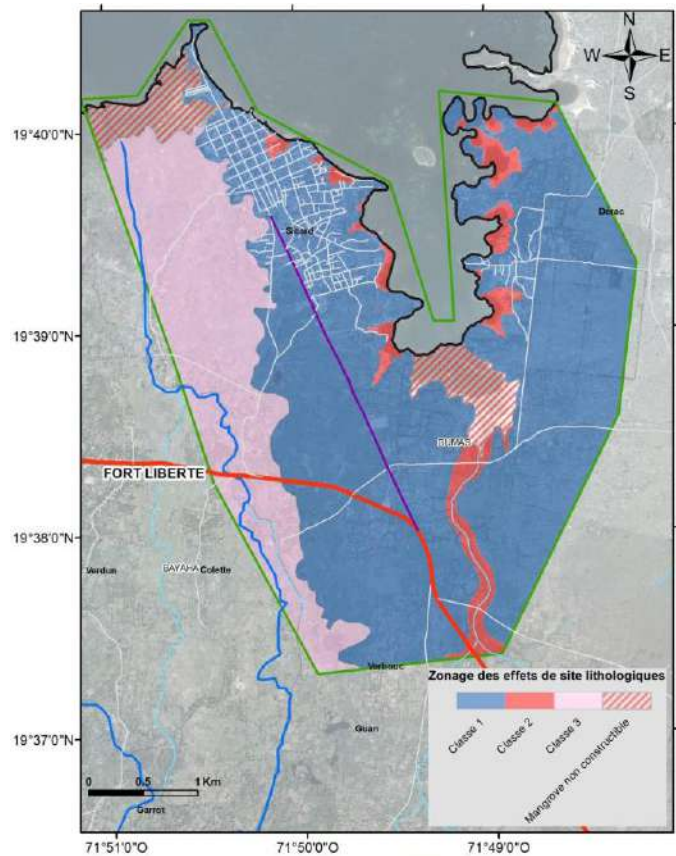




**PLAN DE PRÉVENTION SÉISME GRAND NORD D'HAÏTI – HAI/11/146**  
Département du Nord-est

# Le microzonage sismique de l'agglomération de Fort-Liberté en 8 fiches

Novembre 2014



# MICROZONAGE SISMIQUE DE FORT-LIBERTÉ

## NOTICE

« *Le microzonage sismique de Fort-Liberté en 8 fiches* » est une version allégée de l'étude réalisée de juillet 2012 à novembre 2014 en partenariat entre le BRGM, le LNBTP et le BME dans le cadre du « Plan de Prévention Séisme pour le Grand Nord d'Haïti » géré par le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) et financé par les Fonds pour la Reconstruction d'Haïti (FHR), Groupe de développement des Nations Unies (GDNU). Cette étude couvre la zone urbaine et périurbaine de Fort-Liberté sur environ 17.5 km<sup>2</sup>.

Cette version allégée s'adresse à tous ceux qui veulent, d'une part, se faire une idée rapide du contenu et des résultats de l'étude de microzonage réalisée sur Fort-Liberté et, d'autre part, prendre connaissance des principaux aléas qui peuvent affecter leurs zones résidentielles en cas de séismes majeurs dans le futur. Aux professionnels de la construction, aux Bureaux d'études spécialisées et aux aménageurs qui souhaitent obtenir beaucoup plus de détails techniques sur cette étude, nous soulignons à leur attention que le rapport final du projet comprend :

1. Un rapport de synthèse accompagné des cartes suivantes à l'échelle 1/25 000<sup>e</sup> pour l'ensemble de la zone d'étude et au 1/10 000<sup>e</sup> pour un zoom sur le centre-ville de Fort-Liberté :

- Planche F-1 : Carte des faciès lithologiques
- Planche F-2A : Carte des zones de réponse sismique homogène - Classes de sols spécifiques
- Planche F-2B : Carte des zones de réponse sismique homogène - Classes de sols du code de construction IBC
- Planche F-3 : Carte d'aléa liquéfaction

Ce rapport de synthèse et les cartes sont disponibles et téléchargeables sur les sites internet suivants :

[www.mtptc.gouv.ht](http://www.mtptc.gouv.ht) ; [www.lnbtp.gouv.ht](http://www.lnbtp.gouv.ht) ; [www.bme.gouv.ht](http://www.bme.gouv.ht)

2. Un rapport géologique

3. Un rapport sur les effets de site et la liquéfaction

4. Deux Annexes concernant les mesures géophysiques et géotechniques.

**N.B.** En raison de la configuration topographique de la zone de Fort-Liberté qui ne présente pas de fortes pentes sur des dénivelés importants, les phénomènes d'effet de site topographique et de mouvements de terrain sont supposés négligeables dans ce contexte et ne sont pas pris en compte dans cette étude.

**Pour toutes informations, contactez le LNBTP à Delmas 33, Rue Toussaint Louverture # 27, Port-au-Prince, Haïti**



## MICROZONAGE SISMIQUE DE FORT-LIBERTÉ

### INTRODUCTION

#### Contexte de l'étude

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

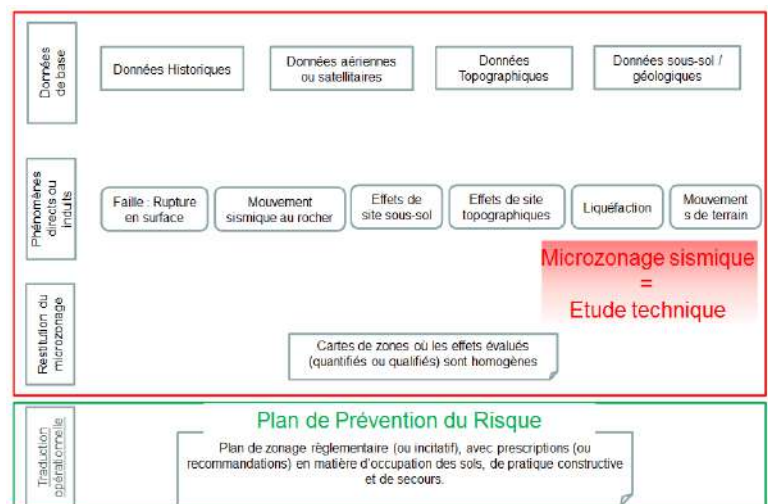
Le constat d'accroissement de la vulnérabilité en Haïti, entre autres liée à l'augmentation de la démographie et donc de l'urbanisation, a nécessité la mise en place d'un programme national et régional de réduction des pertes et dommages pouvant résulter de tremblements de terre futurs. Pour cela, la connaissance des terrains et de leur comportement en cas de séisme est un préalable indispensable. Le microzonage sismique répond à ce besoin en déterminant une catégorisation des sites en fonction de leur niveau de danger et en identifiant les zones où des effets de site importants sont susceptibles de survenir.

Les villes côtières du nord du pays font face à un risque sismique élevé car elles sont situées le long du système de failles actives dite « Faille Septentrionale », responsable du séisme de magnitude 8 de 1842. Ce séisme, accompagné d'un tsunami, est estimé avoir causé la mort de près de 50% de la population de Cap-Haïtien de l'époque et a dévasté les villes de Port-de-Paix et de Fort Liberté.

#### A quoi sert le microzonage sismique ?

Le microzonage sismique est un outil de **connaissance de l'aléa à l'échelle d'une commune ou d'une agglomération urbaine**. Dans les actions de réduction du risque, le microzonage sismique est à la fois : a) un outil de **prévention** pour orienter l'urbanisation et réduire la vulnérabilité ; b) un outil de **prévision** dans la mesure où il cible les zones les plus dangereuses, c'est en cela un outil utile pour la planification des secours ; c) un outil d'**information** et de sensibilisation des populations sur les risques.

Plus particulièrement, le microzonage sismique permet : 1) la fourniture de paramètres techniques de mouvements du sol pour les bureaux d'étude et maîtres d'ouvrage ; 2) une aide à la mise en œuvre des règles parasismiques ; 3) la fourniture de données de base pour la réalisation de Plans de Prévention des Risques (PPR) et de Scénarios de Risque sismique ; 4) de définir un cadre de réflexion pour l'aménagement urbain ; 5) une utilisation en support de communication et de sensibilisation pour l'information préventive.



