envisager ?

12- Aide à la rédaction d'un document directeur de type « plan séisme »

Nous soumettons à l'étude ce point supplémentaire. Il nous semble que les compétences de l'AFPS pourraient être valorisées utilement au bénéfice de la coopération Franco-Haïtienne, par l'aide à la rédaction d'un document directeur de type « Plan Séisme Haïti ». L'AFPS pourrait faire profiter Haïti du retour d'expérience d'une telle démarche, initiée depuis maintenant cinq ans en France et aux Antilles, et dont des enseignements précieux peuvent être tirés. Un tel document devrait bien entendu être adapté aux conditions locales, et surtout aux nécessités de la reconstruction du pays. Il ne s'agit pas de prévention « à froid », il s'agit de prévention dans un pays en voie de reconstruction.

L'action de l'AFPS pourrait être la rédaction par elle-même d'un tel document, ou si une telle rédaction était déjà en cours ou envisagée par ailleurs, le pilotage, la validation et l'analyse critique de celui-ci.

10. RELATIONS AVEC LES AUTORITES – PERSONNALITES RENCONTREES

La mission de l'AFPS présente en Haïti entre le soir du 24 mai et le 1^{er} juin a pu rencontrer un certain nombre d'autorités politiques ou directeurs de services des administrations liés de manière générale à la construction. Ces rencontres ont permis de mesurer l'attente et les besoins d'Haïti en matière de reconstruction du bâti public ou privé, de prévention du risque sismique (incluant les éléments relatifs à la construction parasismique des nouvelles constructions) et dans le domaine de la gestion de crise.

Les personnalités haïtiennes rencontrées sont :

- Madame Viviane SAINT-DIC, directrice de cabinet du ministre des travaux publics, des transports et des communications (MTPTC)
- Monsieur Alfred PIARD, directeur des travaux publics, au sein du MTPTC
- Monsieur Yves Fritz JOSEPH, directeur général du laboratoire national du bâtiment et des travaux publics (LNBTP)
- Monsieur ANGLADE, directeur général du Bureau des Mines et de l'Energie (BME du MTPTC)
- Madame Simone D'EMEZA, géologue au BME
- Monsieur Louis-Honoré PIERRE, géologue au BME
- Monsieur Saint-Louis MILDOR, géologue au BME
- Monsieur Pierre NACESSE, directeur technique de l'Autorité Portuaire Nationale (APN)
- Madame Marlène THOMPSON, directrice financière de l'Hôpital de l'Université d'Etat d'Haïti (HUEH)
- Monsieur Elyse COLLAGENE, ingénieur, directeur technique de l'HUEH
- Madame Roberte MONPLAISIR, géologue au laboratoire de géologie de la faculté des sciences
- Monsieur Fritz G PIERRE-LOUIS, PDG de l'entreprise MAGEPA S.A. à Léogane
- Monsieur Gérald JEAN-BAPTISTE, directeur du Comité Interministériel à l'Aménagement du Territoire (CIAT) et directeur général de la Direction Nationale de l'Eau potable et de l'Assainissement (DINEPA)
- Madame Ruth ANGERVILLE, responsable Etudes et Productions à la DINEPA
- Monsieur Sergio MAZZUCHELLI, conseiller en développement institutionnel à la DINEPA
- Madame Murièle BARTHE-GARDERE, directrice des ressources humaines de Digicel Haïti
- Monsieur René JEAN-JUMEAU, coordinateur énergie au ministère des travaux publics, des transports et des communications (MTPTC)

Les personnalités françaises en poste en Haïti rencontrées sont :

- Monsieur Bernard SMOLIKOWSKI, attaché de coopération chargé de développement à l'Ambassade de France en Haïti
- Monsieur Jean-Michel MAURIN, ingénieur, conseiller auprès du premier ministre haïtien, au sein du Comité Interministériel à l'Aménagement du Territoire (CIAT)
- Monsieur Jérémy FRAISSINET, ingénieur, conseiller auprès du ministre des TP, des Transports et des Communications
- Monsieur Pierre BONNEAU, ingénieur, conseiller pour la Banque Mondiale
- Monsieur Christophe MUSARAGANYI, chargé de la cellule informatisation SIG pour l'UNOPS Centre d'opérations en Haïti (évaluation des bâtiments)
- Monsieur Claude FABIGNON, détaché du Conseil Régional de la Guadeloupe, responsable veille économique Guadeloupe-Haïti auprès de la Chambre franco-haïtienne de commerce et d'industrie
- Monsieur Yann MARTINEAU, ingénieur principal de la société SETEC, détaché au Comité Interministériel à l'Aménagement du Territoire (CIAT).

