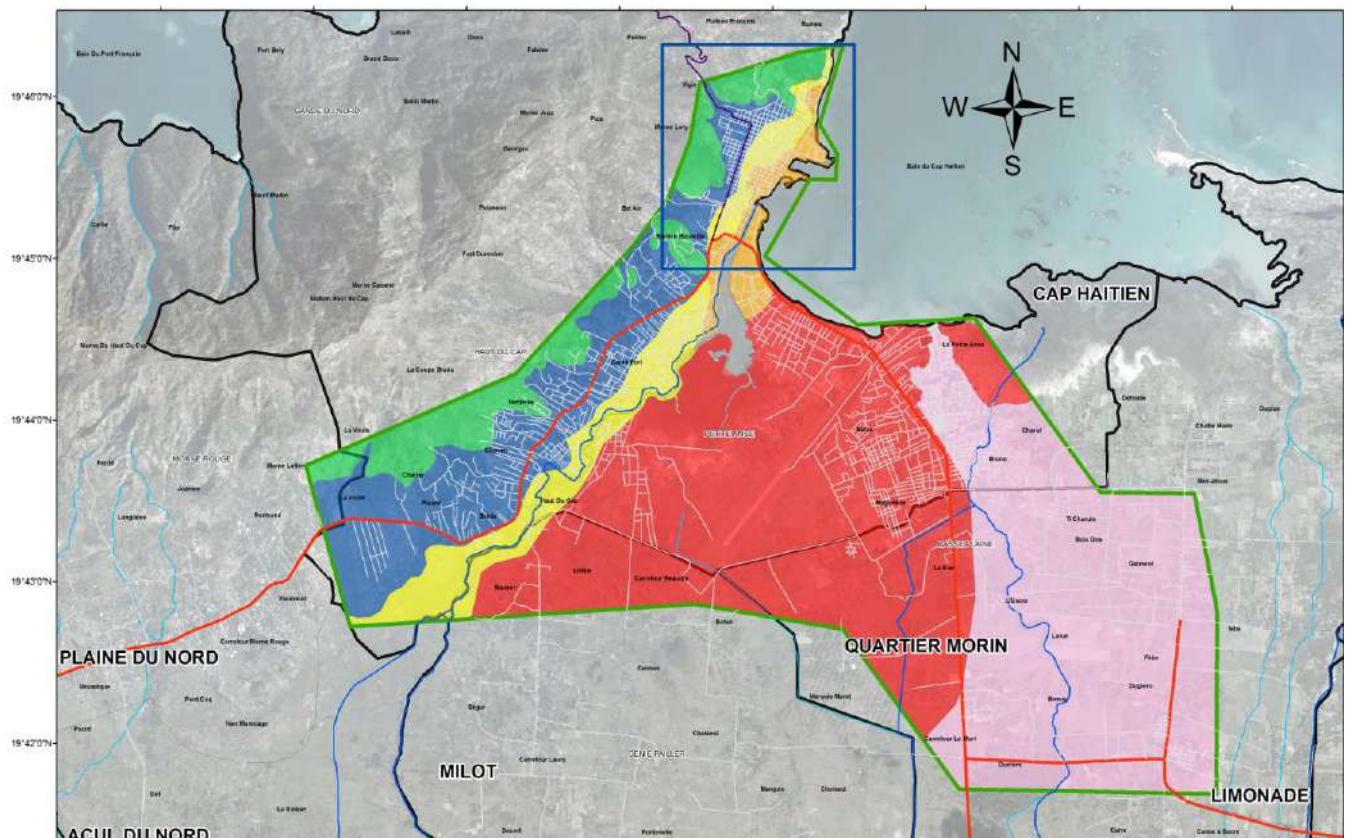




PLAN DE PRÉVENTION SÉISME GRAND NORD D'HAÏTI – HAI/11/146
Département du Nord

Le microzonage sismique de l'agglomération de Cap-Haïtien en 10 fiches

Mai 2014



MICROZONAGE SISMIQUE DE CAP-HAÏTIEN

NOTICE

« *Le microzonage sismique de l'agglomération de Cap-Haïtien en 10 fiches* » est une version allégée de l'étude réalisée de juillet 2012 à mai 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 Cap-Haïtien sur environ 40 km².

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 le Cap-Haïtien 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 (69 p.) accompagné des cartes suivantes à l'échelle 1/25 000^e pour l'ensemble de la zone d'étude et au 1/10 000^e pour un zoom sur le centre-ville de Cap-Haïtien :

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

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

www.mtptc.gouv.ht ; www.lnbtp.gouv.ht ; www.bme.gouv.ht

2. Un rapport géologique (36 p.)

3. Un rapport sur les mouvements de terrain (67 p.)

4. Un rapport sur les effets de site et la liquéfaction (133 p.)

5. Deux Annexes concernant les mesures géophysiques et géotechniques.

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



MICROZONAGE SISMIQUE DE CAP-HAÏTIEN

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.

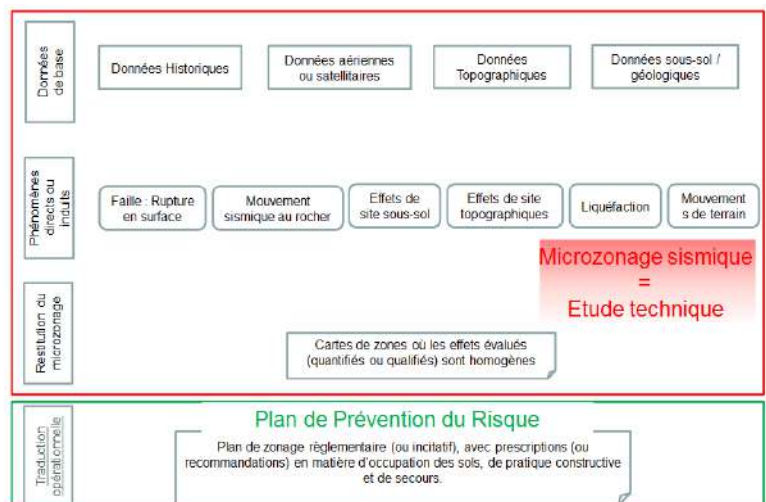
Le constat d'accroissement de la vulnérabilité en Haïti, entre autres liée à l'augmentation de la démographie et donc de l'urbanisation, a nécessité la mise en place d'un programme national et régional de réduction des pertes et dommages pouvant résulter de tremblements de terre futurs. Pour cela, la 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

Ce microzonage sismique couvre la zone urbaine et périurbaine de Cap-Haïtien sur environ 40 km².

La zone d'étude concerne principalement les communes de Cap-Haïtien et Quartier-Morin dans les quartiers suivants :

- Cap-Haïtien - section communale de Haut-du-Cap :
 - o Du centre-ville historique au Nord et le long de la RN1 jusqu'à la cité administrative de Vaudreuil au Sud.
- Cap-Haïtien – section communale de Petite-Anse :
 - o Le long de la RN6 de Shada au Nord à Balan au Sud
 - o De Cité Blue Hills à l'Ouest vers l'aéroport, Balan et jusqu'au village Notre Dame à l'Est.
- Quartier-Morin – section communale de Basse Plaine :
 - o Le long de la RN6 de Balan, à Carrefour-la-Mort jusqu'à Quartier-Morin Centre
 - o Au Nord de Quartier-Morin Centre le long de la route de Galman



Délimitation de la zone d'étude (en rouge)

Les exécutants du projet

L'étude du microzonage sismique de Cap-Haïtien 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 (GDMU). Il a bénéficié de la collaboration du Centre National d'Information Géo-Spatiale (CNIGS).





MICROZONAGE SISMIQUE DE CAP-HAÏTIEN

FORMATIONS GÉOLOGIQUES ET FAILLES

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 du Cap a fait l'objet d'une cartographie géologique à l'échelle 1/20 000.

Aperçu topographique et géologique

La ville du Cap-Haïtien est adossée au flanc oriental d'un chaînon montagneux de direction Nord-Est/Sud-Ouest, dénommé le Morne du Cap, qui culmine à plus de 700 mètres d'altitude. Une partie de la ville est construite sur ce flanc dont la pente est comprise entre 30 et 40 %. L'essentiel de l'agglomération s'est développé dans la plaine de la rivière du Haut-du Cap, près de son débouché dans l'Océan Atlantique (Figure 1).

Du point de vue géologique, le Morne du Cap est constitué de formations volcaniques et volcano-sédimentaires datées du Crétacé supérieur, c'est-à-dire de la dernière période de l'ère secondaire d'âge variant entre 100 et 65 millions d'années.