#### Méthodologie de réalisation d'un microzonage sismique

## A qui s'adresse le microzonage sismique ?

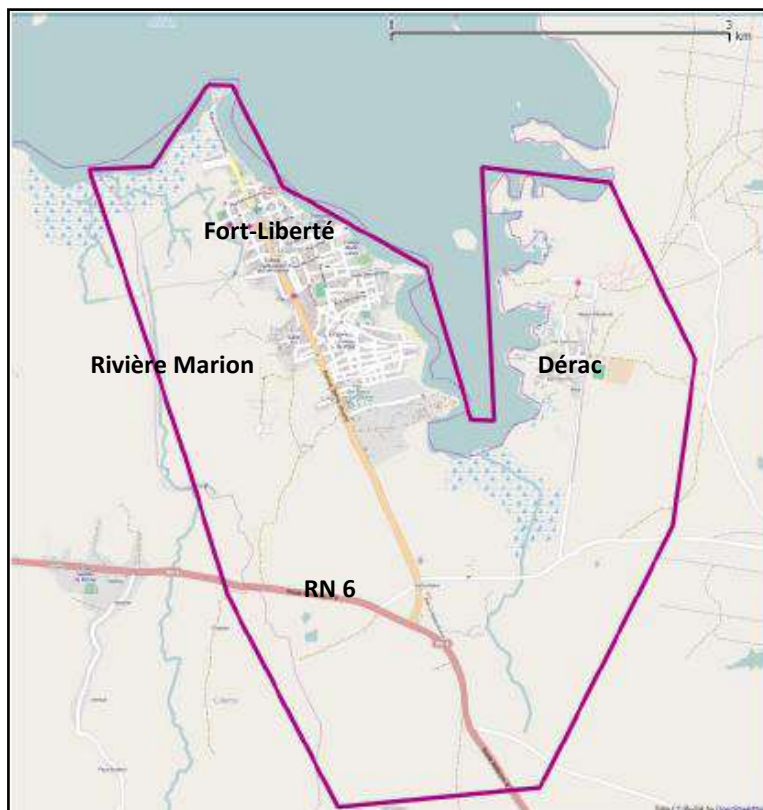
Destiné aux décideurs, aux aménageurs, aux constructeurs, aux ingénieurs structure, aux architectes mais aussi au public, le microzonage sismique a un caractère opérationnel, très appliqué, utilisable aussi bien pour la reconstruction de zones détruites par un séisme que pour la mise en place d'une politique préventive d'aménagement du territoire, prenant en compte les risques naturels.

### Description de la zone couverte par le projet

Le microzonage sismique de Fort-Liberté s'étend sur environ 17.5 km<sup>2</sup> de superficie. Il couvre un secteur compris entre l'ancien Fort à la Nationale # 6 au Sud et de la rivière Marion à l'Ouest jusqu'à la localité de Dérac à l'Est.

### Les exécutants du projet

L'étude du microzonage sismique de Fort-Liberté a été réalisée en partenariat entre le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) de la France, le Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) et le Bureau des Mines et de l'Energie (BME), dans les cadres du contrat de recherche pour le Ministère des Travaux Publics, Transports et Communication (MTPTC) et du « Plan de Prévention Séisme pour le Grand Nord d'Haïti » mis en place à partir de Juillet 2011 par le Ministère de l'Intérieur et des Collectivités Territoriales (MICT). Ce projet, HAI/11/146, est géré par le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) et financé par les Fonds pour la Reconstruction d'Haïti (FHR), Groupe de développement des Nations Unies (GDNU). Il a bénéficié de la collaboration du Centre National d'Information Géo-Spatiale (CNIGS).



Limites de la zone d'étude de Fort-Liberté





## MICROZONAGE SISMIQUE DE FORT-LIBERTÉ

### FORMATIONS GÉOLOGIQUES

De façon générale, les microzonages doivent permettre de mieux prendre en compte le risque sismique dans la politique d'aménagement des villes. L'étude géologique des terrains constitue une des premières étapes nécessaires à l'élaboration du microzonage. Il s'agit de décrire la nature et l'épaisseur des formations superficielles ainsi que la nature du fond rocheux. L'étude géologique doit aussi préciser la géométrie des terrains y compris la présence de failles potentiellement actives. La cartographie des formations géologiques constitue une donnée d'entrée nécessaire à l'identification des différentes zones sismiques susceptibles de produire des réponses de sols distinctes. Dans le cadre du projet de microzonage sismique, la zone urbaine et périurbaine de Fort-Liberté a fait l'objet d'une cartographie géologique à l'échelle 1/25 000.

#### Aperçu topographique et géologique

Du point de vue topographique (Figure 1), la ville de Fort-Liberté est implantée au fond d'une baie presque fermée, la baie de Fort-Liberté, correspondant à une profonde échancrure du plateau récifal quaternaire. C'est une zone à topographie entièrement tabulaire (plate) située à moins de 10-15 m au-dessus du niveau marin actuel. A l'Ouest de Fort-Liberté coule la rivière Marion qui se jette dans la baie.

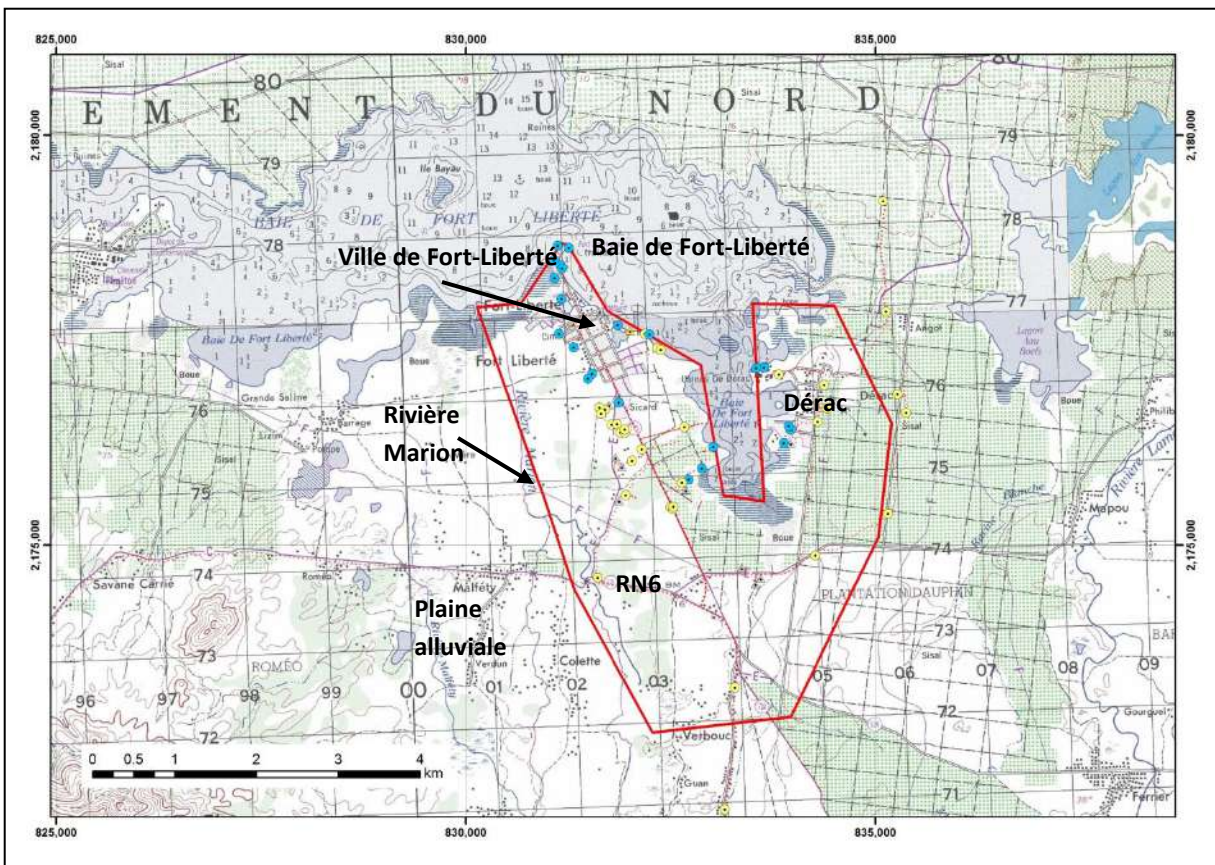
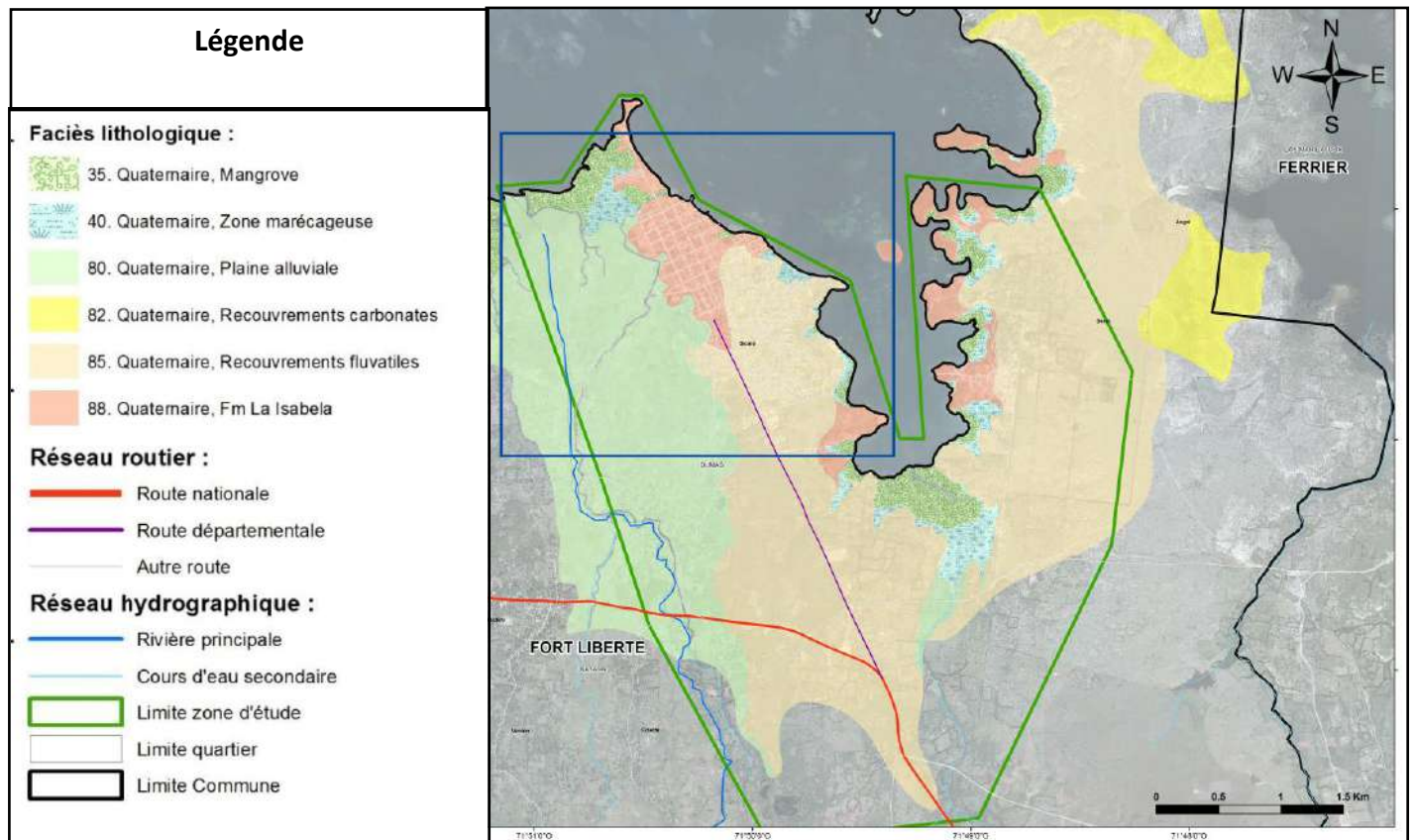