Table des illustrations

Figure 1 - Carte des intensités selon l'USGS.....	5
Figure 2 - Hispaniola – Carte topographique	6
Figure 3 - Haïti - Carte topographique.....	7
Figure 4 - La Tour 2004 jamais achevée,.....	8
Figure 5 - Port-au-Prince avant le séisme.....	9
Figure 6 - La nuit du 12 janvier 2010.....	9
Figure 7 - Le 13 janvier 2010 - le Palais National, avant et après le séisme,	10
Figure 8 - Port-au-Prince le 24 mai 2010	10
Figure 9 - Port de commerce public	13
Figure 10 - La vie reprend au milieu des ruines	13
Figure 11 - Localisation approximative des zones ayant fait l'objet d'observations pour les aspects sismologiques et géologiques	14
Figure 12 - Schéma simplifié des plaques tectoniques et principales failles. (Source : P. Tapponnier and Liow Hong San, EOS-Singapour, d'après N. Feuillet, Thèse, 2000. sur site www.ipgp.fr)	15
Figure 13 - Le système de failles EPGFZ sur la presqu'île du Sud.	16
Figure 14 - La faille EPGFZ entre Carrefour et Pétienville.....	16
Figure 15 - Sismicité historique de l'île d'Hispaniola	17
Figure 16 - Sismicité instrumentale de la région d'Haïti 1964-2009.....	18
Figure 17 - Vitesse de déplacement de sites GPS en Haïti	19
Figure 18- Vitesse de déplacement des plaques tectoniques.....	19
Figure 19 - Extrait de la carte géologique d'Haïti à 1/250000	21
Figure 20 - Coupe géologique nord-sud passant par Port-au-Prince	21
Figure 21 - Variations de faciès au sein de la formation Miocène de Port-au-Prince	23
Figure 22 - Extrait d'une coupe sondage à la tarière réalisée sur le port de cabotage	24
Figure 23 - Zones de remblai à Port-au-Prince	25
Figure 24 - Carte géologique de Port-au-Prince établie par le GEER	26
Figure 25 - Epicentres du choc principal et des répliques entre le 12 et le 24 Janvier.....	28
Figure 26 - Répliques sur la période 12 Janvier - 10 Avril	29
Figure 27 - Distribution du glissement sur le plan de faille dérivée de données télésismiques.....	29
Figure 28 - Carte des déformations de surface causées par le séisme du 12 janvier 2010.....	30
Figure 29 - Déplacements du sol lié au séisme à partir des données radar.....	30
Figure 30 - Variation des contraintes de Coulomb après le séisme du 12 Janvier.....	32
Figure 31 - Carte d'intensité en échelle Mercalli Modifiée (MM)	33
Figure 32 - Carte d'intensité préliminaire.....	33
Figure 33 - Carte d'accélération de pic.....	34
Figure 34 - Enregistrement du choc principal et des premières répliques.....	35
Figure 35 - stations accélérométriques de l'USGS	36
Figure 36 - Stations sismiques temporaires canadiennes et localisation des répliques	36
Figure 37 - Carte d'implantation des stations sismiques sous-marines de la campagne Haïti-OBS.....	37
Figure 38 - Carte d'intensité de dommages Port-au-Prince et Carrefour	39
Figure 39 - Report des zones de fortes concentration de dommages	40
Figure 40 - Zones de concentration de dommages dans le quartier de Fort National.....	42
Figure 41 - Concentration de dommages au quartier Nazon	42
Figure 42 - Répartition hétérogène des dommages au sein des versants au sud de Port-au-Prince	43
Figure 43 - Mesure H/V au centre ville de Port-au-Prince,	44
Figure 44 - Carte de densité de dommage sur Carrefour	46
Figure 45 - Mesures H/V à Carrefour	46
Figure 46 - Mesures H/V à Léogane	47
Figure 47 - Mesures H/V à Port-au-Prince	48
Figure 48 - Orientation de certaines zones de concentration de dommages selon des directions particulières	49
Figure 49 - Dégâts au bâti et éboulements le long de la route du Canapé Vert	51
Figure 50 - Instabilités aux abords de Carrefour La Boule (sites CB-a à CB-e)	52
Figure 51 - Eboulement au sein d'une ancienne carrière aménagée (site CB-a)	53
Figure 52 - Eboulement au sein d'un ancien front de taille (site CB-a).....	53
Figure 53 - Eboulement au sein d'une ancienne carrière aménagée – vue d'ensemble (site CB-a).....	54
Figure 54 - Glissement de terrain en bordure de route à Carrefour La Boule (site CB-b)	55

