



Microzonages sismiques en Haïti : Comparaison des spectres de réponse spécifiques et des spectres forfaitaires du code IBC

Didier Bertil, Agathe Roulle, Gildas Noury, Jaime Abad, Ronaldine Gilles,
Bétegard Jeudy

► To cite this version:

Didier Bertil, Agathe Roulle, Gildas Noury, Jaime Abad, Ronaldine Gilles, et al.. Microzonages sismiques en Haïti : Comparaison des spectres de réponse spécifiques et des spectres forfaitaires du code IBC. 9ème Colloque de l'AFPS : AFPS'15 , Association Française de Génie Parasismique (AFPS), Nov 2015, Champ-sur-Marne, France. hal-01237547

HAL Id: hal-01237547

<https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01237547>

Submitted on 3 Dec 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Microzonages sismiques en Haïti : Comparaison des spectres de réponse spécifiques et des spectres forfaitaires du code IBC

Didier Bertil*, **Agathe Roullé***, **Gildas Noury***, **Jaime Abad***, **Ronaldine Gilles****, **Bétégard Jeudy****

* *Direction Risques et Prévention - Risques Sismique et volcanique Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 3 av. Claude Guillemin, Orléans Cedex 2, France*

d.bertil@brgm.fr

** *Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics, rue Toussaint Louverture # 27, Delmas 33, Port-au-Prince, Haïti*

RÉSUMÉ. Haïti cherche à mettre en place un code national de construction, le CNBH, qui s'appuie sur le code international IBC avec une classification des sols et des coefficients d'amplifications F_a et F_v suivant les recommandations NEHRP. Des microzonages sismiques effectués sur 5 des villes les plus exposées d'Haïti ont permis de caractériser 73 colonnes de sol couvrant une gamme de VS_{30} de 140 à 750 m/s. La comparaison des facteurs F_a , F_v obtenus et ceux recommandés par l'IBC montrent des différences notables avec F_a beaucoup plus fort que pour l'IBC dans de nombreux cas. Le substratum sismique est relativement peu profond, ce qui peut expliquer les valeurs F_a élevées trouvées. Les calculs prennent en compte un comportement non-linéaire des sols. Le dimensionnement sismique selon le code IBC semble inadapté pour ces villes, ce qui rend la prise en compte des spectres des microzonages encore plus nécessaire. Des études de sensibilité sur les paramètres de non linéarité et la profondeur du substratum sont souhaitables pour confirmer ces résultats.

ABSTRACT. It is Haiti's ambition to put in place a national building code, the CNBH, based on the International Building Code (IBC) with a soil classification and amplification coefficients F_a and F_v following the NEHRP recommendations. Seismic microzonations carried out in 5 of the most exposed cities in Haiti have allowed the characterization of 73 soil columns covering a range of VS_{30} values between 140 and 750 m/s. Comparing the obtained F_a and F_v factors with the recommended IBC factors shows notable differences, with much higher F_a values than recommended by the IBC in many cases. The engineering rock depth is relatively shallow, which could explain the high F_a values encountered. The calculations take soil nonlinearity into account. Earthquake-resistant design following IBC seems inadequate for these cities, making the resulting microzonation spectra even more necessary. However, sensitivity studies on the nonlinearity parameters and the depth of the engineering rock layer are necessary to confirm these results.

MOTS-CLÉS : *microzonage sismique, effets de site, spectres de réponse, Haïti*

KEYWORDS: *seismic microzonation, site effects, response spectra, Haiti.*

1. Contexte et objectifs

Suite au séisme de magnitude 7.1 de Janvier 2010 en Haïti, et à la demande du gouvernement haïtien, un programme de microzonages sismiques a été réalisé entre 2011 et 2015 pour des villes fortement exposées à l'aléa sismique : au sud l'agglomération de Port-au-Prince à proximité du système de failles Enriquillo, au nord les villes de Cap-Haïtien, Fort-Liberté, Ouanaminthe et Port-de-Paix proches de la faille Septentrionale (Figure 1).