Figure 1. Cadre topographique de la zone urbaine et périurbaine de Fort-Liberté



**Figure 2. Carte des formations géologiques de surface**

Du point de vue géologique (Figure 2), l'environnement est simplement composé de deux ensembles superposés et sub-horizontaux :

- a) à la base, les marno-calcaires (code 88) constitués de marnes sableuses et de calcaires argileux, très riches en coquilles entières et/ou fragmentées; ces dépôts sont compacts mais assez tendres et présentent localement des encroûtements, indurés et discontinus, de type caliche.
- b) au sommet, des recouvrements fluviaux (code 85) constitués de sables, graviers et limons d'origine fluviale. Ils surmontent les marno-calcaires, et sont particulièrement bien visibles dans les talus, de part et d'autre de la route d'accès à Fort-Liberté. Dans le paysage, ils occasionnent une morphologie en « boîte à œufs », et sont colonisés par des épiphytes (mimosas, sisal, cactus).

A cela s'ajoutent différents faciès littoraux dont l'extension est très limitée : limons de mangroves et de zones marécageuses (codes 35 et 40). Les dépôts de la plaine alluviale (code 80) correspondent à des sédiments fins (limons riches en matière organique) entraînés par la rivière Marion.

Ces différents faciès sont attribués au Quaternaire qui correspond à la dernière période de l'histoire de la Terre que l'on fait débuter de 1.8 millions d'années jusqu'à l'époque actuelle.

Aucune faille n'a été relevée. La Faille Septentrionale est située en mer, plus au Nord ; son tracé correspond certainement à l'escarpement rectiligne de la côte, à 5-6 km au Nord de Fort-Liberté.



## MICROZONAGE SISMIQUE DE FORT-LIBERTÉ

### ALÉA SISMIQUE D'HAÏTI : ALÉA RÉGIONAL

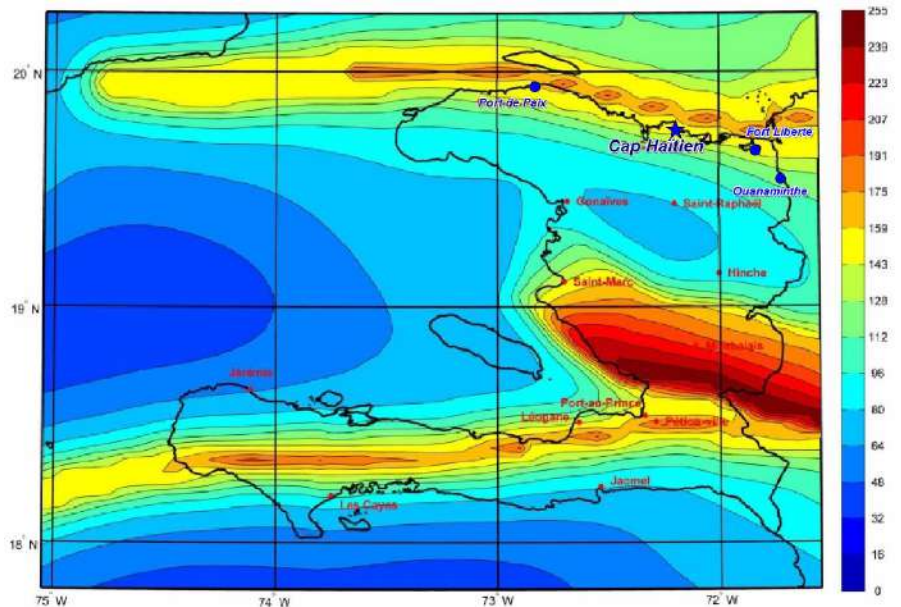
L'aléa sismique indique la probabilité d'une action sismique prenant en compte la contribution des tremblements de terre possibles (de magnitude ou intensité différentes) susceptibles d'affecter un site ou une zone donnée pour une période de temps donnée. L'**aléa régional** considère un sol rocheux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

Le microzonage sismique procède à l'évaluation et à la cartographie de l'**aléa local** qui prend en compte l'influence du sol sur les effets locaux des séismes. Cet aspect sera abordé dans les fiches # 4, 5, 6 et 7.

#### Evaluation de l'aléa régional

L'aléa sismique d'Haïti a été réévalué en 2010 par l'USGS, United States Geological Survey (Frankel et al., 2010) selon une méthodologie d'évaluation probabiliste de l'aléa sismique. Les cartes produites correspondent à l'accélération maximale du sol (PGA), l'accélération spectrale à 0,2 sec. (SS pour courte période), l'accélération spectrale à 1,0 sec. (S1 pour longue période), avec une probabilité de dépassement de 2% en 50 ans (période de retour 2475 ans).

Cette évaluation d'aléa est utilisée comme référence d'aléa régional pour le code de construction CNBH 2012 d'Haïti. Pour le présent microzonage sismique, l'aléa régional est basé sur les cartes de Frankel et al. (2010) reprises pour le code CNBH.



**Figure 1. Aléa régional pour la période spectrale de 0.2s (accélération en %) et la période de retour 2475 ans.**

Sur la Figure 1, les 4 villes du Nord d'Haïti concernées par le programme de microzonage sont indiquées en bleu. La carte d'aléa sismique représentée correspond à l'accélération spectrale à 0.2s pour une période de retour 2475 ans.

L'aléa régional pour Cap Haïtien, Fort Liberté et Port-de-Paix est fort du fait de la proximité de la faille septentrionale qui passe en mer à quelques kilomètres du littoral. Il est inférieur de 20% environ à Ouanaminthe car la ville est plus éloignée de la faille septentrionale (cf. Figure 1).

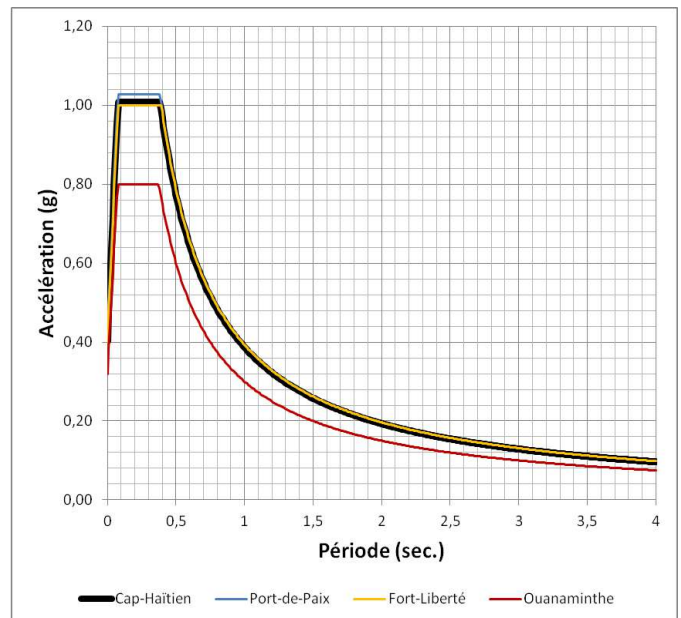
Au Cap Haïtien, du fait de la proximité de la faille, l'aléa n'est pas uniforme sur l'ensemble de la zone d'étude et devrait diminuer lorsqu'on s'éloigne vers le Sud. Nous avons estimé cette variation à 6% entre le Nord et le Sud de la zone d'étude. Nous considérons cette variation négligeable et conservons un aléa régional uniforme sur toute la zone concernée par le microzonage.

