Comparaison expérimentale des méthodes MASW et H/V bruit de fond dans l'estimation des effets de site lithologique dans le bassin de Damien



Jean B.J.

Unité de Recherche en Géoscience (URGéo) - Faculté des Sciences -Université d'État d'Haïti, Port-au-Prince, Haïti Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics, Port-au-Prince, Haïti St Fleur S. Géoazur, Université de Nice-Sophia Antipolis, Centre National de Recherche Scientifique (UMR 7329)

Observatoire de la Côte d'Azur, 250 av Albert Einstein, 06560 Valbonne, France Unité de Recherche en Géoscience (URGéo) - Faculté des Sciences - Université d'État d'Haïti, Port-au-Prince, Haïti

RÉSUMÉ

L'objectif de cet article est de comparer les résultats obtenus lors des campagnes d'essais sismiques par les méthodes MASW et H/V bruit de fond, réalisées dans la plaine de Damien (Port-au-Prince, Haïti). Ces deux méthodes utilisent la propagation des ondes dans les couches superficielles et permettent d'identifier les interfaces entre les couches présentant des contrastes d'impédance et/ou de vitesse plus ou moins importants. Ces contrastes sont souvent à l'origine des effets de site lithologiques. Un rapprochement entre le contenu fréquentiel des ondes indiqué par la méthode H/V et la vitesse de cisaillement indiquée par la méthode MASW, est fait en fonction de l'épaisseur des couches. La confrontation de ces deux types de résultats dans la plaine de Damien (fréquences fondamentales et vitesses de cisaillement), contribue ainsi à l'amélioration du choix des techniques d'estimation d'effets de site lithologique, dépendamment des caractéristiques géophysiques des sols.

ABSTRACT

The objective of this paper is to compare the results obtained during the campaigns of seismic testing by MASW method and H/V-noise technique, made in the Damien's plain (Port-au-Prince, Haiti). Both methods use the propagation of waves in the surface layers and identify the interfaces between the layers with impedance contrasts and/or important speeds. These contrasts are often the source site effects lithological. A connection between the frequency content of the wave indicated by H/V method and the shear-wave velocity indicated by MASW method is made according to the thickness of the layers. The comparison of these two types of results in the Damien's plain (fundamental frequencies and shear- wave velocity) helps to improve the choice of estimation techniques site effects lithological, depending on the geophysical characteristics of the soil.

1 INTRODUCTION

Il est reconnu depuis longtemps que l'amplification d'un site est un facteur clé dans la détermination du degré de dommages causés par les tremblements de terre, et donc il a fait l'objet de beaucoup de recherche scientifique, à la fois empirique et théorique (Bonilla et al., 1997 ; Burjanek et al., 2014 ; Cultrera et al., 2014). Parmi les différentes méthodes introduites pour estimer la réponse du site, on a celle fournie par le rapport H/V des données de mouvements de terrains. Le plus souvent, H et V sont respectivement des spectres de Fourier de l'amplitude des composantes horizontale et verticale du mouvement de terrain. La méthode H/V est attrayante d'un point de vue pratique, car elle estime l'amplification à partir d'une seule station et peut être obtenu facilement et à moindre coût. Cependant, il est connu que le H/V sous-estime généralement l'amplitude de l'amplification du site. Un paramètre alternatif pour décrire la rigidité du dépôt en sismologie d'ingénierie est le V_{S30}, la vitesse moyenne des ondes de cisaillement sur une profondeur de 30 m. Le V_{S30} dispose d'un certain nombre d'applications, dont les principaux sont la classification simplifiée d'un site en

termes de sa réponse sismique dans les codes de construction (Building Seismic Safety Council (BSSC) ; Comité Européenne de Normalisation (CEN) ; Eurocode 8 ; National Building Code of Canada (NBCC) ; National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP)). Il a également été utilisé comme une variable explicative des effets de site dans un certain nombre d'équations de Prédiction de mouvement du sol (GMPEs). V_{S30} est une mesure relativement simple qui est bien corrélée avec l'amplification de site. Diverses méthodes géophysiques sont utilisées pour mesurer les vitesses des ondes de cisaillement, et par conséquent le V_{S30} du site.