Situées à la base des reliefs du Morne du Cap, les formations volcaniques sont constituées de laves andésitiques, friables et à patine rouille, et de brèches formées de débris de roches volcaniques, consolidées par une matrice andésitique (code 120).

Quant à l'ensemble volcano-sédimentaire, il est composé de roches siliceuses de couleur violacée à noire, observables à la petite butte Saint-Michel située au Nord-Ouest de l'aéroport du Cap. Tout le long du flanc du Morne du Cap et au sommet des petites collines, on rencontre des blocs de calcaires karstifiés et bréchifiés (code 110).

La plaine alluviale du Cap-Haïtien rassemble les produits issus de l'altération des reliefs du Morne du Cap, ainsi que des dépôts marécageux et littoraux liés au rivage marin (codes 70 et 80). La plaine est séparée du Morne du Cap par une zone de piémont à pente douce formant un glacis au pied de la chaîne du Haut-du-Cap. Cette zone est constituée de colluvions (code 60) correspondant à des dépôts de sables argileux beige-brun à rougeâtre provenant de l'érosion du

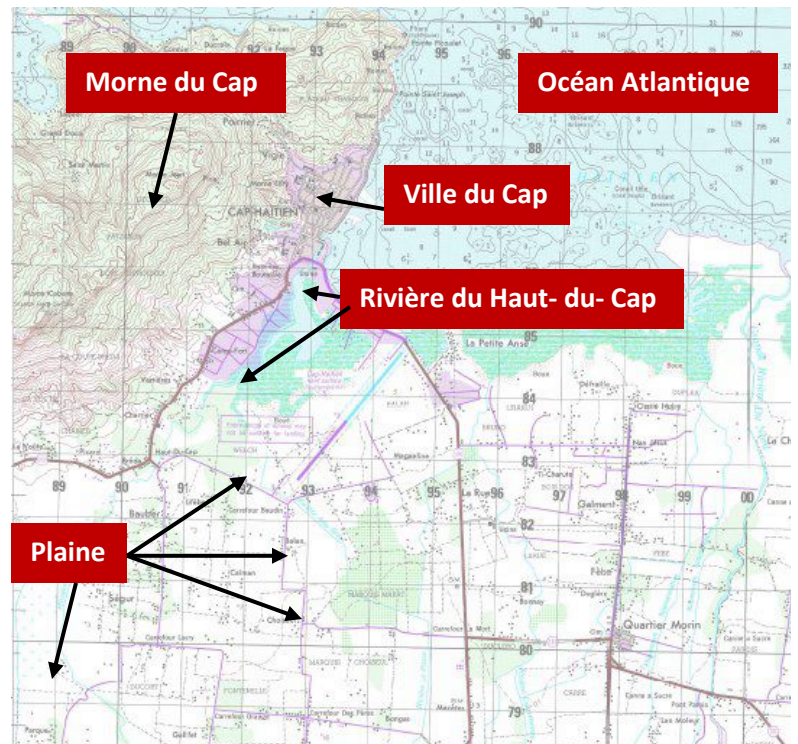


Figure 1. Cadre topographique de la zone d'étude

Morne. Une grande partie de la ville du Cap est construite sur ces colluvions. Enfin, des alluvions actuelles (code 10) se sont accumulées à l'estuaire de la rivière du Haut-du-Cap. Elles se composent de sables, de graviers et de déchets anthropiques, notamment des plastiques (Figure 2).

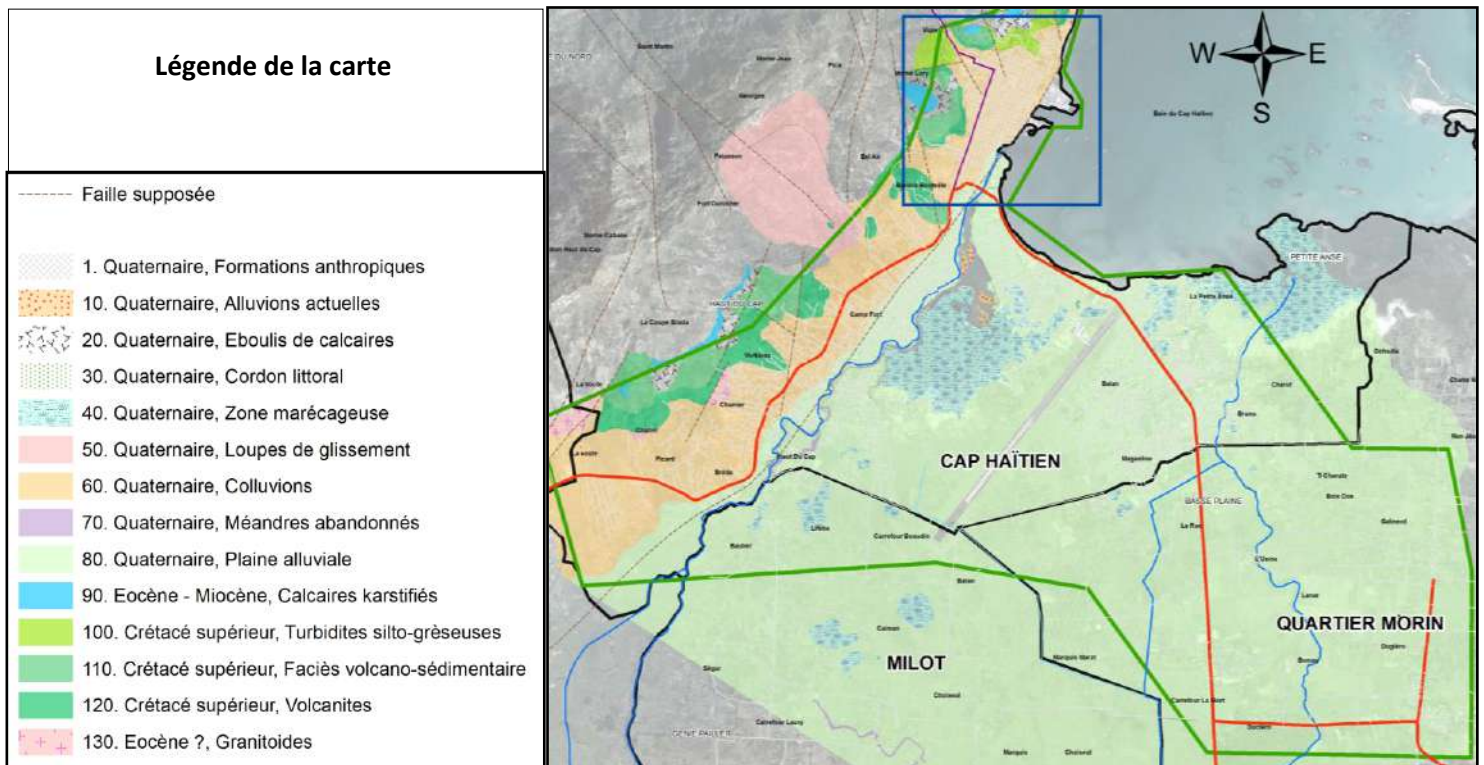


Figure 2. Carte des formations géologiques de surface

Rupture de surface de failles actives

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

Les travaux géologiques effectués dans la zone indiquent l'existence probable d'un accident qui passe au pied du Morne du Cap et dont la trace NNE-SSW est masquée par les colluvions quaternaires. Vers le Nord, cet accident pourrait venir se greffer sur la Faille Septentrionale. Tout ceci reste toutefois une hypothèse qui repose sur des arguments « indirects » et qui demande à être vérifiée. Aucune trace en surface de la faille n'a été vue.

La faille active majeure localement est la Faille Septentrionale qui passe à quelques kilomètres en mer au large de Cap-Haïtien. Les accidents repérés dans la zone d'étude ont été reportés en tant que « failles supposées » en pointillés sur la figure 2. **Le niveau d'activité possible de ces failles est très inférieur à celui de la Faille Septentrionale.**



MICROZONAGE SISMIQUE DE CAP-HAÏTIEN

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.