## Spectres de référence au rocher pour les 4 villes du Grand Nord

Les spectres de réponse élastique au rocher (sol B, selon la classification NEHRP) sont calculés selon le code ASCE-7-05 préconisé par le code IBC 2009, et par extension par le CNBH. Ces spectres et les paramètres associés sont représentés sur la Figure 2 et le Tableau 1. Les spectres de référence sont pratiquement identiques pour Cap-Haïtien, Port-de-Paix et Saint-Louis du Nord, plus faible pour Ouanaminthe.

Le spectre de référence au rocher de Cap-Haïtien est similaire à celui pris en compte pour la commune de Port-au-Prince (avec un PGA au rocher de 0.42 g pour Port-au-Prince contre 0.39 g pour Cap-Haïtien).

Communes	$S_{DS}$ (g)	$S_{D1}$ (g)	PGA rocher (g)	$T_0$ (s)	$T_s$ (s)
Cap-Haïtien	1.01	0.39	0.40	0.08	0.38
Port-de-Paix	1.03	0.39	0.41	0.08	0.38
<b>Fort-Liberté</b>	<b>1.00</b>	<b>0.39</b>	<b>0.40</b>	<b>0.08</b>	<b>0.39</b>
Ouanaminthe	0.80	0.33	0.32	0.09	0.41



**Figure 2. Spectres de référence au rocher pour les quatre communes du Grand Nord**

**Tableau 1 : Paramètres associés aux spectres de référence au rocher**

La forme des spectres de réponse pour chaque classe de sol est calculée selon le même principe que pour le code ASCE-7-05 préconisé par l'IBC. Un spectre d'une classe de sol est construit à partir de deux paramètres SDS et SD1 calculés à partir, d'une part des paramètres SS et S1 calculés à partir des valeurs d'accélération aux périodes 0,2 sec. et 1,0 sec. de l'aléa au rocher (période de retour 2475 ans), et d'autre part de coefficients d'amplification  $F_a$  (pour SDS) et  $F_v$  (pour SD1). Ces coefficients quantifient l'amplification en accélération spectrale par rapport à un sol rocheux (classe B) pour les périodes 0,2 sec. ( $F_a$ ) et 1,0 sec. ( $F_v$ ). Les périodes du plateau  $T_0$  et  $T_s$  sont déduites de ces deux valeurs.



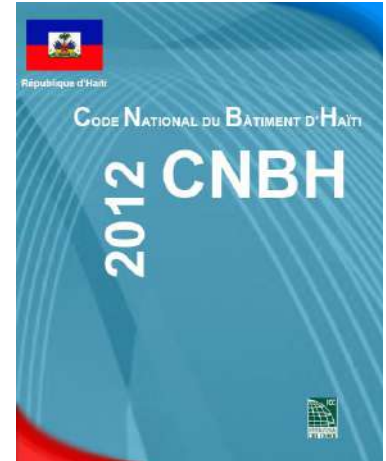
## MICROZONAGE SISMIQUE DE FORT-LIBERTÉ

### ZONAGE EN CLASSES DE SOL IBC (NEHRP)

#### Règles parasismiques en Haïti

Les règles parasismiques applicables en Haïti sont énoncées dans le Code National du Bâtiment d'Haïti (CNBH, 2012) édité par le MTPTC.

Les dispositions des codes de l'International Code Council (ICC) et en particulier celles de l'International Residential Code for One- and Two-Family Dwellings (IRC, 2009) et de l'International Building Code (IBC, 2009), sont reconnus comme les principaux codes de référence du CNBH. Les recommandations de l'IRC (2009) s'appliquent aux logements résidentiels pour une ou deux familles et ne dépassant pas trois niveaux. Les recommandations de l'IBC (2009) s'appliquent aux autres bâtiments.



#### Classification des sols

Pour l'IBC (2009), la réponse d'un site est établie de manière forfaitaire en fonction de la catégorie de sol selon la classification établie dans le NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program). Dans cette classification, le paramètre principal permettant de différencier les sols est basé sur la vitesse moyenne de propagation des ondes de cisaillement ( $V_{s30}$ ) dans les 30 premiers mètres (paramètre  $V_{s30}$ ). NSPT est le nombre de coups au Pénétromètre Standard SPT (Standard Penetration Test) ;  $c_u$  est la cohésion non drainée. Le Tableau ci-dessous résume cette classification.

Classes de sol	Description du profil stratigraphique	Paramètres		
		$V_{s30}$ (m/s)	$N_{SPT}$ (cps/30cm)	$c_u$ (kPa)
<b>A</b>	Rocher « dur »	>1500	-	-
<b>B</b>	Rocher	760-1500	-	-
<b>C</b>	Rocher « mou » ou sol ferme	360-760	> 50	> 250
<b>D</b>	Sol « mou »	180-360	15-50	70-250
<b>E</b>	Sol très « mou »	< 180	< 15	< 70

Classes de sol du Code IBC

#### Mesures géophysiques MASW

Pour déterminer l'influence du contraste de vitesse dans un sol, il est nécessaire de caractériser la succession des formations présentes dans le sous-sol. Ceci a été fait à partir de la méthode de mesures géophysiques MASW (Multi Channel Analysis of Surface Wave). Celles-ci fournissent deux types d'information : a) la vitesse moyenne des ondes S sur les 30 premiers mètres qui donne la qualification du type de sol selon les codes de construction et b) le profil de vitesse avec la profondeur ; si le contraste observé est important, l'effet de site est significatif.

Dans le cadre du projet de Microzonage sismique de Fort-Liberté, 16 profils MASW ont été effectués sur 16 sites. Chaque fois que la configuration du terrain le permettait, des mesures MASW ont été effectuées à proximité des sites de forages géotechniques, facilitant ainsi les interprétations croisées pour l'établissement des colonnes de sol.

## Description des classes de sol IBC de la zone urbaine et périurbaine de Fort-Liberté

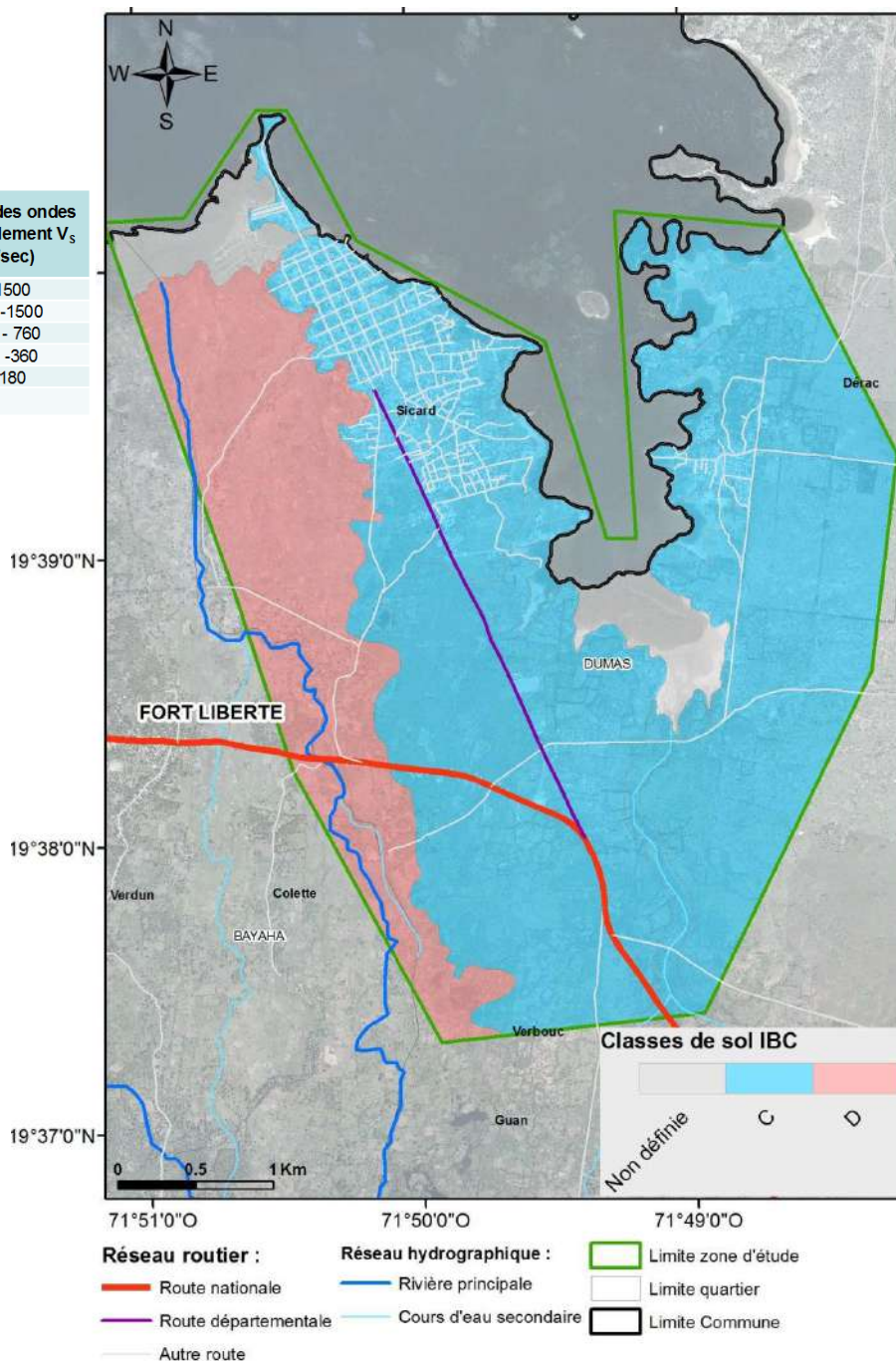
Le rocher affleurant n'étant pas présent sur la zone de Fort-Liberté, le zonage en classes de sol IBC (NEHRP) est défini en C et D.