Cet article présente la technique et les résultats des essais H/V et MASW réalisés sur le site de l'Université d'Etat d'Haïti (UEH) à Damien afin de fournir des indications sur l'estimation des effets de site dans la plaine. Financé par la Commission Universitaire pour le Développement (CUD), cette campagne représente les efforts conjugués de plusieurs chercheurs de l'Unité de Recherche en Géoscience (URGéo) et des étudiants finissants en Génie Civil (GCIII) de la Faculté des sciences (FDS) de l'UEH.



Figure 1. Carte de faciès géologiques et des failles de l'agglomération de Port-au-Prince et localisation du site de Damien (Terrier et al., 2014 modifié)

Dans cette étude, nous examinons la corrélation entre le V_{S30} et le rapport H/V. Une telle corrélation est utile pour mieux comprendre les forces et les faiblesses de ces variables de description d'amplification de site.

En comparant les paramètres H/V et V_{S30} comme variable de description d'amplification de site, H/V est en général moins cher et plus facile à obtenir pour un site spécifique. En outre, le rapport H/V porte des informations sur la réponse à partir de gisements profonds, par rapport au V_{S30} qui considère uniquement la partie supérieure à 30 m. Enfin, H/V porte l'information riche sur le contenu de la fréquence et le degré d'amplification (par exemple, une fonction de transfert complet), tandis que V_{S30} est un peu plus limitée en l'utilisant comme seul paramètre de description d'amplification de site (Ghofrani et Atkinson, 2014).

2 PRESENTATION DU SITE DE DAMIEN ET CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le site de Damien se trouve dans une portion de la plaine du Cul de Sac située dans la Commune de Cité Soleil et orienté NW-SE. Le site d'études est un terrain partiellement vierge d'une trentaine d'hectares (avec des camps de réfugiés du séisme du 12 janvier 2010, des porcheries, des abattoirs, des canaux d'irrigations, des puits de forages, des maisons habitables, des végétations, etc.). Ce site expérimental présente une topographie relativement plane (variations très faibles de pente 0,5 à 0,6%) et peu accidentée.

D'un point de vue géologique, la zone de Damien est située dans la dépression du Cul de Sac, une grande vallée de Rift, dont la plupart repose sur des jeunes dépôts de sédiments quaternaires. La zone d'études fait donc parti des faciès appartenant à la formation du quaternaire, alluvions cônes d'épandages, éboulis, mangroves, d'après la carte géologique de la République d'Haïti réalisée par le Bureau des Mines et de l'Énergie (BME). Dans la carte de microzonage de Port-au-Prince, plus précise, cette zone se trouve dans des dépôts/surfaces de terrasse alluviale supérieure bordant les cours d'eau majeurs et les marges des vallées intermassifs (Bachhuber et al. 2010). La figure 1 donne la position de cette zone sur la carte géologique de Port-au-Prince.

3 EFFETS DE SITE ET PROSPECTION H/V

L'étude des effets des conditions locales du site est l'un des objectifs les plus importants du génie parasismique. La condition géologique locale du site est en train d'émerger comme l'un des facteurs dominants qui régissent la variation de mouvement du sol et la détermination de l'aléa sismique spécifique au site. Ainsi, les dommages aux biens et pertes en vies humaines dans les tremblements de terre sont souvent une conséquence directe des conditions géologiques locales des sites.

En raison des préoccupations au sujet des structures construites sur une grande variété de sites géologiques, il est important de mesurer l'amplification du mouvement du sol à travers les régions métropolitaines dans les zones sujettes aux séismes. La technique empirique le plus fréquemment utilisé pour l'estimation de la réponse du site a été la méthode du rapport spectral (Borcherdt, 1970; Borcherdt et Gibbs, 1976). Cette approche considère le rapport entre le spectre à un site d'intérêt et le spectre à un site de référence, qui est habituellement un site au rocher à proximité.