Concernant les effets de site lithologiques, ces microzonages sismiques définissent des classes de sol spécifiques et les spectres de réponse du mouvement sismique qui leur sont associés. Dans un contexte d'aléa sismique élevé, les calculs de réponses sismiques prennent en compte un modèle de comportement non linéaire du sol.

L'objectif est de proposer des paramètres de mouvements du sol propres aux zones étudiées, qui peuvent s'avérer plus adaptés que ceux imposés par le Code Nationale du Bâtiment d'Haïti (CNBH) en cours d'élaboration. Les normes parasismiques du CNBH s'appuient sur le code international IBC (2009). Nous proposons ici d'analyser les différences obtenues entre les spectres de réponses spécifiques de ces microzonages et les spectres forfaitaires proposés dans les mêmes conditions dans l'IBC.

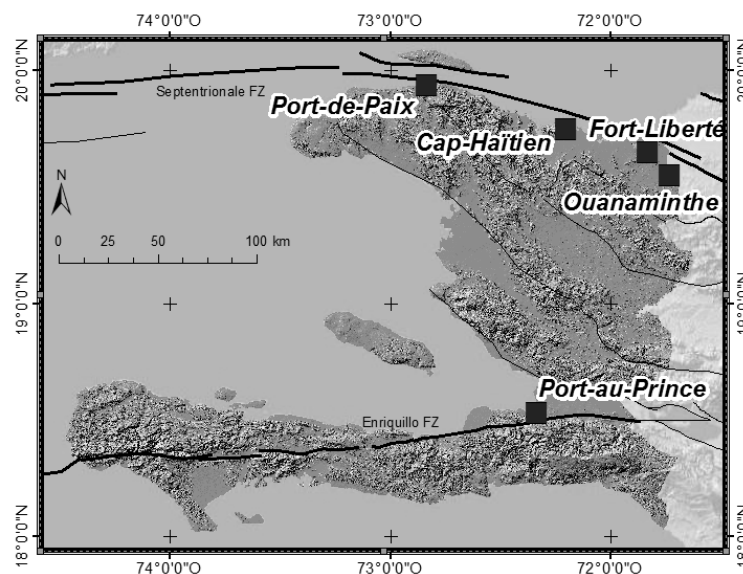


Figure 1. Les villes d'Haïti concernées par les microzonages sismiques sont situées à proximité des systèmes de faille principaux : Septentrionale FZ au nord, et Enriquillo FZ au sud.

2. Spectres forfaitaires du code IBC et adaptations

Les spectres forfaitaires de l'IBC (Figure 2) sont construits à partir de 2 paramètres S_{DS} et S_{D1} . Ceux-ci sont déduits des valeurs d'accélération spectrale S_S et S_1 de l'aléa sismique au rocher aux périodes 0.2s et 1.0s pour une période de retour 2475 ans et de coefficients d'amplification F_a et F_v avec $S_{DS}=2/3 \cdot F_a \cdot S_S$; $S_{D1}=2/3 \cdot F_v \cdot S_1$. Ces coefficients quantifient l'amplification en accélération spectrale de chaque classe de sol par rapport à un sol rocheux (classe B de la classification NEHRP) pour les périodes 0.2s (F_a) et 1.0s (F_v).

Les accélérations spectrales S_S et S_1 sont issues des cartes d'aléa sismique probabiliste de Frankel et al., 2010. Le Tableau 1 donne les paramètres du spectre de réponse au rocher pour les 5 villes. Pour les villes du Nord, l'accélération au rocher est fixe sur chaque zone d'étude. Pour l'agglomération de Port-au-Prince, elle est variable selon la commune de l'agglomération. Le PGA au rocher est partout supérieur à 0.3g. Un comportement non linéaire de réponse des sols est à prendre en compte pour de tels niveaux d'accélération. Les facteurs d'amplification forfaitaires pour ce niveau d'aléa selon le code IBC 2009 sont reportés sur le Tableau 2.