Classe de site	Description générale	Vitesse des ondes de cisaillement $V_s$ (m/sec)
A	Rocher dur	> 1500
B	Rocher	760 - 1500
C	Sol très denses et rocher meuble	360 - 760
D	Sol raide	180 - 360
E	Sol d'argile meuble	< 180
F	Sol instable	

### Classes de sol du Code IBC

- **La classe C (en bleu)** pour laquelle les vitesses des ondes de cisaillement sont comprises entre 360 et 760 m/sec, couvre les formations géologiques constituées de marno-calcaires, de recouvrements fluviaux et des formations carbonatées, à l'exception des zones marécageuses et de mangroves.

- **La classe D (en rose)**, décrite comme un sol raide avec une vitesse d'ondes variant entre 180 et 360 m/s, couvre la plaine alluviale correspondant aux sédiments fins organiques entraînés par la rivière Marion. Cette classe est susceptible de provoquer des effets de site lithologiques importants lors de fortes secousses sismiques.



### Zonage en classes de sol IBC (NEHRP) pour l'agglomération de Fort-Liberté





## MICROZONAGE SISMIQUE DE FORT-LIBERTÉ

### ZONAGE EN CLASSES DE SOL DES EFFETS DE SITE LITHOLOGIQUES

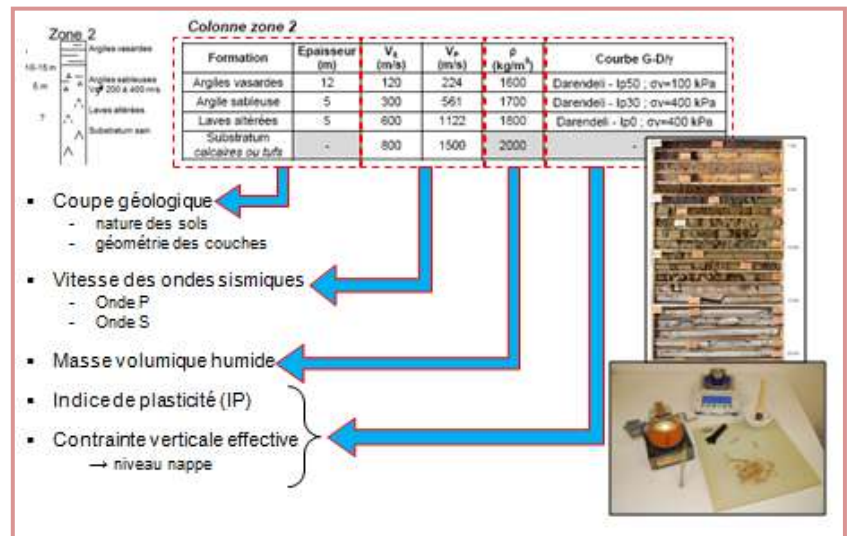
#### Objectif du zonage en classes de sol spécifiques

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

a) analyse croisée des informations géologiques, géophysiques et géotechniques ; les informations géophysiques se réfèrent aux mesures MASW qui déterminent le contraste d'impédance entre les couches de sol et aux mesures H/V qui permettent de déterminer la fréquence de résonance d'un site;

b) identification des zones homogènes ;

c) définition d'une ou plusieurs colonnes de sol représentatives associées à chaque zone ; ces colonnes décrivent la nature et l'épaisseur de la couverture superficielle, et la nature du substratum sismique lorsqu'il a été atteint. Le substratum sismique est un milieu rocheux qui se distingue en principe par son faible niveau d'altération ou de fracturation ; il constitue le milieu rocheux de référence. Il est généralement admis que le substratum sismique présente une vitesse VS au minimum égale à 800 m/s, ce qui correspond à la classe B de la classification NEHRP;



Paramètres nécessaires (géologiques, géophysiques et géotechniques) à la définition des colonnes de sol

d) calcul des réponses sismiques associées à chaque zone ;

e) regroupement de zones pour obtenir le zonage sismique final.

#### Classes de sol et spectres associés

Le zonage sismique de Fort-Liberté est défini en 3 classes de sol (Figures 1 et 2, Tableaux 1, 2 et 3) :

- **La classe 1** correspond à un sol plutôt ferme et rassemble environ les 2/3 de la zone d'étude. Elle contient toutes les zones urbanisées ou en cours d'urbanisation actuellement. Les effets de site attendus sont moyens et équivalents à courte période (à 0.2s) et à moyenne période (à 1.0s) : Fa et Fv ~1.4

- **La classe 2** (alluvions de la rivière Canot) Le spectre de réponse retenu présente une amplification forte à courte période (Fa = 2.2) et à peu près équivalente à celle de la classe 1 à 1.0s (Fv = 1.5). Le comportement non-linéaire probable des sols de surface de cette classe n'a pas pu être modélisé ce qui peut expliquer la valeur particulièrement élevée du coefficient Fa. A noter que les terrains concernés ne représentent qu'une faible superficie (~10 % de la zone d'étude) et correspondent à des sols fréquemment inondables impropres à la construction.

- La **classe 3** correspond à la plaine alluviale qui s'étend à l'Ouest de la ville et qui entoure la rivière Marion. Le spectre de réponse retenu présente une amplification très forte à 1.0s ( $F_v = 2.35$ ) par rapport à la forme spectrale définie au rocher.

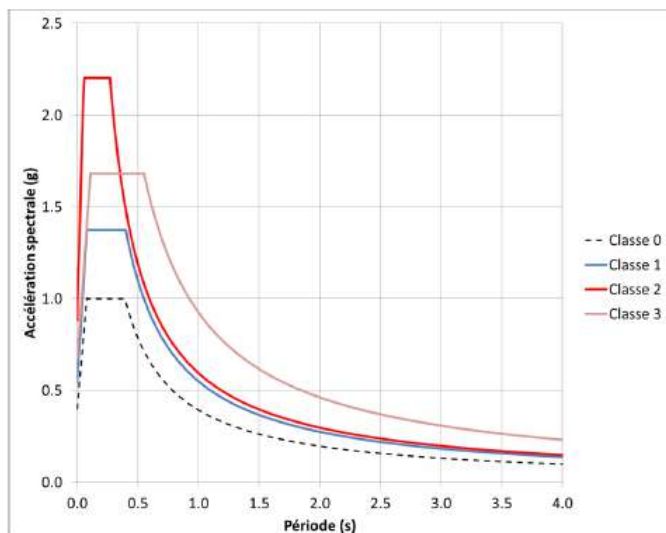


Figure 2. Spectres de réponse en accélération des 3 classes de sols délimitées sur l'agglomération de Fort-Liberté