La méthode du rapport spectral, cependant, dépend de la disponibilité d'un site de référence adéquat. Un tel site peut ne pas être toujours disponible, et autres techniques appelées méthodes de site non référencé ont été appliquées à des études de réponse de site dans ces cas. L'une de ces méthodes pour estimer la réponse du site utilise le rapport spectral entre les spectres horizontale et verticale (H/V) de la fenêtre d'onde S pour chaque site (Lermo et Chavez-GARCIA, 1993). Cette méthode est basée sur la technique dite de la fonction réceptrice appliquée aux études du manteau supérieur et de la croûte en utilisant les enregistrements télé séismiques (Langston, 1979). L'une de ces techniques consiste, à partir de l'enregistrement du bruit de fond ambiant, à calculer le rapport spectral entre les composantes horizontales et la composante verticale : c'est la méthode appelée couramment H/V (Nogoshi, 1971, Nakamura, 1989 et 1996).

Les principes physiques sous-tendus par cette méthode ne sont actuellement pas tous bien cernés. Cependant, de nombreuses expériences ont comparé cette méthode avec des méthodes classiques et ont montré sa capacité à évaluer la fréquence propre du site puis, en conjonction avec d'autres éléments, les effets de site proprement dits (Lachet et Bard, 1994; Field et Jacob, 1995). Le rapport H/V donne avec une bonne précision la fréquence de résonance fondamentale du site (ou fréquence propre), mais également une amplification spectrale relative qui dépend notamment du mode de traitement du signal. En définitive, la réalisation d'une

campagne de mesures ponctuelles H/V permet, en première approche, de déterminer en chaque point de mesure la fréquence propre du sol.

Lorsque la géométrie du site peut être assimilée à un milieu mono-dimensionnel, on peut relier l'épaisseur d'une couche sédimentaire meuble (ayant un fort contraste d'impédance avec le substratum rocheux) à sa fréquence de résonance fondamentale f_0 par l'expression :

$$H = V_s/4f_0$$
 [1]

Avec, H : épaisseur moyenne de la couche meuble,

 V_s : vitesse moyenne de propagation des ondes S dans la

couche meuble, f_0 : fréquence de résonance fondamentale de la couche meuble.

La connaissance de deux paramètres permet donc d'estimer le troisième (V_s et f₀ connues donnent H par exemple), (Sabourault et Bitri, 2001).

3.1 Mesures H/V

32 mesures H/V (HV1 à HV32) ont pu être réalisées au cours de cette campagne de mesures à Damien. Les mesures ont été effectuées dans l'objectif de voir si des effets de site sont détectables avec cette méthode. Les résultats obtenus de ces mesures sont présentés et interprétés dans les paragraphes ci-dessous après vérifications des critères sur la fiabilité de la courbe H/V tels que le critère sur la longueur de la fenêtre à analyser, le critère sur le nombre de fenêtre analysée, le critère sur l'écart type et les critères pour des pics clairs en H/V. La figure 2 donne le plan de localisation de ces 32 essais.



Figure 2. Localisation des essais H/V

3.2 Analyse et interprétation des résultats

Les résultats H/V obtenus pour certains points du site sont moyennement hétérogènes et présentent des caractéristiques difficiles à interpréter. Ces points présentent des pics de fréquences et des amplifications élevées. Huit mesures (HV1, HV2, HV3, HV4, HV6, HV9, HV12 et HV16) montrent des pics H/V relativement bien marqués centrés sur les fréquences de 5Hz. Trois mesures (HV5, HV7 et HV15) mettent en évidence des pics de fréquences de 6Hz pour les effets de site. Des pics d'amplifications élevés et assez larges ont été aussi observés à des fréquences variées et la forme du rapport H/V est inhabituelle et les fréquences obtenues sont beaucoup trop hautes pour les exploiter sur la gamme de base travaillée (1 - 40 Hz).

Les autres mesures H/V (HV11, HV13, HV14, HV17, HV18, HV19, HV20, HV21, HV22, HV23, HV24, HV25, HV26, HV27, HV28, HV29, HV30, HV31 et HV32) sont très homogènes et indiquent clairement un effet de site avec des fréquences de résonance comprises environ

entre 3 et 4Hz. L'ensemble des spectres H/V obtenus et des enregistrements avec des pics bien marqués correspondants ont été également analysés dans cette étude. La présence de ces pics de fréquence bien marqués dans le rapport spectral H/V indique que les mouvements du sol peuvent être amplifiés par les effets de site lithologiques. Mais, avec seulement de simples mesures H/V, on ne peut quantifier ni l'amplification topographique, ni l'amplification géologique.