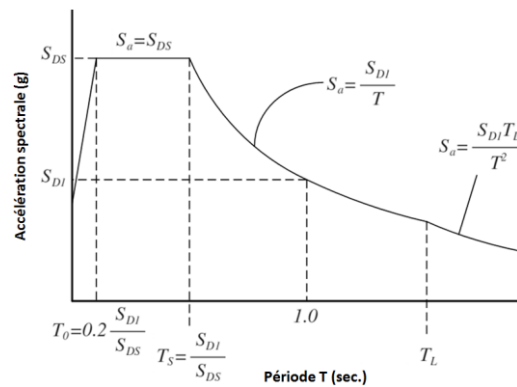


Figure 2. Forme de spectre de réponse forfaitaire

| Ville | S_{DS} (g) | S_{D1} (g) | PGA rocher (g) | T_0 (s) | T_s (s) |
|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------|----------------|
| Port-au-Prince | 0.99 - 1.19 | 0.34 - 0.45 | 0.39 - 0.48 | 0.07 | 0.35 - 0.37 |
| 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 |

Tableau 1. Paramètres des spectres de réponses

| Classe de site NEHRP | F_a | F_v |
|----------------------|-------|-------|
| A | 0.8 | 0.8 |
| B | 1 | 1 |
| C | 1 | 1.3 |
| D | 1 | 1.5 |
| E | 1 | 2.4 |

Tableau 2. Coefficients d'amplifications F_a et F_v pour les classes de sol NEHRP et le niveau d'accélération attendu.

Dans le CNBH projeté, la méthode de calcul des spectres de réponse des classes de sols spécifiques pour les microzonages ne change pas par rapport à l'IBC. La seule différence résidera dans l'application de coefficients d'amplification F_a et F_v spécifiques pour chaque classe de sol et différents des coefficients F_a et F_v de la classification NEHRP.

3. Modèles de colonnes de sol

Pour la prise en compte des effets de site lithologiques, le microzonage vise à définir des classes de sols spécifiques au contexte local basées sur un croisement des informations géologiques, géotechniques et géophysiques collectées sur la zone d'étude.

Les cartes géologiques d'Haïti sont à une échelle de 1 : 250 000 inadaptée à des études de microzonage. Les données géophysiques et géotechniques collectées sont peu nombreuses et très superficielles. Le projet a donc nécessité une révision de la cartographie des faciès géologiques de surface à une échelle 1 : 25 000 et des investigations géotechniques (sondages SPT de 30 m de profondeur) et géophysiques complémentaires (profils MASW et mesures H/V). Les données disponibles sont reportées dans le tableau 3. Les sondages SPT ont aussi permis d'obtenir des carottes de sol pour des essais de caractérisation des sols en laboratoire (granulométrie, poids volumique, teneur en eau, limites d'Atterberg).

| Ville | Sondages SPT | MASW | H/V | colonnes de sols | classes de sol |
|----------------|--------------|------------|------------|------------------|----------------|
| Port-au-Prince | 81 | 93 | 116 | 35 | 6 |
| Cap-Haïtien | 17 | 30 | 55 | 10 | 5 |
| Fort-Liberté | 5 | 16 | 38 | 5 | 3 |
| Ouanaminthe | 6 | 10 | 25 | 4 | 2 |
| Port-de-Paix | 8 | 20 | 51 | 19 | 7 |
| Total | 117 | 169 | 285 | 73 | 23 |

Tableau 3. Données disponibles et nombres de colonnes et de classes de sols modélisées pour chaque ville. Pour les sondages SPT, ne sont comptés ici que les sondages de plus de 15 m de profondeurs. D'autres données géotechniques (puits manuels, sondages CPT) ont été utilisées en complément pour les analyses

Les colonnes de sol sont ensuite analysées à l'aide du logiciel *CyberQuake* (Modaressi et al., 1997) pour calculer leur réponse à une sollicitation sismique au rocher. Le logiciel *CyberQuake* permet de réaliser des calculs non-linéaires sur la base d'un modèle élastoplastique cyclique (Mellal, 1997) appartenant à la famille de modèles multimécanismes d'Hujeux, 1985. Le comportement non-linéaire des sols est souvent sensible à des valeurs à dire d'expert données à des paramètres nécessaires pour la calibration des modèles, en particulier des paramètres qui ne peuvent pas être mesurés directement ou qui n'ont pas de signification physique. *CyberQuake* aide à la détermination de ces paramètres de calcul par des corrélations avec des paramètres mesurables standards. *CyberQuake* permet également la réalisation des calculs linéaires équivalents dans le domaine fréquentiel.