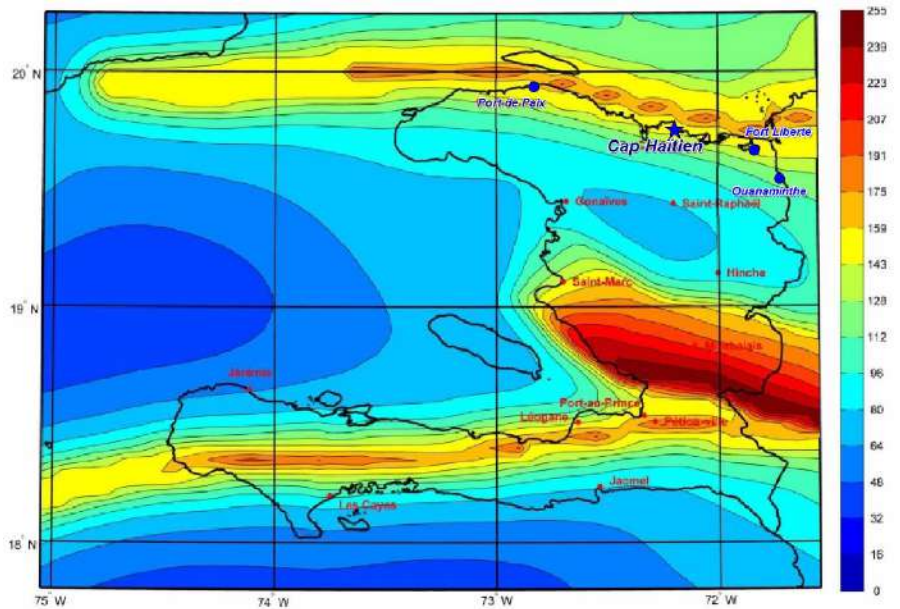


Figure 1. Aléa régional pour la période spectrale de 0.2s (accélération en %) et la période de retour 2475 ans.

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
Fort-Liberté	1.00	0.39	0.40	0.08	0.39
Ouanaminthe	0.80	0.33	0.32	0.09	0.41

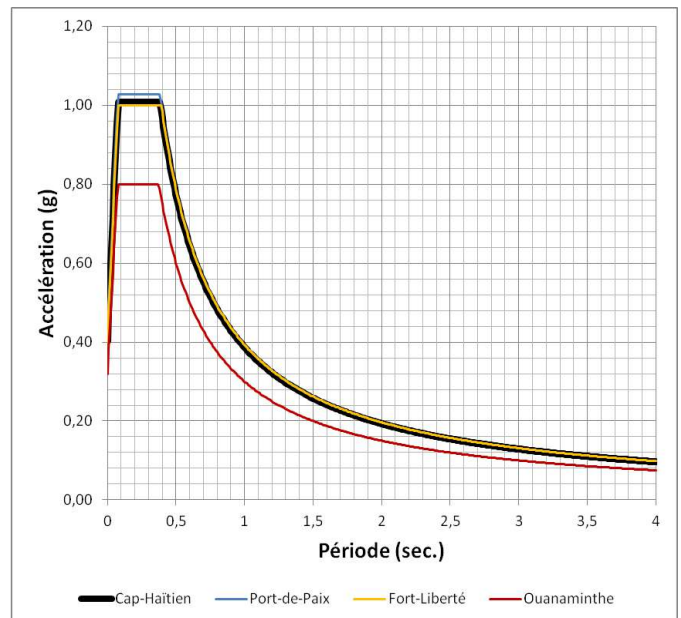


Figure 2. Spectres de référence au rocher pour les quatre communes du Grand Nord

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.



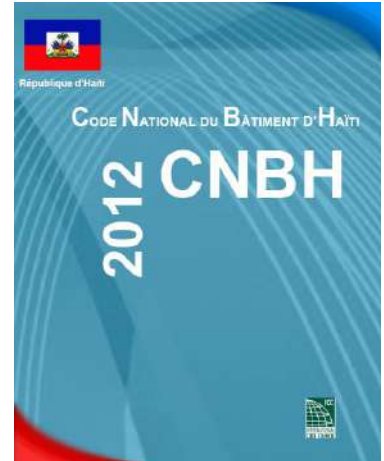
MICROZONAGE SISMIQUE DE CAP-HAÏTIEN

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)
A	Rocher « dur »	>1500	-	-
B	Rocher	760-1500	-	-
C	Rocher « mou » ou sol ferme	360-760	> 50	> 250
D	Sol « mou »	180-360	15-50	70-250
E	Sol très « mou »	< 180	< 15	< 70

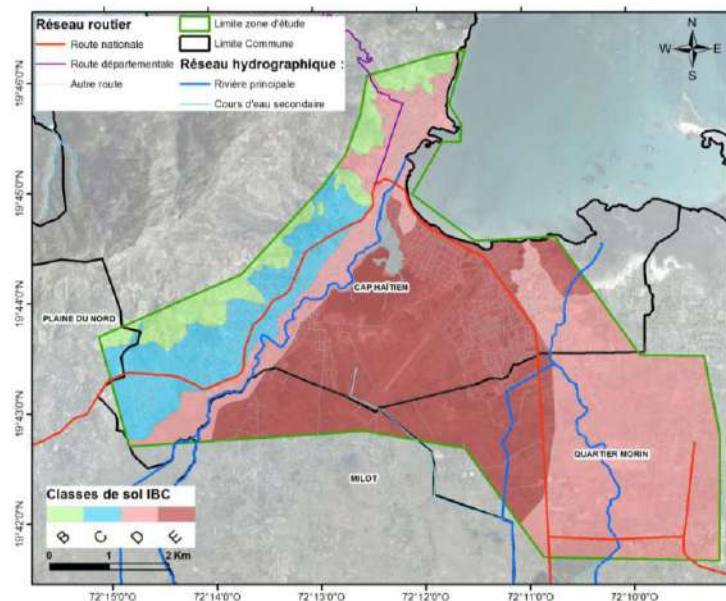
Classes de sol du Code IBC

Mesures géophysiques MASW

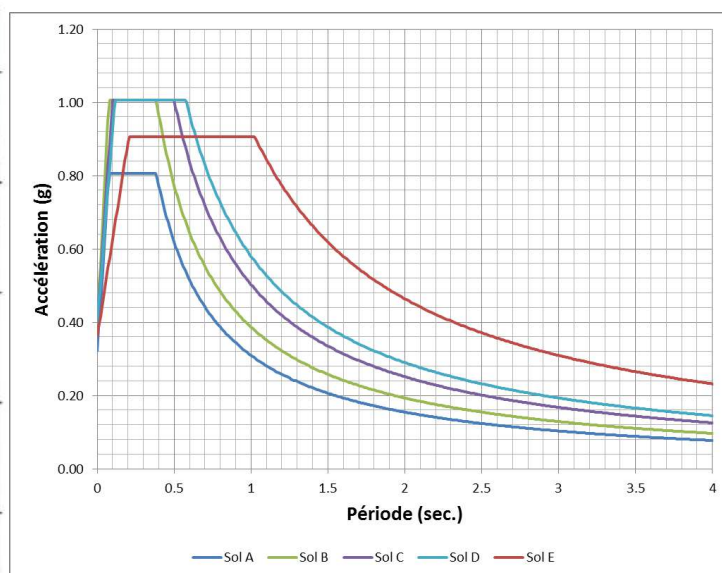
Pour déterminer l'influence du contraste de vitesse dans un sol, il est nécessaire de caractériser la succession des formations présentes dans le sous-sol. Ceci a été fait à partir de la méthode de mesures géophysiques MASW (Multi Channel Analysis of Surface Wave). Celles-ci fournissent deux types d'information : 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 Cap-Haïtien, 31 mesures MASW ont été effectuées par le LNBTP sur 29 sites choisis, d'une part, pour couvrir l'ensemble des formations lithologiques de la zone d'étude en ciblant prioritairement les alluvions, les colluvions et les remblais, susceptibles de présenter de forts effets de site lithologiques et, d'autre part, sur des quartiers jugés à enjeux importants ou fortement urbanisés.

Description des classes de sol IBC de la zone urbaine et périurbaine de Cap-Haïtien



Zonage en classes de sol IBC (NEHRP) pour l'agglomération de Cap-Haïtien



Spectres de réponse en accélération à prendre en compte pour des classes de sol A à E sur la commune de Cap-Haïtien

Classe de site NEHRP (IBC 2009)	Fa	Fv
A	0,8	0,8
B	1	1
C	1	1,3
D	1	1,5
E	0,9	2,4

Valeur des facteurs de site Fa et Fv sur la zone d'étude pour les classes de site du code IBC 2009

La carte de zonage en classes de sol IBC pour l'agglomération de Cap-Haïtien indique 4 classes allant de B à E :

- La classe B (en vert) présente une vitesse V_s au minimum égale à 800 m/s, ce qui constitue le milieu rocheux de référence. Cette classe regroupe toutes les formations rocheuses présentes au niveau du Morne du Cap et du Morne La Vigie. Il n'est pas à craindre d'effets de site sur ces zones.