Figure 3. Zonage du sous-sol de Damien à partir des mesures H/V analysées avec Grilla

L'analyse des résultats des différentes mesures H/V, nous permet d'identifier quatre (4) zones de fréquences de résonance fondamentales différentes (figure 3) :

- zone I : f₀ < 4Hz (peu d'amplification)
- zone II : $4Hz < f_0 < 5Hz$ (amplification moyenne)
- zone III : 5Hz < f₀ < 10Hz (amplification élevée)

zone IV : f₀ > 10Hz (amplification très élevée)

Où f₀ est la fréquence de résonance fondamentale.

La figure de zonage du sous-sol de Damien à partir des mesures H/V analysées avec Grilla présentent des valeurs de f₀ croissantes suivant la direction Nord-Ouest / Sud-Est. Ce résultat résulte probablement de la variation

de la profondeur du bassin (l'épaisseur de la couche alluvionnaire du bassin augmente dans cette direction). Pour des constructions futures sur le site d'étude, il est fortement déconseillé d'envisager des bâtiments de période propre proche ou identique des périodes de résonances fondamentale du site.

En couplant ces mesures H/V avec des mesures du type « downholes », on peut alors retrouver le toit du substratum sismologique. Donc, il est nécessaire alors d'avoir des informations complémentaires (données géotechniques, mesures géophysiques de surface) afin de mieux cerner ces phénomènes. La figure 3 donne la répartition des valeurs H/V sur le site et le tableau 1 les positions des points H/V et les fréquences des pics fo observées.

Code	Site	Longitude ⁰W	Latitude °N	Fréquence f ₀ (Hz)
HV1	Damien	72º17.5537	18º35.7339	5.25
HV2	Damien	72º17.6427	18º35.6919	11.94
HV3	Damien	72º17.5407	18º35.6670	5.09
HV4	Damien	72º17.5668	18º35.6805	13.88
HV5	Damien	72º17.5702	18º35.6400	6.91
HV6	Damien	72º17.6510	18º35.6231	5.31
HV7	Damien	72º17.7003	18º35.6851	6.88
HV8	Damien	72º17.7747	18º35.7201	9.75
HV9	Damien	72º17.8334	18º35.7494	5.25
HV10	Damien	72º17.8349	18º35.7270	8.22
HV11	Damien	72º17.6536	18º35.7890	4.44
HV12	Damien	72º17.7008	18º35.7733	5.91
HV13	Damien	72º17.7474	18º35.8051	3.84
HV14	Damien	72º17.7137	18º35.8128	4.72
HV15	Damien	72º17.6365	18º35.7503	6.69
HV16	Damien	72º17.6950	18º35.7202	5.19
HV17	Damien	72°17'54.39"	18°35'53.13"	3.59
HV18	Damien	72º17.8501	18º35.8570	3.84
HV19	Damien	72º17.8209	18º35.8139	3.78
HV20	Damien	72º17.8233	18º35.8859	3.59
HV21	Damien	72º17.8110	18º35.8492	3.94
HV22	Damien	72º17.7620	18º35.8411	4.63
HV23	Damien	72º17.7940	18º35.8604	4.69
HV24	Damien	72º17.9090	18º35.8537	3.78
HV25	Damien	72º17.8742	18º35.8948	4.38
HV26	Damien	72º17.9236	18º35.7982	3.72
HV27	Damien	72º17.8781	18º35.8079	3.84
HV28	Damien	72º17.9455	18º35.7481	3.72
HV29	Damien	72º17.9772	18º35.7785	4.16
HV30	Damien	72º17.9090	18º35.8537	3.94
HV31	Damien	72°17'57.56"	18°35'54.87"	3.59
HV32	Damien	72°17'54.71"	18°35'55.66"	3.78

Tableau 1. Position des points H/V et fréquences des pics observés avec Grilla

4 ONDES DE SURFACE - V_{S30}

Des essais sismiques ont été réalisés dans le cadre de cette étude géotechnique préliminaire. La première catégorie à être réalisée est le Microtremor Array Measurements (MAM). C'est une méthode passive, utilisant l'enregistrement des bruits de fond. Ces bruits sont générés par les activités de la ville (automobiles, usines, etc.). Ces essais permettent de déterminer le V_{s30} qui est la moyenne des vitesses de cisaillement sur les 30 premiers mètres (figure 4 et tableau 2). Ce paramètre permet de classer le sol selon le code IBC (International Building Code). Ce classement sera utile pour construire le spectre de réponse utile en dimensionnement parasismique des structures des futurs bâtiments de l'UEH.