Le mouvement au rocher est défini par quatre accélérogrammes (2 réels et 2 réels modifiés) ayant une réponse spectrale proche du spectre d'accélération au rocher retenu.

Au total, les données ont permis de définir 73 colonnes de sol, pour lesquels des spectres de réponse et des coefficients d'amplifications F_a et F_v ont été calculés. Ces colonnes ont ensuite été regroupées en classes de sol (23 au total pour les 5 microzonages). Nous préférons ici analyser les amplifications au niveau des colonnes de sols, avant le regroupement en classes de sols.

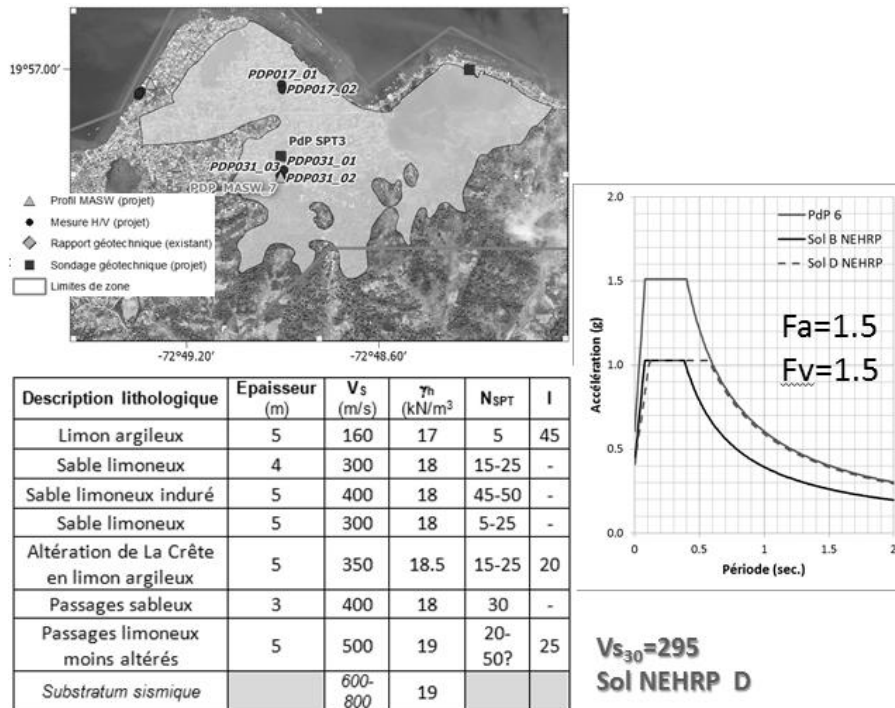


Figure 3. Exemple de colonne de sol sur Port-de-Paix. En haut à gauche, les limites de la zone concernée déduite des contours de faciès lithologiques de surface, avec les données géophysiques et géotechniques existantes. En bas à gauche, la colonne de sol modélisée. A droite le spectre de réponse proposé en comparaison avec le rocher de référence (sol B) et le spectre forfaitaire pour un sol D NEHRP défini par le V_{S30} de la colonne.

4. Coefficients d'amplifications Fa et Fv

Les coefficients d'amplifications obtenus sont illustrés sur la Figure 4 pour des V_{S30} entre 140 m/s et 750 m/s. Pour 9 colonnes sur les 73, les calculs de spectre de réponse ont été effectués en linéaire équivalent : 4 colonnes de Port-au-Prince correspondant à des $V_{S30} > 650$ m/s et les 5 colonnes de Fort-Liberté, pour lesquels nous ne disposons pas d'informations suffisantes pour un calcul non-linéaire.