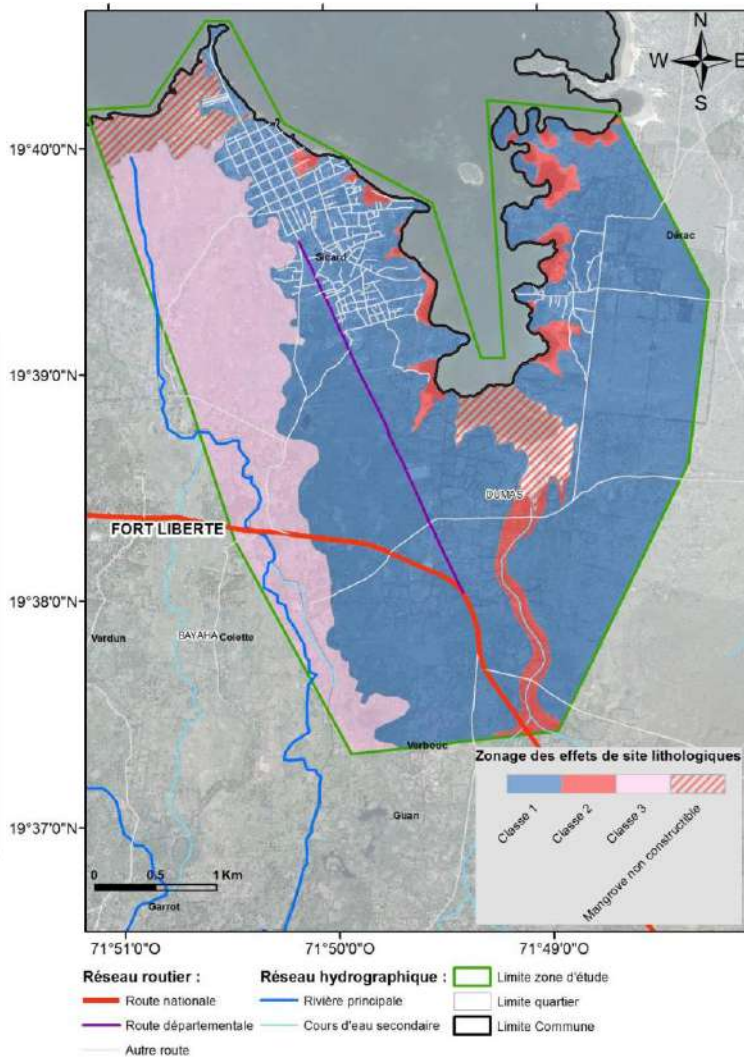


Figure 1. Zonage en classes d'effets de site lithologiques

Classe de sol	$S_{D5}$ (g)	$S_{D1}$ (g)	PGA (g)	$T_0$ (sec.)	$T_s$ (sec.)	$F_a$	$F_v$
classe 0 (rocher, non présent en surface)	1.01	0.39	0.40	0.08	0.39	1.00	1.00
classe 1	1.37	0.55	0.55	0.08	0.40	1.37	1.40
classe 2	2.20	0.59	0.88	0.05	0.27	2.20	1.51
Classe 3	1.68	0.92	0.67	0.11	0.55	1.68	2.35

Tableau 1. Paramètres associés aux spectres de réponse spécifiques des classes de sol

Classe de sol Fort-Liberté	Effets de site sur bâtiment rigide ou de faible hauteur	Effets de site sur bâtiment souple ou de grande hauteur
classe 1	moyen à fort	moyen à fort
classe 2	fort	moyen à fort
classe 3	moyen à fort	fort

Tableau 2. Information qualitative sur les effets de site attendus pour chaque classe de sol

Classe de sol (Fort-Liberté)	VS30 (m/s)	Portance du sol de fondation
classe 1	367	Moyenne
classe 2	360	Moyenne
classe 3	240	Faible à moyenne

Tableau 3. Information qualitative sur la portance des classes de sol de Fort-Liberté



## MICROZONAGE SISMIQUE DE FORT-LIBERTÉ

### COMPARAISON ENTRE ZONAGES EN CLASSES DE SOLS IBC ET DES EFFETS DE SITE LITHOLOGIQUES

Une comparaison des spectres spécifiques au microzonage (Fiche 5) avec les spectres du zonage en classes de sols IBC (2009) (Fiche 4), a été menée dans le cadre de cette étude. Pour chacune des 3 classes d'effets de site lithologiques, il a été associé une ou plusieurs classes de sol NEHRP (IBC, 2009) en fonction des valeurs de  $V_{S30}$  obtenues. Cette comparaison a montré que le zonage en classes de sol NEHRP est simplificateur dans le sens où il regroupe les classes de sol spécifiques 1, 2 de Fort-Liberté en une seule classe de sol forfaitaire C. Basé uniquement sur des critères de valeurs de vitesses des ondes de cisaillement dans les trente premiers mètres ( $V_{S30}$ ), il ne permet pas de distinguer les différences de comportement des sols (amplifications à courte période et/ou à longue période) du zonage en classes de sol spécifiques qui prend en compte des colonnes de sols plus précises et des épaisseurs plus importantes de terrains meubles.

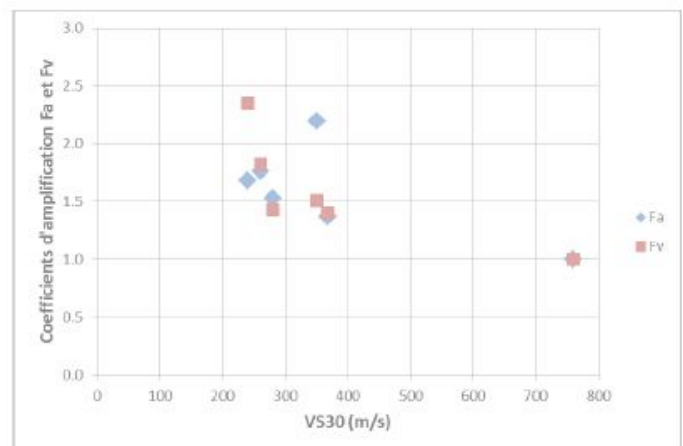
Comme il est indiqué dans le Tableau 1, les coefficients d'amplifications  $F_a$  et  $F_v$  des spectres NEHRP ne correspondent pas à ceux des classes de sol spécifiques. En particulier, les spectres forfaitaires des classes C et D ne permettent pas la prise en compte des fortes accélérations obtenues sur les courtes périodes ( $<0.25$  s) pour les classes de sol 1, 2, 3 de Fort-Liberté.

	$V_{S30}$ (m/s) moyenne	Type NEHRP	$F_a$ NEHRP	$F_v$ NEHRP	$F_a$ Cette étude	$F_v$ Cette étude
Classe 0	> 760	B	1.0	1.0	1.00	1.00
Classe 1	340-400	C	1.0	1.3	1.37	1.40
Classe 2	350	C	1.0	1.3	2.20	1.51
Classe 3	225	D	1.0	1.5	1.68	2.35

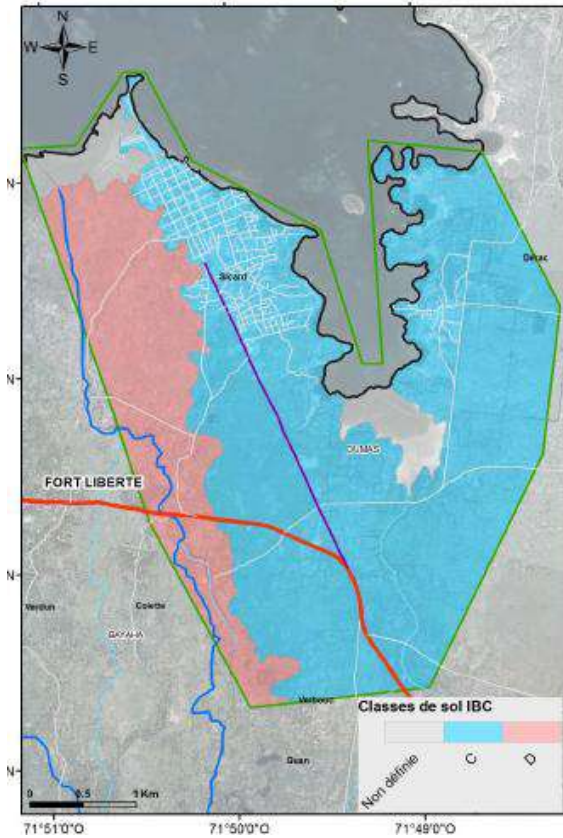
**Tableau 1. Correspondance des classes de sols de Fort-Liberté avec les classes NEHRP sur la base des vitesses  $V_{S30}$ . Les coefficients d'amplifications  $F_a$  et  $F_v$  ne sont pas équivalents**

La Figure 1 montre comment évoluent les coefficients d'amplifications  $F_a$  et  $F_v$  en fonction de la valeur moyenne de  $V_{S30}$  de chaque classe de sol pour Fort-Liberté. Dans la classification NEHRP et pour le niveau élevé d'aléa régional de la zone,  $F_a$  reste constant et égal à 1 pour les  $V_{S30}$  entre 180 et 1000 m/s correspondant aux classes de sol B, C, D.  $F_v$  augmente lorsque la valeur de  $V_{S30}$  diminue.