Figure 55 - Glissement en bordure de route à Carrefour La Boule, près de la Maison Barbancourt (site CB-c)	56
Figure 56 - Carrière à Carrefour La Boule – fronts de taille non sécurisés (site CB-d)	57
Figure 57 - Réactivation d'un ancien glissement près de Carrefour La Boule et risque résiduel	58
Figure 58 - Exemple d'éboulement le long de la route entre Carrefour et Grand Goâve	59
Figure 59 - Route de Jacmel - blocs potentiellement instables au sein du talus amont	59
Figure 60 - Eboulement affectant le réseau routier secondaire au sud de Carrefour	60
Figure 61 - Fissuration et tassement de la chaussée entre Carrefour et Grand Goâve	61
Figure 62 - Zones de concentration d'instabilités identifiées sur Google et reportées sur la carte géologique au 1/250 000	62
Figure 63 - Réactivation et extension d'anciens glissements au sud de Carrefour	63
Figure 64 - Exemples de barrages naturels occasionnés par des glissements de terrain au nord-ouest de Jacmel	64
Figure 65 - Situation du séisme d'Haïti en terme distance à l'épicentre et à la faille en termes de liquéfaction, comparativement aux données mondiales	65
Figure 66 - Désordres liés à la liquéfaction au sein du port commercial de Port-au-Prince	66
Figure 67 - Projections de sable-argileux au sein du bâtiment de la sécurité de l'Autorité Portuaire Nationale	66
Figure 68 - Désordres liés à la liquéfaction au port de Port-au-Prince	67
Figure 69 - Déstabilisation de remblais récents dans la zone portuaire	68
Figure 70 - Désordres au sein d'une zone de liquéfaction supposée à Léogane	69
Figure 71 - Propagation latérale et glissement côtier lié à la liquéfaction à « Fouché »	71
Figure 72 - Ecoles, hôpitaux, centre des télécoms, commerces, bureaux, habitat : peut-on ou non utiliser ces bâtiments ?	79
Figure 73 - Manuels techniques et de terrain de la méthode ATC-20	80
Figure 74 - Typologie structurelle de bâtiment en maçonnerie traité par l'ATC-20	81
Figure 75 - L'habitat individuel traité par l'ATC-20 est en panneaux bois et typique de l'Amérique du nord	81
Figure 76 - Extrait de la fiche ATC-20 d'évaluation rapide	82
Figure 77 - Extrait de la fiche ATC-20 d'évaluation détaillée	83
Figure 78 - Exemple d'endroits particuliers à observer dans les bâtiments en béton, selon l'ATC-20	84
Figure 79 - Formulaire utilisé en Haïti, avec nos commentaires	85
Figure 80 - Formulaire utilisé en Haïti (suite), avec nos commentaires	86
Figure 81 - Illustrations de l'organisation mise en place	88
Figure 82 - Principes du recueil de l'information	89
Figure 83 - Exemple de représentation d'une journée d'évaluation grâce aux coordonnées GPS	89
Figure 84 - Le PC du BETB	90
Figure 85 - Exemples de pochoirs et de la signalétique mise en œuvre	91
Figure 86 - Synthèse globale des résultats sur Port-au-Prince et ses environs au 23 juin 2010	92
Figure 87 - Fiche AFPS, page 1	95
Figure 88 - Fiche AFPS, page 2	96
Figure 89 - Dos des pages 1 et 2 de la fiche APFS	97
Figure 90 - Affiches de l'AFPS	97
Figure 91 - Synthèse des teste réalisés	99
Figure 92 - Aide à la décision AFPS : cas insuffisamment discriminant	100
Figure 93 - Aide à la décision AFPS : proposition de modification	101
Figure 94 - Questionnement sur l'influence réelle des maçonneries sur la solidité globale	101
Figure 95 - Application de la page 3 du formulaire : cas des éléments structuraux	102
Figure 96 - Mur de remplissage dégradé entre les éléments d'un portique BA	103
Figure 97 - Exemple d'application au Collège Saint-Louis	105
Figure 98 - Exemple d'application au Collège Saint-Louis	105
Figure 99 - Exemple d'application au bâtiment de l'Evêché	106
Figure 100 - Exemple d'application à l'Ecole Nationale Caroline	107
Figure 101 - Antenne mobile autonome	108
Figure 102 - Extrait de la fiche AFPS, page 1 : demande d'un avis complémentaire	109
Figure 103 - Plan de Port au Prince	114
Figure 104 - Première évaluation des dommages réalisée le 15 janvier,	115
Figure 105 - Exemple de morphologies de bâtiments haïtiens aisément reconnaissables aux Antilles françaises	117
Figure 106 - Il n'est pas rare que la façade en maçonnerie lourde ne soit pas dans le même plan que l'ossature, en étant rejetée à l'extérieur de celle-ci	118
Figure 107 - Les hourdis creux sont posés avec une orientation irrégulière et ne reposent sur aucun appui : ils sont suspendus par simple adhérence.	118