Alors que pour Fv, on observe bien une tendance de décroissance de Fv lorsque V_{S30} augmente, il ne semble y avoir aucune corrélation entre V_{S30} et Fa. De plus, Fa varie entre 0.9 et 1.9. Les valeurs $Fa > 1.5$ sont fortes par rapport à ce qui est attendu en zone d'aléa sismique élevé. En comparaison, l'IBC préconise des valeurs $Fa=1.0$ bien en dessous de ce qu'on observe ici.

Pour Fv, les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur que ceux de l'IBC (cf. Tableau 2). Il y a néanmoins un décalage des valeurs de V_{S30} : $Fv=1$ n'est observé que pour $V_{S30} > 650$ ms, Fv reste dans une gamme 1.2 -1.6 entre 280 et 650 ms/. En dessous de 280 m/s, Fv varie fortement pour arriver à 2.4 en dessous de 200 m/s. Huang et al. (2010) avaient déjà montré la sensibilité des paramètres Fa et Fv aux gammes de Vs comprises dans une même classe de sol IBC, en particulier pour Fv pour des valeurs d'accélération au rocher inférieures à 0,2g. Dans notre cas nous identifions ce phénomène pour le contexte haïtien, où les accélérations au rocher sont supérieures.

Dans une étude PEER d'actualisation de l'IBC pour sa nouvelle version en 2015, Stewart & Seyhan, 2013 proposent de nouveaux paramètres, avec un F_v plus élevé de 1.8 dans la gamme 180-360 m/s, mieux en accord avec les valeurs 1.5-2.4 que nous observons pour cette classe de sol en Haïti. Néanmoins, dans ce rapport, les valeurs de F_a préconisées restent beaucoup plus faibles que ce qu'on observe ici.

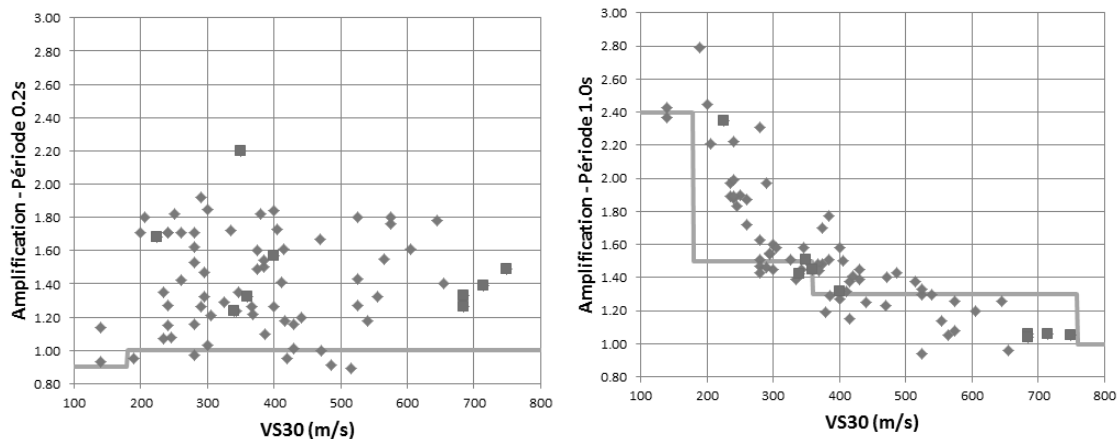


Figure 4. Coefficients d'amplification F_a et F_v obtenus pour les 73 colonnes de sol, en losange avec calculs non linéaires, en carré avec calculs en linéaire équivalent. Les lignes grises montrent les coefficients proposés pour la classification NEHRP et des sollicitations $PGA \sim 0.4g$.

5. Discussions

NEHRP et IBC basent leurs recommandations de caractérisations de site sur les 30 premiers mètres de sol. La classification et les facteurs d'amplifications sont basés sur des modèles californiens (cf. notamment Borchardt 1994). Ces modèles se prolongent bien au-delà des 30 premiers mètres, avec un substratum sismique relativement profond (plusieurs centaines de mètres). Les coefficients F_a et F_v dépendent de ces colonnes entières et pas seulement des 30 premiers mètres.