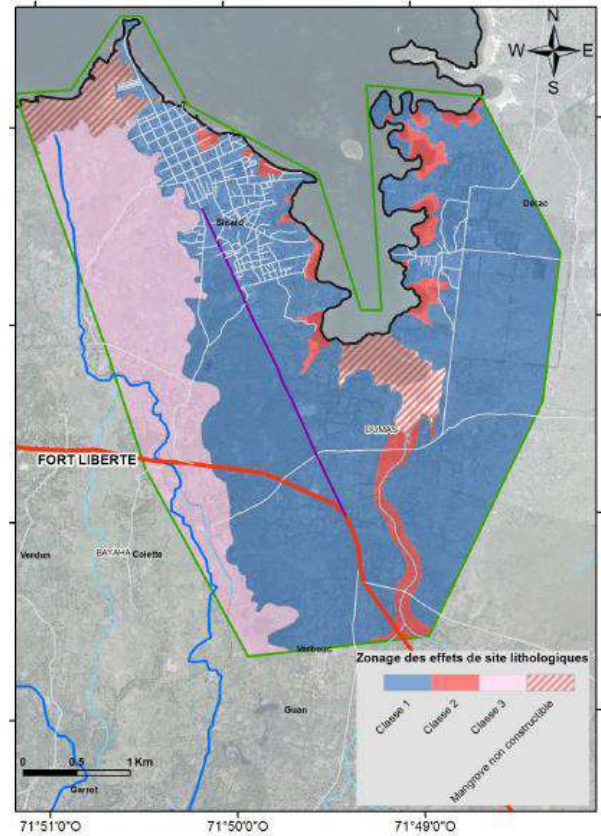
Pour les classes de sols des microzonages, la tendance d'évolution de  $F_v$  avec  $V_{S30}$  est globalement respectée. Par contre, il n'y a aucune corrélation entre  $F_a$  et  $V_{S30}$ . Ce paramètre n'est pas un bon indicateur pour les effets de site hautes fréquences identifiées dans l'étude de microzonage.



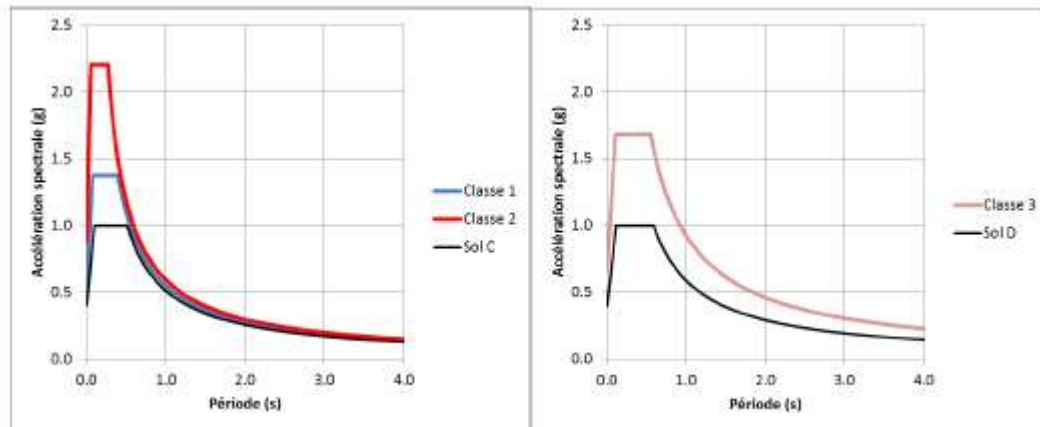
**Figure 1. Relation entre coefficients d'amplification  $F_a$ ,  $F_v$  de chaque classe de sol et les valeurs moyennes de  $V_{S30}$  de chaque classe**



Zonage en classes de sol IBC



Zonage en classes de sol spécifiques d'effets de site lithologiques



Comparaison entre spectres spécifiques du microzonage sismique et spectres IBC

- Pour les classes 1 et 2, le spectre spécifique est équivalent au spectre IBC sol C aux périodes supérieures à 0,5 s.
- Pour la classe 3, le spectre spécifique est plus pénalisant que la classe D IBC pour les périodes supérieures à 0,5 s.
- Pour les 3 classes, le spectre spécifique est systématiquement plus pénalisant sur les courtes périodes (inférieures à 0,4-0,5 s) par rapport aux spectres IBC. Concrètement, cela implique que les spectres spécifiques sont plus pénalisants que les spectres de la réglementation nationale pour les bâtiments à courte période propre (bâtiments bas ou de hauteur intermédiaire, c'est-à-dire jusqu'à 4-5 étages-période inférieure à 0,4 s).

**En conclusion, le zonage en classes de sol NEHRP, basé uniquement sur des critères de valeurs de vitesses des ondes de cisaillement dans les trente premiers mètres ( $V_{s30}$ ), est moins fin que le zonage en 3 classes de sol spécifiques.**



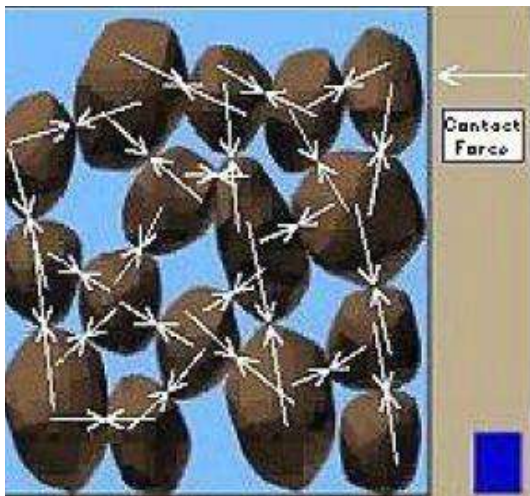
## MICROZONAGE SISMIQUE DE FORT-LIBERTÉ

### LIQUÉFACTION DES SOLS

#### Le phénomène et les effets attendus

La liquéfaction est une perte de résistance au cisaillement du sol créée par une quasi annulation de la contrainte effective par augmentation de la pression interstitielle. Celle-ci est entre autre causée par les sollicitations cycliques générées par un séisme. Les retours d'expériences montrent que la liquéfaction concerne uniquement les sols situés à moins de 20 m de profondeur et qu'elle se produit le plus souvent sur des sols non cohérents lâches et saturés, tels que, par exemple, des alluvions récentes ou des remblais hydrauliques non compactés.

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



Sol à l'état initial – Représentation des forces de contact entre les grains



Sol soumis à une sollicitation sismique – Augmentation de la pression interstitielle, diminution des forces de contact et liquéfaction



Effet de la liquéfaction – Glissement latéral observé sur le port de Port-au-Prince (Haïti) suite au séisme du 12 janvier 2010



Effet de la liquéfaction à Nigata au Japon suite à un séisme de magnitude 7.5, le 16 juin 1964



Effet de la liquéfaction – Exemple de poinçonnement du sol de fondation à Léogâne (Haïti), séisme du 12 janvier 2010 (M = 7.0)

## Cartographie de l'aléa liquéfaction de l'agglomération de Fort-Liberté

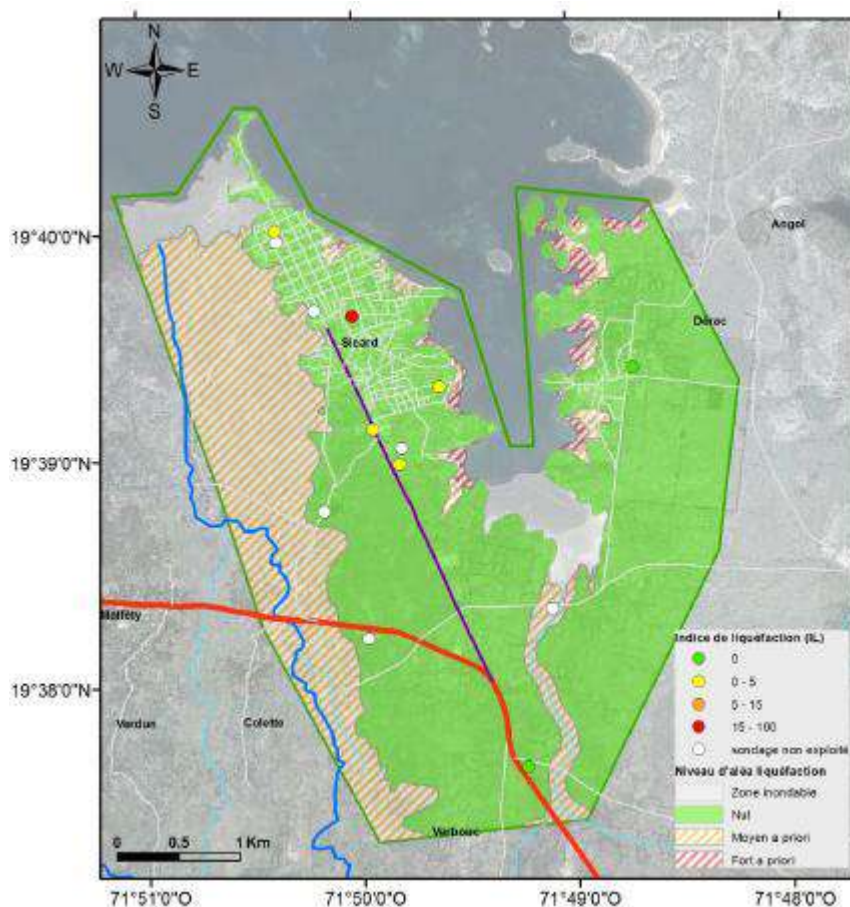
La carte d'aléa liquéfaction a été réalisée sur la base d'études géotechniques ponctuelles et des données géologiques (Fiche 2). Les niveaux d'aléa sont classés nul (vert), moyen à priori (hachuré orange) et fort à priori (hachuré rouge). Pour un bâtiment d'importance moyenne (quelques étages), on peut associer, en première approche, l'aléa fort à la ruine probable d'un tel bâtiment, l'aléa moyen à des désordres sérieux, l'aléa faible à des désordres à priori réparables et l'aléa nul à l'absence attendu de tout désordre.