- La classe C (en bleu) correspond, d'après IBC, au rocher mou ou sol ferme, elle regroupe les colluvions du piémont séparant le Morne du Cap de la plaine. On la retrouve tout au long de la route Nationale # 1, de Barrière Bouteille à Vaudreuil. Les effets de site ne sont pas trop importants d'après les coefficients d'amplification Fa et Fv.

- Les classes D et E (en rose et rouge) correspondent à un sol mou et très mou, elles regroupent les formations de la plaine alluviale (aéroport à Quartier-Morin) et les berges de la rivière du Haut du Cap. Une bonne partie de la ville du Cap est construite sur la classe D. Il est à craindre des effets de site élevés sur ces zones, particulièrement sur les sols de classe E (en rouge).



MICROZONAGE SISMIQUE DE CAP-HAÏTIEN

ZONAGE EN CLASSES DE SOL DES EFFETS DE SITE LITHOLOGIQUES

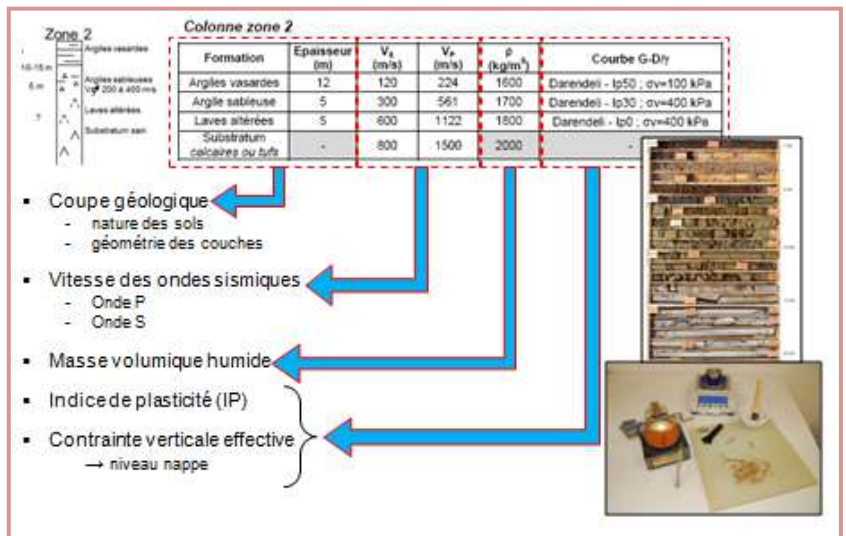
Objectif du zonage en classes de sol spécifiques

Ce zonage consiste à identifier et cartographier les zones présentant des caractéristiques géologiques et géo-mécaniques 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 V_S 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 Cap-Haïtien est défini en 6 classes de sol (Figures 1 et 2, Tableaux 1 et 2) :

- **La classe 0 (en vert)** correspond au rocher affleurant. Elle est présente sur toute la frange Ouest de la zone d'étude sur les hauteurs du Morne du Cap. Cette classe regroupe les formations volcaniques, les brèches volcaniques, l'ensemble volcano-sédimentaire, les calcaires karstifiés retrouvés au Morne du Cap. Classe sans effets de site ;
- **La classe 1 (en rose)** correspond à la partie Est de la plaine alluviale, entre Quartier Morin, Petite Anse et Balan. Sur cette classe, des effets de site sont attendus sur bâtiment souple ou de grande hauteur ;
- **La classe 2 (en rouge)** correspond à la partie Ouest de la plaine alluviale, entre la zone de l'aéroport et Milo, comprend également des zones de marécages et le cordon littoral. Effets de sites attendus sur bâtiment souple ou de grande hauteur ;

- **La classe 3 (en bleu)** correspond aux colluvions en piémont du Morne du Cap, depuis le centre-ville historique jusqu'à la zone de Vaudreuil au Sud où se situe le complexe administratif. Les effets de site attendus sont faibles à moyen ;
- **La classe 4 (en jaune)** correspond à la transition entre les remblais du centre historique et les colluvions du piémont du Morne du Cap. Les effets de site attendus varient de moyen à fort sur bâtiment rigide ou de faible hauteur et fort sur bâtiment souple ou de grande hauteur ;
- **La classe 5 (en orange)** correspond à la zone d'embouchure de la rivière du Haut du Cap et à la zone de remblais du centre-ville et du port. Les effets de site attendus sont forts sur tous types de bâtiments.

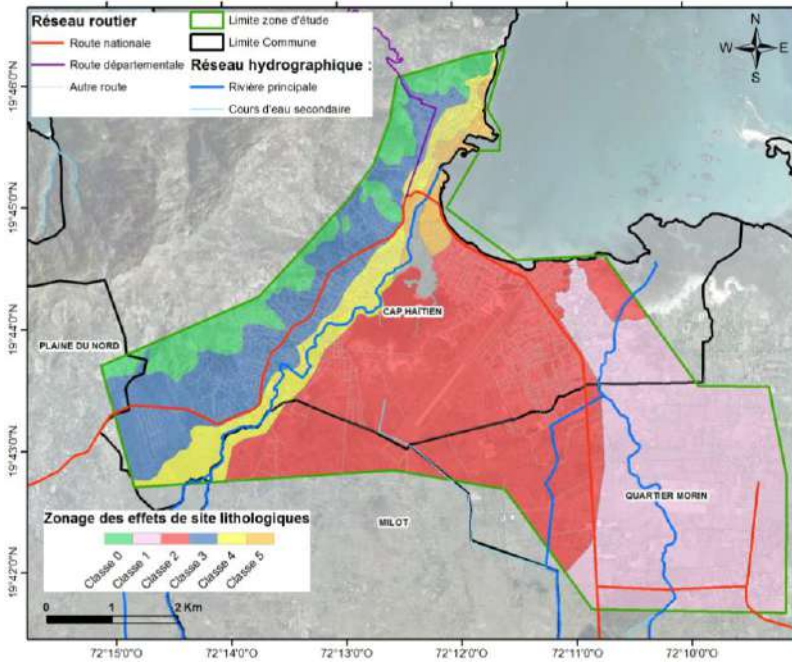


Figure 1. Zonage en classes de sol des effets de site lithologiques pour l'agglomération de Cap-Haïtien

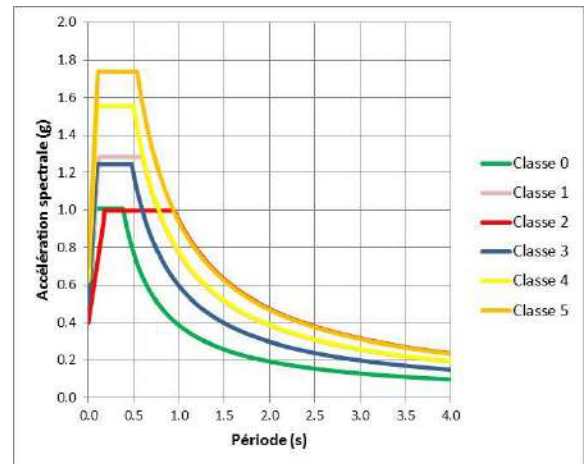


Figure 2. Spectres de réponse en accélération des 6 classes de sols délimitées sur l'agglomération de Cap-Haïtien

	SDS (g)	SD1 (g)	PGA (g)	TO (sec.)	Ts (sec.)	Fa	Fv
Classe 0	1.01	0.39	0.40	0.08	0.38	1.00	1.00
Classe 1	1.28	0.77	0.51	0.12	0.60	1.27	1.99
Classe 2	1.00	0.95	0.40	0.19	0.95	0.99	2.45
Classe 3	1.24	0.60	0.50	0.10	0.48	1.24	1.54
Classe 4	1.55	0.78	0.62	0.10	0.50	1.54	2.01
Classe 5	1.74	0.94	0.70	0.11	0.54	1.73	2.43

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

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

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





MICROZONAGE SISMIQUE DE CAP-HAÏTIEN

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 de fondation standardisées NEHRP (Fiche 4) proposées dans la norme de construction IBC (2009) a été menée dans le cadre de cette étude. Pour chacune des 6 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, 4 et 5 en une seule classe de sol forfaitaire D. 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.