Lorsque les conditions de sols diffèrent fortement de ce modèle, les coefficients F_a et F_v recommandés par le code IBC ne sont plus adaptés. Lorsque le substratum sismique est peu profond, le coefficient F_a -NEHRP est sous-dimensionné comme le montrent Kim & Yoon (2006), Lee et al. (2012) en Corée ou Anbazhagan et al (2013) pour des sites en Australie, Chine et en Inde par exemple. Inversement pour des sites avec des sédiments profonds, c'est F_v -NEHRP qui cette fois-ci est sous-dimensionnée comme observée sur certains sites du Centre des Etats-Unis (Hashash et Moon, 2011).

Le code IBC ne convient donc pas à tout type de site. La caractérisation des sites non-NEHRP est en cours d'étude aux Etats Unis (Olgun et al., 2014). On cherche également à modéliser des corrections des facteurs de site en fonction de la profondeur du substratum (Tsai et Kishida, 2014)

Les études de microzonages haïtiens confirment que pour les villes étudiées, le substratum rocheux est peu profond et le modèle NEHRP peu adapté. Sur certaines colonnes de sol de Port-au-Prince et de Cap-Haïtien, le substratum rocheux est clairement identifié à moins de 30 m sur les sondages SPT et les profils MASW. Sur d'autres colonnes de sites alluvionnaires, la profondeur du substratum n'est pas atteinte par les sondages. La profondeur du substratum est alors extrapolée, ce qui est une source d'incertitude sur la caractérisation de ces colonnes.

Un autre point important est le calcul non-linéaire du spectre de réponse. La détermination des paramètres du modèle de comportement non linéaire est intégré au logiciel Cyberquake sous forme d'un outil d'aide qui repose sur la méthodologie de détermination proposée par Modaressi et Lopez-Caballero (1999), utilisant diverses corrélations disponibles en littérature, différentes suivant la nature des formations. L'utilisation de cet outil nécessite la connaissance de paramètres géotechniques comme :

- les passants à 60%, 30% et 10% (D60, D30, D10) et le coefficient d'uniformité ($C_u = D_{60}/D_{10}$), issus des analyses granulométriques et sédimentométriques et la densité relative (DR) pour les sols majoritairement sableux ou graveleux ;

- l'Over Consolidation Ratio (OCR) pour les sols comportant une part majoritaire de limon et argile. Ce paramètre représente le degré de surconsolidation du sol, un sol surconsolidé étant un sol ayant subi des contraintes supérieures à celles auxquelles il est actuellement soumis. L'OCR est déduit d'analyses provenant la réalisation d'essais de compression à l'œdomètre.

Pour quelques sites, tous ces paramètres ne sont pas forcément disponibles et ceux manquant sont alors estimées à dire d'expert.

Le niveau élevé d'aléa sismique, oblige à prendre en compte le comportement non-linéaire des sols alors que les données géotechniques ne permettent pas de contraindre tous les paramètres dans certains cas. La sensibilité des résultats dans ces conditions n'a pas pu être évaluée mais on peut supposer que les paramètres peu contraints ont un impact sur l'évaluation des coefficients F_a et F_v .

6. Conclusions

La version préliminaire du Code National de Construction d'Haïti s'appuie sur le code IBC pour ses normes de dimensionnement sismiques. Les coefficients F_a et F_v proposés pour la classification de sol NEHRP correspondent à des modèles de colonnes de sols qui semblent éloignées de ceux rencontrées lors des études de microzonage sismique en Haïti, notamment du fait d'un substratum sismique beaucoup moins profond.

Disposer de normes parasismiques est indispensable. Le CNBH s'appuie donc sur un code international, l'IBC, parmi les plus répandus mais avec des normes de dimensionnement pas forcément bien adaptées. La prise en compte du contexte local avec les spectres de microzonages sismiques s'avère alors d'autant plus important.