L'ensemble des terrains « hauts » (formations marno-calcaires et recouvrements fluviaux) est affecté d'un aléa nul.

Seuls les terrains « bas » (plaines alluviales des rivières Canot et Marion, marécages et mangroves) sont affectés d'un aléa à priori moyen à fort (« à priori » car les données y sont rares). Il conviendrait de vérifier ces niveaux d'aléa par la réalisation de sondages complémentaires. Pour rappel, les zones d'aléa fort et moyen représentent 28 % du secteur d'étude et sont actuellement très peu aménagées.

Les valeurs d'indice de liquéfaction (IL) varient de 0 à 100. Il leur est associé, d'après l'AFPS 1993, les niveaux de probabilité, d'intensité et d'aléa suivants :

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



Cartographie de l'aléa liquéfaction. En hachuré rouge, les zones à aléa fort et en vert les zones à aléa nul. Les points où l'indice de liquéfaction (IL) a pu être calculé sont représentés par des cercles de couleur



## MICROZONAGE SISMIQUE DE FORT-LIBERTÉ

### CONCLUSION - RECOMMANDATIONS

**Avertissements.** Les cartes ont été réalisées à une échelle donnée et correspondent à un état de connaissance donné. Il convient donc d'être prudent lors d'analyses à une échelle plus précise (celle d'une parcelle par exemple), particulièrement si on est à proximité d'une limite de zone. **Le microzonage sismique ne dispense pas la nécessité de réaliser des études géotechniques ponctuelles.**

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

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

**Conclusions.** Les principaux résultats de l'étude sont fournis sous forme de cartes à l'échelle 1/25 000 et des zooms sur le centre-ville à l'échelle 1/10 000 dont la lecture permet de connaître, en tout point de l'agglomération de Fort-Liberté :

- la répartition des faciès géologiques (Fiche 2);*
- l'aléa sismique régional (Fiche 3);*
- le zonage en classes de sol suivant la classification IBC (NEHRP) (Fiche 4);*
- les zones de réponse sismique homogène par classes d'effets de site lithologiques (Fiche 5) ;*
- les zones susceptibles de liquéfaction (Fiche 7).*

L'étude de microzonage sismique de Fort-Liberté montre que dans ce contexte d'aléa sismique élevé, les effets attendus ne sont pas identiques suivant les secteurs :

- Les 2/3 de la zone d'étude, recouvrant la totalité de la zone urbaine et en cours d'urbanisation, se situent sur des sols de caractéristiques mécaniques moyennes avec des effets de site attendus relativement modérés (classe 1 du zonage d'effet de site). L'aléa liquéfaction y est faible à nul. Ce type de sol est le plus favorable à l'aménagement et à la construction urbaine.

- La plaine alluviale, à l'Ouest de la zone d'étude et entourant la rivière Marion (classe 3 du zonage d'effet de site) correspond à des alluvions avec des caractéristiques mécaniques plutôt faibles. L'aléa liquéfaction serait à priori moyen. Des investigations complémentaires sont nécessaires pour mieux caractériser le comportement de ce type de sol. Un avis géotechnique est recommandé pour définir le mode de fondation des constructions.

- Pour les alluvions des berges de la rivière Canot et les zones marécageuses de bords de lagune (classe 2 du zonage d'effet de site), l'amplification à courte période (0.2s) est très forte. L'aléa liquéfaction y est moyen à fort. A noter que les terrains concernés ne représentent qu'une faible superficie (~10 % de la zone d'étude) et correspondent à des sols fréquemment inondables impropres à la construction.

Dans un tel contexte d'aléa fort, la construction parasismique est une nécessité si on souhaite une réduction significative du risque sismique. En résumé, cette étude indique pour chaque secteur quel type de phénomène est à prendre en considération. Elle aide ainsi à adapter l'implantation des constructions et des infrastructures au contexte local dans le cadre d'une politique de prévention et de réglementation parasismique.

**Recommandations.** 1) Les investigations géologiques préliminaires effectuées au cours de cette étude n'ont pas mis en évidence d'accidents tectoniques notables visibles en surface sur les zones concernées. Néanmoins la tectonique régionale récente reste peu connue et devrait pouvoir être approfondie dans le cadre de travaux de recherche universitaire.

**Dans l'état actuel des connaissances, il n'y a pas de mesures particulières à prévoir pour l'aménagement et la construction en lien avec de possibles ruptures en surface de failles actives. La faille active majeure localement est la Faille Septentrionale qui passe à quelques kilomètres en mer au large de Cap-Haïtien.**

2) En ce qui a trait aux classes de sol, il est recommandé, dans certains cas, de privilégier le zonage en 3 classes de sol spécifiques réalisé à Fort-Liberté. En effet, le zonage en classes de sol NEHRP est moins fin que le zonage en 3 classes de sol spécifiques. Basé uniquement sur des critères de valeurs de vitesses des ondes de cisaillement dans les trente premiers mètres (VS30), le NEHRP ne permet pas de distinguer les différences de comportement des sols (amplifications à courte période et/ou à longue période) du zonage en classes de sol spécifiques qui prend en compte des colonnes de sols précisément décrites et des profondeurs souvent supérieures à 30 m. Rappelons qu'à Fort-Liberté, de fortes amplifications sont possibles pour la classe 2 sur les bâtiments rigides ou de faible hauteur, pour la classe 3 sur les bâtiments souples ou de grande hauteur.

3) Pour ce qui concerne les effets de site topographiques, ce phénomène peut produire des effets notables lorsque la pente dépasse 20° et que le dénivelé entre la base et le sommet de la butte ou du talus dépasse 20 m. Pour Fort-Liberté, la topographie est peu mouvementée et une telle configuration n'est pas présente sur la zone d'étude. **Il n'y a donc pas lieu de prendre des dispositions particulières vis-à-vis de ce phénomène.**

4) En ce qui a trait aux mouvements de terrain, les principales catégories sont les chutes de blocs, les glissements de terrain, les coulées de boue, les ravinements. Elles sont liées à la présence de pentes topographiques. Ces typologies sont peu probables à Fort-Liberté. Il reste néanmoins des possibilités d'érosions des berges sur les bords de rivières et de la lagune de Fort-Liberté. Ce phénomène n'a pas été pris en compte dans cette étude.

**L'ensemble de la zone est considérée comme présentant un aléa mouvement de terrain nul à faible (non cartographié) :** Les phénomènes redoutés étant de faible ampleur, **ces zones ne font pas l'objet de recommandation particulière.** Cependant, les règles de l'art en matière de terrassement et de construction devront absolument être respectées, notamment dans le but de ne pas aggraver le risque ailleurs et donc en tenant compte de l'environnement amont et aval du site d'implantation.

5) Il est recommandé de mettre en place des adaptations constructives individuelles ou collectives pour limiter les effets de la liquéfaction sur les constructions. L'ensemble des méthodes existantes sont classées en quatre groupes selon leur principe d'action : a) Substitution du sol liquéfiable 2) Amélioration du sol 3) Gestion de la nappe 4) Adaptation des fondations. Une étude spécifique approuvée par le LNBTP permettrait de proposer des solutions adaptées au contexte de l'agglomération de Fort-Liberté.



## Crédits

**Synthèse réalisée par :** Claude Prépetit, Coordonnateur national du Programme de microzonages sismiques - BME/LNBTP

### **Références des rapports utilisés :**

- ***Cartographie géologique des villes de Cap-Haïtien, Fort-Liberté et Ouanaminthe (République d'Haïti), BRGM/RP-61951-FR. Janvier 2013.***  
J. Monthel, A. Bialkowski, Ph. Jean, M. Jean-Baptiste
  
- ***Microzonage sismique de Fort-Liberté et Ouanaminthe (Haïti) : Rapport de synthèse, BRGM/RC - 64144-Fr. Novembre 2014***  
D. Bertil, A. Roullé, G. Noury  
avec la collaboration de J. Abad, R. Gilles, J. Jean-Philippe, B. Jeudy, C. Prépetit, K. Samyn, R. Sylvain
  
- ***Microzonage sismique de Fort-Liberté et Ouanaminthe (Haïti) : Effets de sites et Liquéfaction, BRGM/RC -64096-Fr. Novembre 2014***  
A. Roullé, G. Noury, D. Bertil  
avec la collaboration de J. Abad, R. Gilles, J. Jean-Philippe, B. Jeudy, C. Prépetit, K. Samyn, R. Sylvain