Figure 4. En haut : Essai S5 MASW 1D, Vs30. En bas, Essai S5 MASW 2D

Tableau 2. Position des points Vs et classement sismique $V_{\mbox{s}30}$

Code	Site	Longitude ⁰ W	Latitude ⁰N	V _{S30} (m/s)
S1	Damien	72°17'57.56"	18°35'54.87"	300
S2	Damien	72º17.8742	18º35.8948	343
S3	Damien	72º17.8233	18º35.8859	434
S4	Damien	72º17.8781	18º35.8079	319
S5	Damien	72º17.9090	18º35.8537	350
S6	Damien	72º17.9772	18º35.7785	370
S7	Damien	72º17.5537	18º35.7339	336
S8	Damien	72º17.7747	18º35.7201	343
S9	Damien	72º17.9090	18º35.8537	345
S10	Damien	72º17.7008	18º35.7733	416

S11	Damien	72º17.5702	18º35.6400	438
S12	Damien	72º17.7003	18º35.6851	393
S13	Damien	72º17.7474	18º35.8051	390
S14	Damien	72º17.5407	18º35.6670	422
S15	Damien	72º17.6536	18º35.7890	346
S16	Damien	72°17'54.71"	18°35'55.66"	299

La seconde catégorie d'essais réalisée à Damien est le Multi-channel Analysis of Surface Waves 2D (MASW 2D). Cet essai donne une image 2D du sous-sol (figure 4). Douze (12) géophones ont été utilisés pour ces essais avec une distance de 4 m entre géophones. C'est un essai qui se réalise en mode « actif » c'est-à-dire que la source de vibrations dans ce cas est un marteau que l'opérateur frappe sur une plaque. Ces frappes sont localisées à mi-distance entre deux (2) géophones et à 2 m du premier et du dernier géophone.

Huit essais de ce type ont été réalisés sur ce site et les résultats obtenus nous permettront de connaître l'architecture des différentes couches de sol et de juger de l'homogénéité des terrains sur le site. Les points d'essai MASW 2D sont les points : S1 - S3 - S5 - S8 - S9 - S10 - S11 - S13.

Après analyse des images obtenues pour les MASW 2D, on constate que sur la superficie du site, la vitesse des terrains augmentent avec la profondeur, les vitesses variant entre 150 et 400 m/s en général. On remarque qu'entre 0 et 4 m de profondeur, les vitesses sont généralement inférieures à 250 m/s. Ces vitesses peuvent correspondre à des sols ayant un potentiel de liquéfaction pendant un séisme si certaines conditions géotechniques sont vérifiées (teneur en eau, granulométrie, etc.).



Figure 5. Classification du sous-sol de Damien à partir des ondes de surface



Figure 6. Amplitude et fréquence des pics en fonction des V_{S30} (échelle logarithmique). A gauche est représenté le V_{S30} en fonction de la fréquence de pic (f₀) et à droite le V_{S30} en fonction de l'amplitude du pic (A₀)

5 ESTIMATION DE VS30 D'UN SITE A PARTIR DES CARACTÉRISTIQUES H/V

Nous examinons la relation entre f₀, A₀ et V_{S30} sur les sites individuels afin de déterminer si nous pouvons utiliser H/V sur les sites instrumentés pour estimer la valeur de V_{S30}. Il apparait que les rapports spectraux H/V montrent un comportement systématique : l'amplitude des pics (A₀) H/V pour les classes de sols mous est inférieure à celle des classes de sol plus rigides. Tandis que la fréquence de pics (f₀) augmente systématiquement à partir de 3.5 Hz pour les sites avec V_{S30} comprises entre 300 et 400 m/s et à partir de 5 Hz pour les sites avec V_{S30} supérieure à 400 m/s (figure 6). En outre, nous faisons les observations suivantes pour les données H/V de Damien : (1) aucune valeur de pics $f_0 < 3.5$ Hz sont reconnus à partir des rapports H/V; (2) les valeurs de fréquence de pics (f₀) pour les sites de classes C (sol raides) sont quasiment supérieures à 4 Hz, sans doute parce que les sites raides (classe C) à Damien comprennent généralement des sols peu profonds sur une couche plus dure, par conséquent, il y a peu de relation entre fo et V_{S30} pour fo supérieur à 4 Hz, tandis que des valeurs de fo autour de 4 Hz diagnostiquent un site à faible V_{S30}.