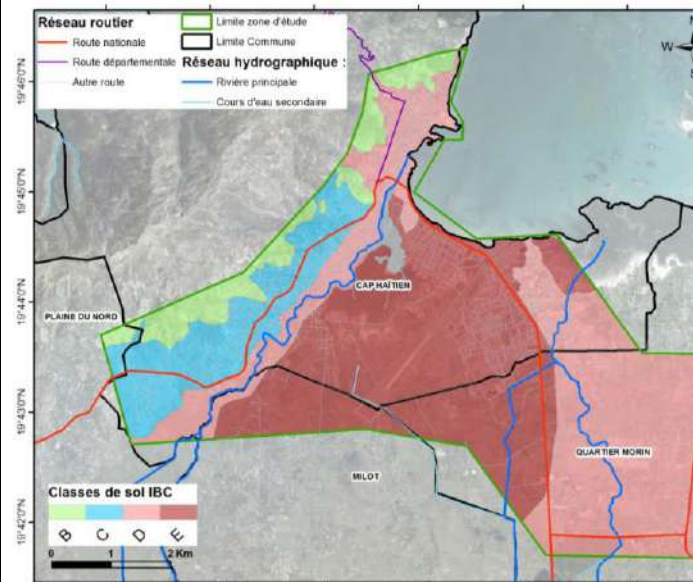
Comme il est indiqué dans le Tableau 1, les coefficients d'amplifications F_a et F_v des spectres NEHRP ne correspondent pas à ceux des classes de sol spécifiques. En particulier, les spectres forfaitaires des classes C et D ne permettent pas la prise en compte des fortes accélérations obtenues sur les courtes périodes (< 0.25 s) pour les classes de sol 1, 4 et 5.

	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	265	D	1.0	1.5	1.27	1.99
Classe 2	140	E ou F	0.9	2.4	0.99	2.45
Classe 3	425	C	1.0	1.3	1.00	1.26
Classe 4	250	D	1.0	1.5	1.54	2.01
Classe 5	225	D	1.0	1.5	1.73	2.43

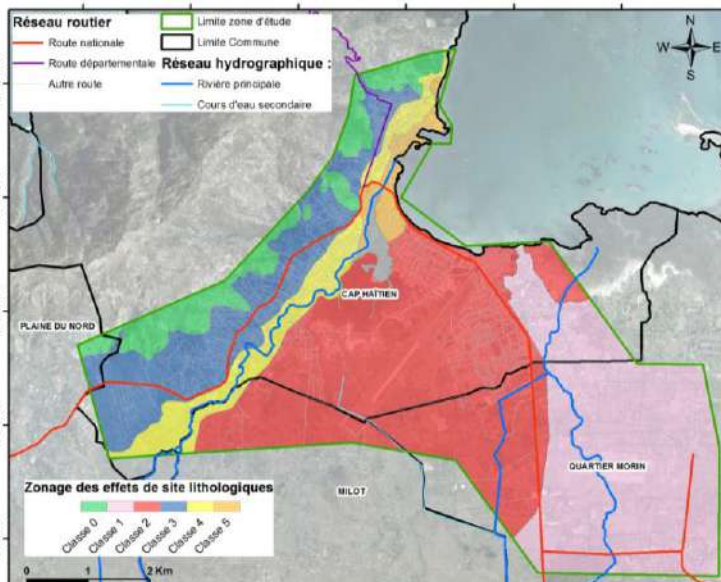
Tableau 1. Correspondance des 6 classes de sols avec les classes NEHRP sur la base des vitesses V_{S30} . Les coefficients d'amplifications F_a et F_v ne sont pas équivalents

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.

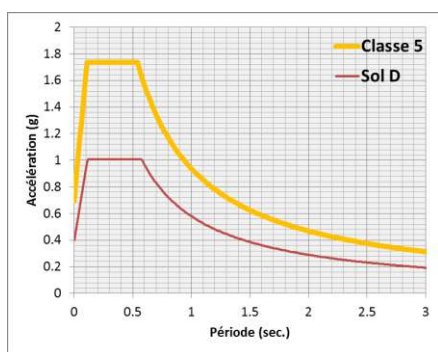
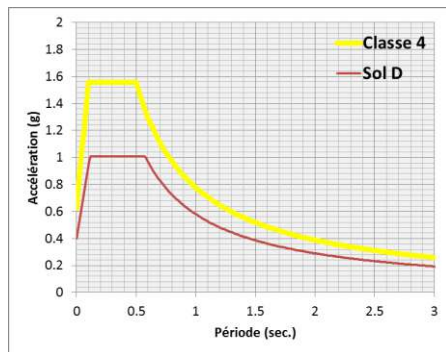
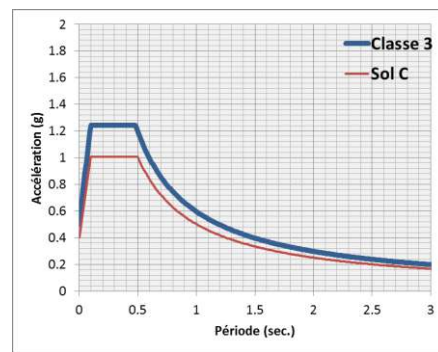
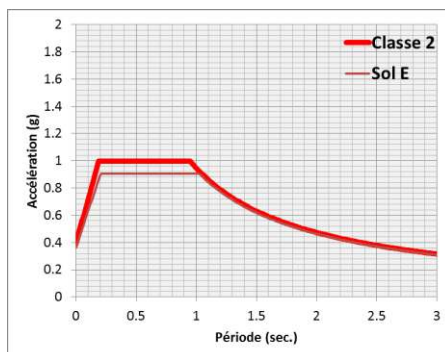
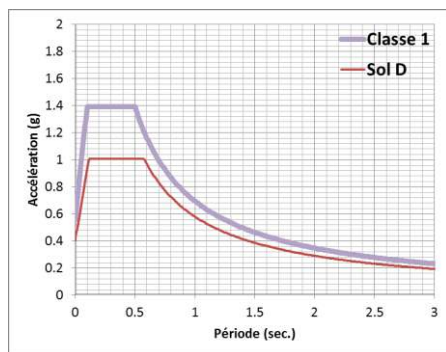
Pour les classes de sols du microzonage, la tendance d'évolution de F_v avec V_{S30} est globalement respectée. Par contre, il n'y a aucune corrélation entre F_a et V_{S30} . Ce paramètre n'est pas un bon indicateur pour les effets de site hautes fréquences identifiés dans l'étude de microzonage.



Zonage en classes de sol IBC (NEHRP) pour l'agglomération de Cap-Haïtien



Zonage en classes de sol des effets de site lithologiques pour l'agglomération de Cap-Haïtien



Comparaison entre spectres spécifiques du microzonage sismique de Cap-Haïtien et spectres IBC

- Pour les classes 4 et 5, les spectres proposés sont aussi plus pénalisants que la classe D IBC pour les longues périodes (supérieures à 0.5s).
- Pour la classe 3, le spectre spécifique est équivalent au spectre IBC de classe C pour les longues périodes (supérieur à 0.5-0.6 s) et est un peu plus pénalisant pour les courtes périodes (inférieures à 0.5).

- Le spectre spécifique de la classe 2 est équivalent au spectre IBC sol E.

- Pour les classes 1, 4 et 5, le spectre spécifique est systématiquement pénalisant sur les courtes périodes (inférieures à 0,4-0,5 s) par rapport aux spectres IBC. Concrètement, cela implique que les spectres proposés dans cette étude sont plus pénalisants que les spectres de la réglementation nationale pour les bâtiments à courte période propre (bâtiments bas ou de hauteur intermédiaire, ie 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 6 classes de sol spécifiques.