Figure 108 - Désolidarisation des hourdis creux (en fait des parpaings couchés) et de la dalle de compression.	119
Figure 109 - Rupture des hourdis creux.	119
Figure 110 - Port au Prince - Quartier Turgeau.....	121
Figure 111 - Port au Prince – Quartier Saint Gérard (-72.340 ; 18.529).....	121
Figure 112 - Boulevard Dessalines - Port au Prince – centre ville.....	122
Figure 113 - Centre d'études classiques – Port au Prince – quartier Saint Antoine (-72.332 ; 18.541).	122
Figure 114 - Immeuble Hexagone – Pétienville (-72.290 ; 18.514).....	122
Figure 115 - Bâtiment de l'évêché – Port au Prince – Centre ville (-72.338 ; 18.540).....	122
Figure 116 - Immeuble Sogebank – Port au Prince – Quartier Delmas (-72.310 ; 18.551).....	122
Figure 117 - Collège Saint Louis Roi de France – Port au Prince – Quartier Turgeau (-72.330 ; 18.536)....	123
Figure 118 - Port au Prince - Quartier Turgeau (-72.329 ; 18.536).....	123
Figure 119 - Hôpital Turgeau – Port au Prince – Quartier Canapé Vert (-72.324 ; 18.532).	123
Figure 120 - Immeuble Unibank – Pétienville (-72.289 ; 18.514).....	123
Figure 121 - Détail de ferrailage des cadres avec une fermeture à 90°.....	124
Figure 122 - Léogane – Rue principale.	124
Figure 123 - Collège Saint Louis Roi de France – Port au Prince – Quartier Turgeau (-72.330 ; 18.536)....	124
Figure 124 - Léogane. Dalles de toitures à des hauteurs différentes :	124
Figure 125 - Rue du Centre – Port au Prince – centre ville.	124
Figure 126 - Boulevard Dessalines - Port au Prince – centre ville.....	124
Figure 127 - Port au Prince – Quartier Delmas (-72.310 ; 18.551).	125
Figure 128 - - Port au Prince – centre ville.....	125
Figure 129 - Immeuble Teleco – Port au Prince – (-72.323 ; 18.536).....	125
Figure 130 - Vue générale d'un bâtiment en maçonnerie contemporaine en blocs de parpaings.....	127
Figure 131 - Vue générale d'un bâtiment en maçonnerie contemporaine en blocs de parpaings.....	127
Figure 132 - Le mortier est brassé à la main avec un dosage en ciment très faible, et en eau aléatoire.	127
Figure 133 - Le mortier ne semble avoir qu'une très faible résistance et se désagrège facilement.....	127
Figure 134 - Chantier de construction d'une maison en maçonnerie.	127