Afin de décrire le comportement général des spectres H/V en fonction du V_{S30}, l'amplitude et la fréquence des pics des spectres sont déterminées et tracées en fonction des valeurs de V_{S30}, en considérant les données du site de Damien. La figure 6 montre les tendances globales de A₀ et f₀ pour les points de ce site. Les tendances générales sont désignées quantitativement par (équations 2 et 3 et figure 6):

$$\begin{aligned} & \ln(V_{s30}) = 70.56 \ln(f_{0-pic}) + 253.7 & [2] \\ & \ln(V_{s30}) = 45.46 \ln(A_{-pic}) + 298 & [3] \end{aligned}$$

La relation entre H/V et $V_{\rm S30}$ peut varier d'une région à une autre en fonction des conditions prédominantes du sol.

D'autres chercheurs ont fait des études similaires sur d'autres sites. Ghofrani et al. (2014) ont proposé également quatre équations pour les sites NGA-II et Japon (équations 4, 5, 6 et 7) :

$log(V_{s30}) = 0.20 log(f_{0-pic}) + 2.56 (NGA-II)$	[4]
$log(V_{s30}) = 0.38 log(f_{0-pic}) + 2.35 (Japan)$	[5]
$log(V_{s30}) = -0.46 log(A_{0-pic}) + 2.86 (NGA-II)$	[6]
$\log(V_{s30}) = -0.64 \log(A_{0-pic}) + 2.88 (Japan)$	[7]

6 VARIABILITE DE H/V AVEC VS30

Dans cette analyse, nous présentons les rapports H/V regroupés par V_{S30} (figure 7). Les spectres moyens pondérés dans chaque gamme de V_{S30} du site ont été calculés. Sur cette figure, les spectres moyens H/V montrent un comportement systématique. L'amplitude (A₀ \approx 3.3) des H/V pour les classes rigides (V_{S30} > 400 m/s) est supérieure aux classes plus douces (V_{S30} < 300 m/s) pour notre site (A₀ \approx 2.6). Les pics de fréquence augmentent légèrement en fonction des gammes de V_{S30} (f₀ \approx 4 pour les classes douces et f₀ \approx 6 pour les classes rigides).



Figure 7. Spectres moyens pondérés regroupés sur la base des V_{S30}. Les chiffres donnés dans la légende sont les limites de vitesses V_{S30} inférieures et supérieures des ondes de cisaillement du site

7 CONCLUSIONS

Dans cette étude, nous considérons les implications de regroupement des sites en fonction de leurs caractéristiques H/V et V_{S30}. La motivation est que le paramètre V_{S30} peut ne pas être un bon indicateur pour les sites avec les gisements plus profonds (grande profondeur jusqu'au substratum rocheux). Dans ces cas, la fréquence de pic du spectre H/V peut être une meilleure variable de site, car elle transmet des informations pour des structures de sol avec des profondeurs supérieures à 30 m. L'idée de la classification de site en fonction de la période prédominante a été proposée par Kanai et Tanaka, 1961. Sur le site d'étude (Damien), la période fondamentale du site est détectée par des mesures de Tromino et sera utilisée dans la pratique pour le dimensionnement du nouveau campus de l'Université d'État d'Haïti. L'avantage de cette technique de classification est que les profils de couches géologiques profondes et des vitesses d'ondes de cisaillement élevées sont mises en correspondance avec la fréquence de résonance. Pour cette étude, nous avons choisi les fréquences de pic f₀ du spectre H/V à chaque point, et les valeurs de V_{S30} associées. Cette étude montre que le V_{S30} peut être estimé à partir du spectre H/V; la relation varie avec la région en raison de la variabilité régionale dans des conditions de sol typiques. L'estimation de V_{S30} facilite l'estimation de la réponse du site, car il y a une multitude d'études empiriques reliant la réponse du site au paramètre V_{S30}.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à souligner la contribution d'autres collègues dans cet article, spécialement Boisson D. (FDS-URGéo), Thimus J.-F. (UCL), Schroeder C. (ULB), Joseph Y.-F. (LNBTP), Remarais L. (BME) et Hyppolite Fils M. (MTPTC). Ils remercient l'Unité de Recherche en Géosciences de la Faculté des Sciences de l'Université d'État d'Haïti et particulièrement le Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics d'Haïti pour son soutien financier à leur participation à GéoQuébec 2015.