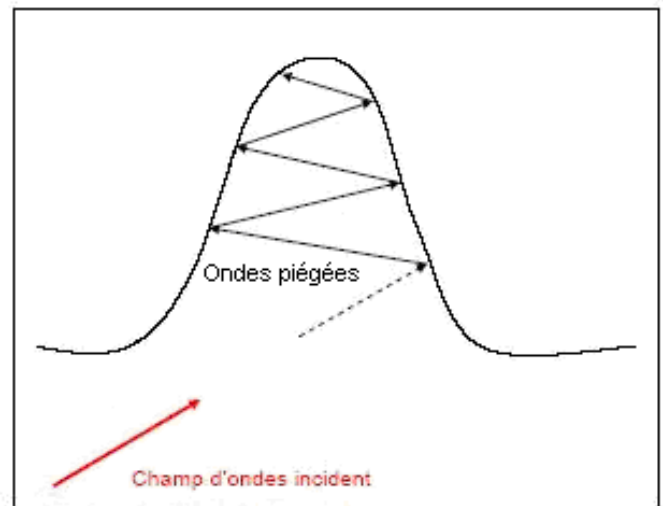
MICROZONAGE SISMIQUE DE CAP-HAÏTIEN

EFFETS DE SITE TOPOGRAPHIQUES

Définition

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

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

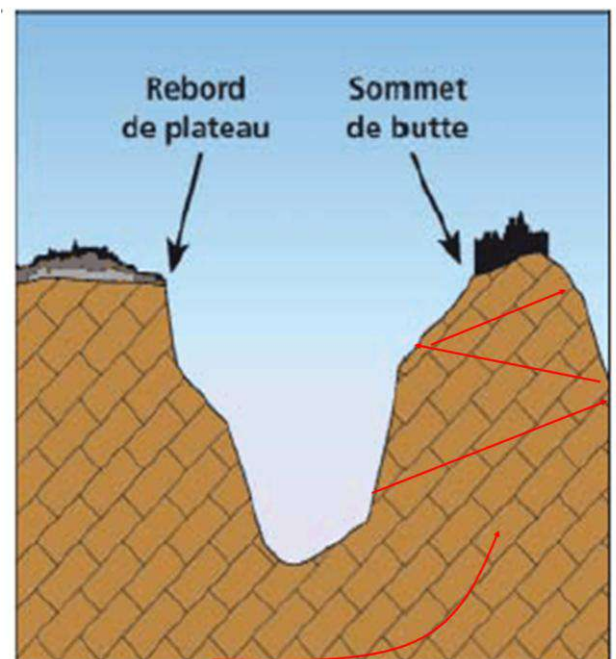


Principe des effets topographiques

Prise en compte

Du fait de la complexité du phénomène, il n'existe pas à ce jour de méthode validée ou de modèle opérationnel permettant une évaluation des amplifications du signal sismique liées à la topographie.

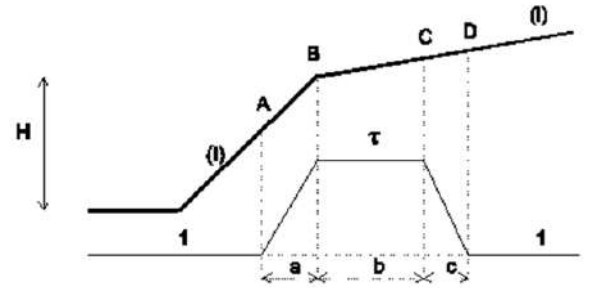
A titre d'exemple, les règles de dimensionnement parasismique américaines IBC ne prennent pas en compte ce phénomène. A fortiori, les effets de site topographiques ne sont le plus souvent pas pris en compte dans le cadre des microzonages sismiques. Cependant, la prise en compte de ces effets de site, dans le cadre du microzonage sismique de l'agglomération de Port-au-Prince, est abordée par l'application d'une approche forfaitaire empirique inspirée de la réglementation parasismique française, reprise récemment au niveau européen. En effet, les règles parasismiques françaises PS-92 ainsi que les règles parasismiques européennes Eurocode 8 (EC8) tiennent compte de ces effets par l'application d'un coefficient multiplicateur d'amplification pour les ouvrages se trouvant dans les situations topographiques particulières (zones de rupture de pente marquée, de crêtes, de bordures de plateau et de sommets de butte).



Zones à risque d'effets de site topographiques

Approche forfaitaire empirique

La cartographie des zones exposées à un effet de site topographique est donc faite de façon qualitative en indiquant les zones où un coefficient multiplicatif τ (tau) (prenant une valeur entre 1 et 1.4) pourrait être applicable. D'après la figure ci-contre, τ prend la valeur 1 à l'aval du point A et à l'amont du point D (coefficient $\tau = 1$: pas d'effet de site). τ prend la valeur 1.4 entre AB, BC et CD (coefficient $\tau = 1.4$: effet max pris en compte).

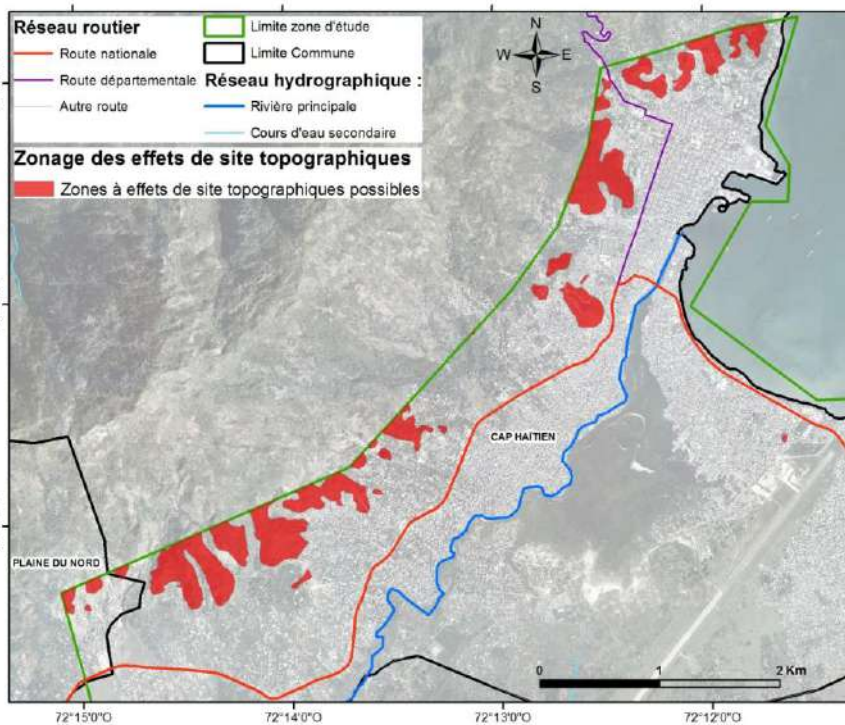


S'il n'existe pas beaucoup d'informations sur les conditions topographiques d'un site, il est proposé d'appliquer le coefficient forfaitaire le plus pénalisant $\tau = 1.4$.

Cartographie de l'aléa effets de site topographiques au Cap-Haïtien

Les effets de site topographiques se concentrant au niveau de crêtes, de barres rocheuses ou de versants présentant une forte pente, il est évident que la résolution du MNT utilisé pour les calculs conditionne très fortement les résultats de l'analyse, tant en termes d'ampleur du phénomène que d'étendue des zones de susceptibilité. A cet égard, il semble souhaitable de pouvoir disposer d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) le plus précis possible. Pour le microzonage de l'agglomération du Cap-Haïtien, il a été utilisé un MNT avec une résolution de 10 m.

L'aléa effets de site topographiques concerne uniquement le flanc oriental du Morne du Cap qui borde l'Ouest et le Nord de la zone d'étude. Ce phénomène devra être pris en compte pour le dimensionnement d'ouvrage.



Zonage des effets de site topographiques possibles à Cap Haïtien. En rouge, les zones où l'effet de site topographique est à considérer avec la prise en compte d'un coefficient multiplicateur applicable au spectre de dimensionnement

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



MICROZONAGE SISMIQUE DE CAP-HAÏTIEN

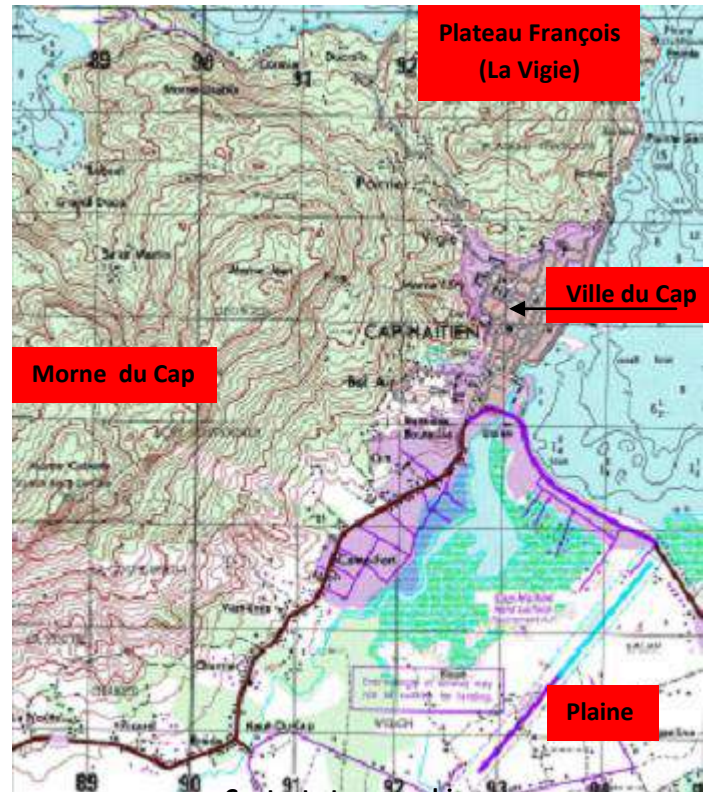
MOUVEMENTS DE TERRAIN

Contextes topographique et géologique de la zone d'étude

La ville du Cap-Haïtien est adossée au flanc oriental d'un chaînon montagneux, le Morne-du-Cap, orienté NE-SW au niveau de Cap-Haïtien, qui culmine à plus de 700 m d'altitude. Si l'essentiel de l'agglomération s'est développé dans la plaine de la rivière du Haut-du-Cap, près de son débouché dans l'Océan Atlantique, une partie de la ville est construite sur les reliefs de pente comprise entre 30 et 40 %. Ces versants sont très exposés aux phénomènes de mouvements de terrain. AlterPress rapporte que « *chaque année on enregistre en moyenne une dizaine de morts et des dégâts matériels, en lien avec des glissements de terrain, dans les zones à risque du Cap-Haïtien, lors des périodes cycloniques* » (AlterPress. Dépêche du jeudi 9 juin 2011).