Les colonnes de sol doivent être établies dans l'idéal jusqu'à la profondeur du substratum sismique. Or pour les microzonages sismiques en Haïti, dans beaucoup de cas, on a peu d'informations en dessous de 30m. Ces « fonds » de colonnes reposent sur des hypothèses peu contraintes qui peuvent impacter l'évaluation des spectres spécifiques.

Le niveau d'aléa élevé nécessite de prendre en compte les effets non linéaires du sol, ce qui implique des paramètres géotechniques supplémentaires qui ne sont pas forcément tous fournis par les études « standards ».

Ces microzonages sismiques effectués en Haïti ont montré que les paramètres de non linéarité et la profondeur du substratum sont des facteurs particulièrement importants à prendre en compte pour le calcul de spectres de réponse spécifiques adaptés au contexte local. Des études de sensibilité sont souhaitables. Les données de mesures correspondantes existantes sont rares et des investigations géotechniques nouvelles et mieux adaptées seraient nécessaires pour affiner ces résultats.

7. Bibliographie

Anbazhagan P., Asce M., Sheikh M.N., Parihar A., «Influence of Rock Depth on Seismic Site Classification for Shallow Bedrock Regions», *Natural Hazards Review*, vol 14, 2013, p. 180-121.

Borcherdt R. D., «Estimates of site-dependent response spectra for design (Methodology and Justification)», *Earthquake Spectra*, vol. 10, 1994, p. 617-653.

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

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

Hashash, Y.M. A.S. Moon S., Site amplification factors for deep deposits and their application in seismic hazard analysis for Central U.S., USGS. USGS/NEHRP Grant: G09AP00123, 2011.

Huang Y.-N., Whittaker A., Luco N., «NEHRP site amplification factors and the NGA relationships», *Earthquake Spectra*, vol. 26, n°2, 2010, p. 583-593.

Hujeux, J.C., Une loi de comportement pour le chargement cyclique des sols, *Génie Parasismique*, V. Davidovici (ed.), Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1985, p. 287-302.

IBC, *International Building Code*. International Code Council, ICC, 4051 West Flossmoor Road, Country Club Hills, IL 60478, USA, 2009.

Kim D-S., Yoon J-K., «Development of new site classification system for the regions of shallow Bedrock in Korea», *Journal of Earthquake Engineering*. Vol. 10, n°3, 2006, p. 331-358.

Lee S.H., Sun C.G., Yoon J.K., Kim D.S., «Development and Verification of a New Site Classification System and Site Coefficients for Regions of Shallow Bedrock in Korea», *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 16, 2012, p. 795-819.

Mellal A., Analyse des effets du comportement non linéaire des sols sur le mouvement sismique, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris, France, 2007.

Modaressi H., Foerster E., Mellal A., «Computer aided seismic analysis of soils», *Proceedings of the 6th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics*, NUMOG VI, 2-4 July 1997, Montréal, Québec, Canada.

Modaressi A. Lopez-Caballero, F., Seismic ground displacements as a tool for town planning, design and mitigation, Third Progress Report, ECC Project ENV4-CT97-0392, Ecole Centrale de Paris, France, 1999.

NEHRP, *Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures*, FEMA P-750/2009 Edition, 2009.

Olgun C., Eddy M., Godfrey E., Chapman M., Tilashalsk, M., Martin II J., Camp III W., «Investigation of Seismic Site Amplification for Non-NEHRP Site Conditions: Site Response Study of Columbia» , *Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability*, 23-26 February 2014, Atlanta, Georgia, USA, American Society of Civil Engineers (ASCE), 2014, p. 1157-1166.

Stewart J.P., Seyhan E., Semi-Empirical Nonlinear Site Amplification and its Application in NEHRP Site Factors , PEER report 2013/13, Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2013.

Tsai C.C., Kishida T. « Depth-dependent site factors with soil nonlinear effects», *Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering Frontiers of Earthquake Engineering*, July 21-25, 2014 Anchorage, Alaska.