RÉFÉRENCES

- Bachhuber, J.L., Rathje, E.M., Cox, B.R., Dulberg, R.A., Kottke, A. et Wood, C. 2010. Cartes géologiques de Port-au-Prince, Haïti. Rev.1.
- Bonilla, L.F., Steidl, J.H., Lindley, G.T., Tumarkin, A.G. and Archuleta, R.J. 1997. Site amplification in the San Fernando Valley, California: variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods. Bulletin of the Seismological Society of America, 87(3), 710-730.
- Borcherdt, R.D. 1970. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. Bulletin of the Seismological Society of America, 60(1), 29-61.
- Borcherdt, R.D. and Gibbs, J.F. 1976. Effects of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, 66(2), 467-500.

- Burjánek, J., Edwards, B. and Fäh, D. 2014. Empirical evidence of local seismic effects at sites with pronounced topography: A systematic approach. Geophysical Journal International, ggu014.
- Cultrera, G., De Rubeis, V., Theodoulidis, N., Cadet, H. and Bard, P.Y. 2014. Statistical correlation of earthquake and ambient noise spectral ratios. Bulletin of earthquake engineering, 12(4), 1493-1514.
- Field E.H. and Jacob K.H. 1995. A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference site dependent. Bull Seismol Soc Am 1995;85:1127-43.
- Ghofrani, H. and Atkinson, G.M. 2014. Site condition evaluation using horizontal-to-vertical response spectral ratios of earthquakes in the NGA-West 2 and Japanese databases. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 67, 30-43.
- Jean, B.J., Boisson, D., Thimus, J.-F. et Schroeder, C., 2013. Evaluation des risques de liquéfaction sur le site de Damien (Haïti). Société canadienne de géotechnique, SGC, GéoMontréal 2013, Canada, Paper 494, 8p.
- Jean, B.J. et St Fleur, S. 2014. Applications des méthodes de rapports spectraux dans l'estimation des effets de site : cas de Damien (Haïti). Société canadienne de géotechnique, SGC, GeoRegina 2014, Canada, Paper 188, 8p.
- Kanai K. and Tanaka T. 1961. On Microtremors VIII. Bull Earthq Res Inst Tokyo Univ 1961;40:97-114.
- Lachet, C., Hatzfeld, D., Bard, P-Y., Theodulidis, N., Papaioannou, C., Savvaidis, A. 1996. Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece): comparison of different approaches. Bull Seismol Soc Am 1996; 86 : 1692-703.
- Langston, C.A. 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves, J. Geophys. Res. 84, 4749-4762.
- Lermo, J. and Chavez-Garcla, F.J. 1993. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, Bull. Seism. Soc. Am. 83, 1574-1594.
- Nakamura Y. A. 1989. Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, 30, 25-33.
- Nogoshi, M. and Igarashi, T. 1971. On the amplitude characteristics of microtremor (part 2). Jour. Seism. Soc. Japan, 24, 26-40.
- Sabourault, P. et Bitri, A. 2001. Détermination de la géométrie des formations sédimentaires de la vallée du Grésivaudan, autour du forage Montbonnot (Isère): Utilisation des méthodes H/V et SASW. Rapport BRGM RP, 51161.
- Terrier, M., Bialkowski, A., Nachbaur, A., Prépetit, C. and Joseph, Y.-F. 2014. Revision of the geological context of the Port-au-Prince, Haiti, metropolitan area: implications for seismic microzonation. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., 2, 1613-1635. www.nathazards-earth-syst-sci-discuss.net/2/1613/2014/.