Du point de vue géologique, le pied du versant SE du Morne-du-Cap présente des formations volcaniques et volcano-sédimentaires constituées de laves, de brèches et de tufs de composition andésitique, surmontées par des roches silicifiées. Environ les deux tiers supérieurs du versant sont coiffés par une épaisse série calcaire formant un plateau calcaire profondément karstifié.

La plaine alluviale rassemble les produits issus de l'altération des reliefs, ainsi que des dépôts marécageux et littoraux liés au rivage marin. Elle est séparée du Morne par une zone de piedmont constituée de colluvions.



Contexte topographique

Typologie des mouvements de terrain de la zone d'étude

Trente-deux événements ont été observés soit sur le terrain soit sur les photos aériennes. Certains ont pu causer des dommages importants (perte de vies humaines, destruction d'habitations). Parmi ces 32 événements, trois types majeurs de mouvements de terrain sont identifiés, il s'agit :

- Des chutes de bloc,
- Des glissements de terrain, localisés et de petite à moyenne ampleur,
- Des coulées boueuses (type intermédiaire entre les phénomènes de mouvements de terrain et les inondations).

Les chutes de blocs concernent essentiellement le démantèlement du plateau calcaire, en particulier le front du plateau. Elles peuvent aussi être causées par la remobilisation de blocs sur les pentes.

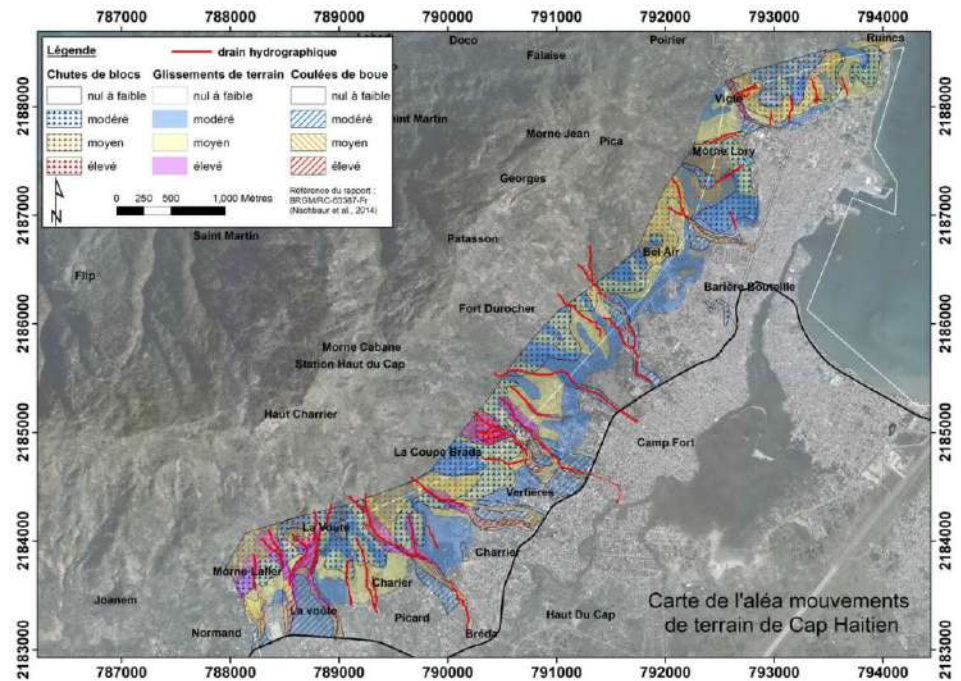
Les glissements de terrain affectent des formations peu consolidées de type colluvions, ou alluvions. Ils peuvent aussi concerner les formations volcano-sédimentaires altérées.

Les coulées boueuses correspondent à la mise en mouvement de matériaux à l'état visqueux et peuvent résulter de l'évolution de glissements sous l'action de l'eau.

Cartographie de l'aléa mouvements de terrain

Trois types majeurs de mouvements de terrain sont distingués au niveau de la cartographie du Cap-Haïtien : les chutes de blocs et éboulements rocheux, les glissements de terrain et les coulées de boue. Trois niveaux d'aléas sont cartographiés : modéré (bleu), moyen (jaune) et élevé (rose).

L'aléa chute de blocs concerne surtout le plateau François, le quartier Calvaire Jouissant, le quartier de la Vigie et le quartier Campfort. La présence de nombreux et volumineux blocs calcaires contribue à justifier un fort niveau d'intensité particulièrement sur le versant de Campfort où les blocs peuvent atteindre plus de 250 m³, associé à une probabilité moyenne de départ de blocs.



Carte d'aléa mouvement de terrain de l'agglomération du Cap-Haïtien

Les glissements de terrain présentant un niveau d'aléa élevé concernent les formations peu consolidées constituées de colluvions et de formations altérées, les berges des ravines hautes de plus de 6 mètres et les dépôts alluvionnaires sub-verticaux. Les berges des ravines sont particulièrement sensibles aux glissements de terrain : d'une part la présence de formations colluvionnaires de pied de pente y est plus probable, d'autre part, les écoulements d'eau lors des fortes pluies diminuent la force résistante des berges et accentuent ainsi, leur probabilité de glissement.

Lorsqu'une ravine draine un important bassin versant, lui-même sujet aux glissements de terrain et aux chutes de pierres ou blocs, **l'aléa coulée de boue** est potentiellement présent. L'écoulement des eaux qui se concentre dans ces secteurs est capable de remobiliser ces matériaux et générer des coulées de boues. Le déclenchement de ces coulées est également favorisé par l'exploitation artisanale par gravitation (prélèvement de blocs au niveau du plateau calcaire et descente de ces blocs par roulage le long du versant), activité qui se pratique anarchiquement et intensément dans plusieurs localités. Cet aléa se retrouve particulièrement dans les zones de haut Charrier et de La Voute pour lesquelles les glissements reconnus en amont peuvent très fortement évoluer en coulées de boue.