Figure 135 - Léogane. Liaisons entre les chainages et les panneaux de remplissage non assurée.	127
Figure 136 - Port au Prince - Quartier Delmas.....	128
Figure 137 - Léogane.....	128
Figure 138 - Port au Prince - Quartier Delmas.....	128
Figure 139 - Léogane.....	128
Figure 140 - Port au Prince - Quartier Delmas.....	128
Figure 141 - Léogane.....	129
Figure 142 - Léogane.....	129
Figure 143 - Port au Prince - Quartier Turgeau (-72.330 ; 18.535).....	129
Figure 144 - Port au Prince - Quartier Delmas.....	129
Figure 145 - Habitat précaire sur les pentes surplombant Port-au-Prince et Pétienville	130
Figure 146 - Morne Calvaire – Pétienville (-72.292 ; 18.511).	130
Figure 147 - Carrefour.....	130
Figure 148 - Port au Prince – Quartier Musseau (-72.291 ; 18.529).....	130
Figure 149 - Mise en œuvre des parpaings ne permettant pas d'assurer une liaison avec les chainages, même en présence des aciers verticaux.....	131
Figure 150 - Absence de chainages dans les remplissages.....	131
Figure 151 - Bâtiments de 3 niveaux sans diaphragme en toiture et présentant des irrégularités en plan... 131	131
Figure 152 - Bâtiments construits dans de fortes pentes et empilement des niveaux. Présence d'irrégularités en plan et en élévation.	131
Figure 153 - Enchevêtrement des bâtiments de réalisations différentes et présentant des comportements au séisme variables.....	131
Figure 154 - Léogane. Recyclage des parpaings issus les chantiers de démolition.	131
Figure 155 - Fort National – Port au Prince (-72.331 ; 18.548).....	132
Figure 156 - Léogane.....	132
Figure 157 - Route de Pétienville.....	132
Figure 158 - Maison en ossature bois – Port au Prince - Quartier Turgeau (-72.331 ; 18.5368).	133
Figure 159 - Maison en bois – Léogane.....	133
Figure 160 - Hangar en bois – Léogane.....	133
Figure 161 - Rue du centre – Port au Prince – Centre ville.	133
Figure 162 - Collège Saint Louis Roi de France – Port au Prince – Quartier Turgeau. (-72.330 ; 18.536)....	133
Figure 163 - Maison en bois – Léogane.....	134
Figure 164 - Caserne Dessalines- Port au Prince – Centre ville (-72.340 ; 18.542).....	135
Figure 165 - Boulevard Dessalines - Port au Prince – Centre ville.....	135
Figure 166 - Boulevard Dessaline – Port au Prince – Centre ville.....	135