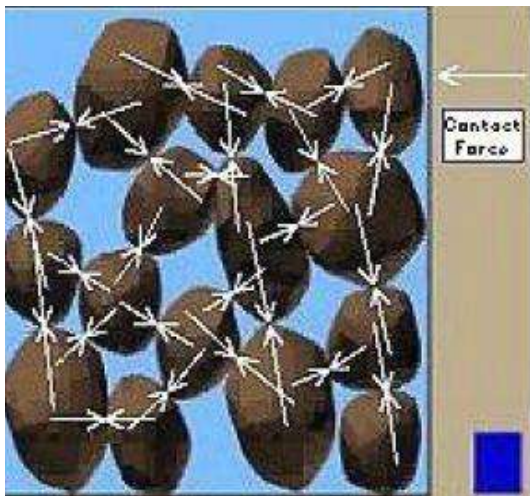
MICROZONAGE SISMIQUE DE CAP-HAÏTIEN

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 du Cap-Haïtien

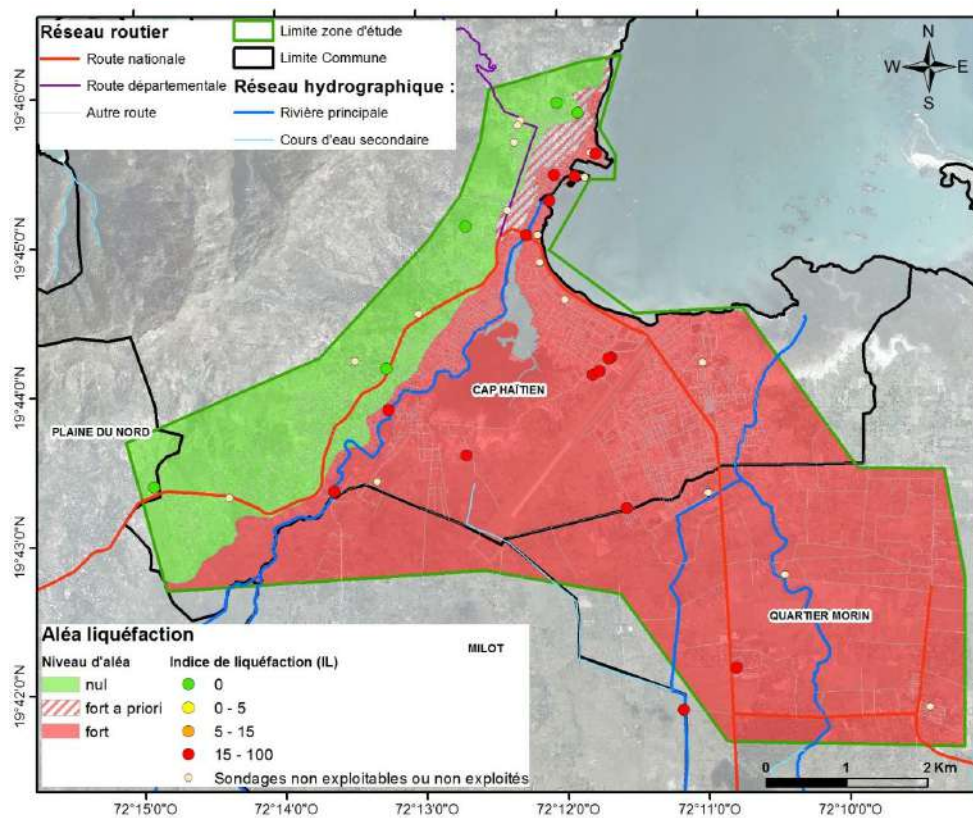
La carte d'aléa liquéfaction a été réalisée sur la base d'études géotechniques ponctuelles et des données géologiques (Fiche 2). Les niveaux d'aléa sont classés nul (vert), fort à priori (hachuré rouge) et fort (rouge). Pour un bâtiment d'importance moyenne (quelques étages), on peut associer, en première 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 de la plaine alluviale et la zone du centre-ville de Cap-Haïtien bâtie sur des remblais sont concernés par un aléa fort, ce qui représente près de 80 % de la superficie de la zone d'étude.

On notera que les indices de liquéfaction calculés au niveau de l'embouchure de la rivière du Haut-du-Cap, au niveau de la zone marécageuse située à l'ouest de l'aéroport et enfin au niveau du port, sont particulièrement élevés.

La partie du centre-ville située à l'arrière de la zone remblayée reste mal connue (peu de sondages disponibles). Elle est probablement concernée par un aléa fort, mais il conviendrait de le vérifier par la réalisation de quelques sondages complémentaires.

Seuls les reliefs bordant le Nord-Ouest de la zone d'étude ne sont pas concernés par la liquéfaction. L'absence d'eau superficielle dans les sols permet de leur affecter un aléa nul.



Cartographie de l'aléa liquéfaction. En rouge, les zones à aléa fort et en vert les zones à aléa nul. La zone en hachuré correspond à une zone où le niveau d'aléa est supposé fort mais doit être vérifié par des sondages complémentaires



MICROZONAGE SISMIQUE DE CAP-HAÏTIEN

CONCLUSION - RECOMMANDATIONS

Avvertissements. 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, mouvement de terrain, liquéfaction). Pour une appréciation correcte des risques naturels au niveau d'un site, ces cartes doivent être croisées également avec d'autres aléas : inondations, submersion marine, cyclones, 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 du Cap-Haïtien :

- la répartition des faciès géologiques et le tracé des failles actives (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 présenter une amplification du mouvement sismique liée à la topographie (Fiche 7);
- les zones susceptibles de présenter un aléa mouvements de terrain faible, moyen et fort (Fiche 8)
- les zones susceptibles de liquéfaction (Fiche 9).

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

- Les zones en pente le long du Morne du cap sont affectés sur une grande superficie par de l'aléa mouvement de terrain et des effets de site topographiques. Une attention particulière est recommandée sur les secteurs de la Voute, Haut-Charrier et la Vigie concernés par un aléa mouvement de terrain fort.
- Le littoral remblayé du centre-ville historique et de la zone portuaire, l'embouchure de la rivière du Haut-du-Cap (classe de sol 5 du zonage d'effet de site lithologique), la plaine alluviale de Shada à Balan et la zone de l'aéroport (Classe de sol 2 du zonage d'effet de site lithologique) sont constitués de sols mous et fortement liquéfiables aux caractéristiques mécaniques faibles. Ce sont des zones défavorables à de nouvelles constructions importantes ou à forts enjeux.
- La plaine littorale sur les secteurs de Carrefour-la-Mort, Quartier Morin, Galman, Petite Anse (Classe de sol 1 du zonage d'effet de site lithologique) correspond à des alluvions avec des caractéristiques mécaniques faibles. Un avis géotechnique est fortement recommandé pour définir le mode de fondation des constructions. Les bâtiments à structures rigides ou de faible hauteur sont préférables sur ce type de sol.

- Les zones de colluvions en piémont (zone amont du centre-ville historique, Nazon, Vertières, Breda, jusqu'à Vaudreuil, en classe de sol 3 du zonage d'effet de site lithologique) sont des sols de caractéristiques mécaniques moyennes à bonnes, avec peu d'effets de site attendus. Dans le contexte de Cap-Haïtien, ce type de sol est le plus favorable à l'aménagement et à la construction urbaine.

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) Pour ce qui concerne les failles actives, l'état de connaissance de la géologie structurale à cette échelle autour de Cap-Haïtien est très faible. Cette première analyse ne permet pas d'indiquer si les structures repérées sont des accidents encore sismiquement actifs, aucun indice d'activité récente n'ayant été mis en évidence. Une analyse structurale et morphologique doit être menée avec des Modèles Numériques de Terrain beaucoup plus précis (type Lidar avec une résolution de 1 m) et les investigations de terrains devraient être poursuivies dans le cadre de travaux de recherche universitaires. **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 6 classes de sol spécifiques. En effet, le zonage en classes de sol NEHRP est moins fin que le zonage en 6 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.

3) Pour ce qui concerne les effets de site topographiques, pour tout projet à l'échelle d'une parcelle, il reste nécessaire d'évaluer la pente du terrain, pour déterminer si on doit appliquer un coefficient multiplicatif forfaitaire τ au spectre de dimensionnement et éventuellement moduler la valeur de ce coefficient en fonction de la pente. Par défaut, la valeur maximale de ce coefficient forfaitaire est $\tau = 1.4$. Les conditions de prise en compte (valeur du coefficient, critères de pente, catégorie d'importance du bâtiment concerné) seront fixées par la réglementation parasismique nationale ou locale.

4) En ce qui a trait aux mouvements de terrain, il est recommandé de transposer les cartes d'aléa produites en document réglementaire de type Plan de Prévention des Risques (PPR) appelé à fournir des préconisations pour l'aménagement des zones suivant leur degré d'aléa : nul à négligeable, modéré, moyen et fort. Dans certaines zones, du fait de l'intensité et la fréquence de l'aléa, la constructibilité est conditionnée à la réalisation d'une étude préalable destinée à rendre compatible le projet (construction, installations, ouvrages ou équipements) avec le risque considéré.

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 du Cap-Haïtien.



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 Cap-Haïtien (Haïti) : Rapport de synthèse, BRGM/RC -63513-Fr. Mai 2014***
D. Bertil, C. Prépetit, A. Roullé, G. Noury avec la collaboration de S. Auclair, V. Bastone, A Bialkowski, R. Cochery, F. de Martin, J. Duhaouvelle, R. Gilles, P. Jean, M. Jean-Baptiste, J. Jean-Philippe, J. Monthel, A. Nachbaur, K. Samyn, R. Sylvain, M. Terrier

- ***Microzonage sismique de Cap-Haïtien (Haïti) : Carte de l'aléa Mouvements de terrain, BRGM/RC - 63387-Fr. Mai 2014***
A. Nachbaur, M. Terrier, Ph. Jean, M. Jean-Baptiste

- ***Microzonage sismique de Cap-Haïtien (Haïti) : Effets de sites et Liquéfaction, BRGM/RC -63514-Fr. Juin 2014***
A Roullé, G. Noury, S. Auclair, E. Vanoudheusden, D. Bertil
avec la collaboration de V. Bastone, A. Bialkowski, R. Cochery, R. Gilles, B. Jean, P. Jean, M. Jean-Baptiste, J. Jean- Philippe, B. Jeudy, A. Nachbaur, C. Prépetit, K. Samyn, R Sylvain, M. Terrier