Figure 167 - Ecole Bon Samaritain – Port au Pince – Centre ville. (-72.333 ; 18.542).....	135
Figure 168 - Collège Saint Louis Roi de France – Port au Prince – Quartier Turgeau (-72.330 ; 18.536)....	135
Figure 169 - Ecole nationale Caroline – Port au Prince – Centre ville.....	135
Figure 170 - Port au Prince - Quartier Turgeau.....	136
Figure 171 - Centre d'étude classique – Port au Prince – Centre ville. (-72.332 ; 18.541).	136
Figure 172 - Ecole Bon Samaritain – Port au Pince – Centre ville. (-72.333 ; 18.542).....	136
Figure 173 - Constitution des murs épais en maçonnerie de briques ou de moellons avec remplissage en tout-venant.....	137
Figure 174 - Eglise du sacré cœur – Port au Prince - Quartier Turgeau (-72.330 ; 18.535).	138
Figure 175 - Rue du centre – Port au Prince – Centre ville.	138
Figure 176 - Hôpital – Port au Prince – Centre ville (-72.341 ; 18.539).....	138
Figure 177 - Port au Prince – Centre ville.	138
Figure 178 - Caserne Dessalines - Port au Prince – Centre ville (-72.340 ; 18.545).....	138
Figure 179 - Eglise du sacré cœur – Port au Prince - Quartier Turgeau (-72.330 ; 18.535).	139
Figure 180 - Eglise du sacré cœur – Port au Prince - Quartier Turgeau (-72.330 ; 18.535).	139
Figure 181 - Caserne Dessalines - Port au Prince – Centre ville (-72.340 ; 18.545).....	139
Figure 182 - Léogane.	139
Figure 183 - Lycée Toussaint l'Ouverture – Port au Prince – Centre ville (-72.344 ; 18.542).	139
Figure 184 - Mairie de Leogane (-72.633 ; 18.512).	140
Figure 185 - Eglise de l'évêché – Port au Prince – Centre ville (-72.338 ; 18.540).	140
Figure 186 - Institution Saint Louis de Gonzarque – Port au prince – Centre ville (-72.344 ; 18.546).	140
Figure 187 - Rue du centre – Port au Prince – Centre ville.	142
Figure 188 - Boulevard Dessalines – Port au Prince – Centre ville.	142
Figure 189 - Port au Pince – Centre ville.	142
Figure 190 - Boulevard Dessalines – Port au Prince – Centre ville.	142
Figure 191 - Caserne Dessalines- Port au Prince – Centre ville (-72.340 ; 18.542).....	142
Figure 192 - Caserne Dessalines- Port au Prince – Centre ville (-72.340 ; 18.542).....	142
Figure 193 - Centre d'étude classique – Port au Prince – Centre ville. (-72.332 ; 18.541).	143
Figure 194 - Hôpital – Port au Prince – Centre ville.....	143
Figure 195 - Ecole Bon Samaritain – Port au Pince – Centre ville. (-72.333 ; 18.542).....	143
Figure 196 - Rue du centre – Port au Prince – Centre ville.	143
Figure 197 - Quartier de Canapé Vert - Turgeau : bâtiment de l'opérateur téléphonique DIGICEL, affecté par quelques très rares dommages secondaires. Aucune interruption de l'exploitation.....	144
Figure 198 - L'hôpital de Turgeau (-72.324 ; 18.532)	144
Figure 199 - Port au Prince – Centre ville. Bâtiment de la Banque Nationale	144
Figure 200 - Bâtiment effondré à quelques pas de la Banque Nationale... ..	144
Figure 201 - Port au Prince – Centre ville. Bâtiment de l'Evêché (-72.338 ; 18.540).	144
Figure 202 - En face de l'évêché : la Cathédrale en béton est totalement détruite.	144
Figure 203 - Exemple d'article de presse technique aux conclusions hâtives.....	145
Figure 204 – Approvisionnement et eau potable par un distributeur privé	147
Figure 205 - Epuration locale de l'eau.....	147
Figure 206 - Egouts à ciel ouvert	148
Figure 207 - Egouts à ciel ouvert	149
Figure 208 - La décharge de Truitier en février 2010.....	149
Figure 209 - Publication de la DINEPA	150
Figure 210 - Distribution électrique aérienne	151
Figure 211 – Transformateurs et Tableaux Carrefour I.....	151
Figure 212 - Transformateurs ayant glissé et remis en place, site de Juvenaut.....	152
Figure 213 - Stockages fuel Carrefour	152
Figure 214 - Antenne fixe sur le toit d'une maison dite « rooftop ».....	154
Figure 215 - Antenne mobile	155
Figure 216 - Les personnes sans-abris vivent dans des camps,.....	158
Figure 217 – Guide et document analysé pour le compte du MTPTC.....	159
Figure 218 – Document « Haïti demain ».....	161
Figure 219 - Bâti particulier de Cap Haïtien	162

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergie et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**

**Direction générale
de la Prévention des risques**
Cellule centrale interministérielle
d'appui au plan sisme Antilles

Arche Nord
92055 La Défense cedex
Tél. : 01 40 81 88 84

Septembre 2010