Microzonage sismique de la ville des Cayes à Haïti

B. JEUDY[1], M. KARRAY, P. PAULTRE
Département de génie civil – Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada
[1]Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) / Port-au-Prince, Haïti

ABSTRACT

During an earthquake, we find that the recorded damage not only depend on the released energy and construction typology, but also the soil. The soil knowledge is one of the ways to reduce the seismic risk. This article, on seismic microzoning of the city of Cayes in south-west of Haïti, aims at the determining the soil nature in order to mitigate the earthquakes consequences. In this study, the spectral analysis of surface waves (SASW) testing were executed in order to identify the shear waves velocity (Vs) profiles. SPT and dynamic penetrometer (PD) testings were collected and correlations between their values and Vs were also used to develop velocity profiles. The categorization of soil, based on the Vs30 parameter, identified three soils classes: C in mountainous region, D in plain area and E, near the coast.

RÉSUMÉ

Durant un tremblement de terre, on constate que les dégâts enregistrés dépendent non seulement de l'énergie libérée et de la typologie des constructions, mais aussi du sol. La connaissance du sol est l'un des moyens permettant de réduire le risque sismique. Cet article, portant sur le microzonage sismique de la ville des Cayes dans le sud-ouest d'Haïti, vise la détermination de la nature des sols en vue de mitiger les conséquences des séismes. Dans cette étude, des essais d'analyse spectrale des ondes de surface (SASW) ont été exécutés pour déterminer les profils de vitesse des ondes de cisaillement (Vs). Des essais SPT, de pénétromètre dynamique (PD) ont été collectés et des corrélations entre leurs valeurs et *Vs* ont également servi à établir des profils de vitesse. La catégorisation des sols, sur la base du paramètre *Vs*30, fait ressortir trois classes de sol : C en région montagneuse, D en région plaine et E à proximité des côtes.

1 INTRODUCTION

Un microzonage sismique est une technique qui vise la prise en compte des effets de site (géologie, topographie, glissement de terrain, etc.) sur l'aléa sismique local ou régional. Il peut apporter les informations suivantes :

- la caractérisation et la délimitation des classes de sol en considérant la géologie, la topographie et les mouvements de terrain ;
- la réponse des sols aux sollicitations sismiques ;
- l'évaluation du niveau de risque sismique sur les ouvrages, l'économie et les personnes.

Tenant compte des apports du microzonage, il est largement employé dans l'élaboration d'un modèle de prévision des mouvements du sol dans les régions menacées par les séismes. Ainsi, après le tremblement de terre du 12 janvier 2010 à Haïti, un programme de microzonage sismique a été élaboré pour diverses villes du pays en vue de prendre en compte le risque sismique.

Cet article porte sur le microzonage sismique de la ville des Cayes, localisée sur la côte sud d'Haïti à 154 km de Port-au-Prince. Cette ville est localisée entre 18,175° et 18,35° de latitude Nord et entre -73,675° et -73,875° de longitude Ouest. Elle a une superficie d'environ 219 km^2, dont plus de 60 % en plaine, et une population estimée à plus de 144,000 habitants (IHSI, 2012). Elle comprend six sections communales dont Bourdet, Frontfred et Laurent qui possèdent une topographie essentiellement plate, et Laborde, Mercy et Boulmier sont en grande partie montagneuses (Figure 1). Les régions plaines présentent une faible inclinaison variant de 5/1000 à 7,5/1000 (Woodring et al., 1924).

La ville s'étend sur trois faciès géologiques sédimentaires qui comprennent les dépôts alluvionnaires du quaternaire, Qa (moins 2,6 Ma) constituant les plaines, les calcaires marneux pélagiques du miocène moyen, mm (11 à 16 Ma) et les calcaires de biomicrites pélagiques de l'éocène moyen et supérieur, EMS (33 et 41 Ma) qui forment les régions montagneuses et les petites collines émergées dans la plaine.

2 METHODOLOGIE ET LOCALISATION DES MESURES

Ce microzonage consiste à collecter des données géologiques, géophysiques et géotechniques pour définir et cartographier les terrains homogènes sur la base de la vitesse des ondes de cisaillement du sol.

Pour atteindre cet objectif, les quatre étapes ci-dessous ont été suivies :

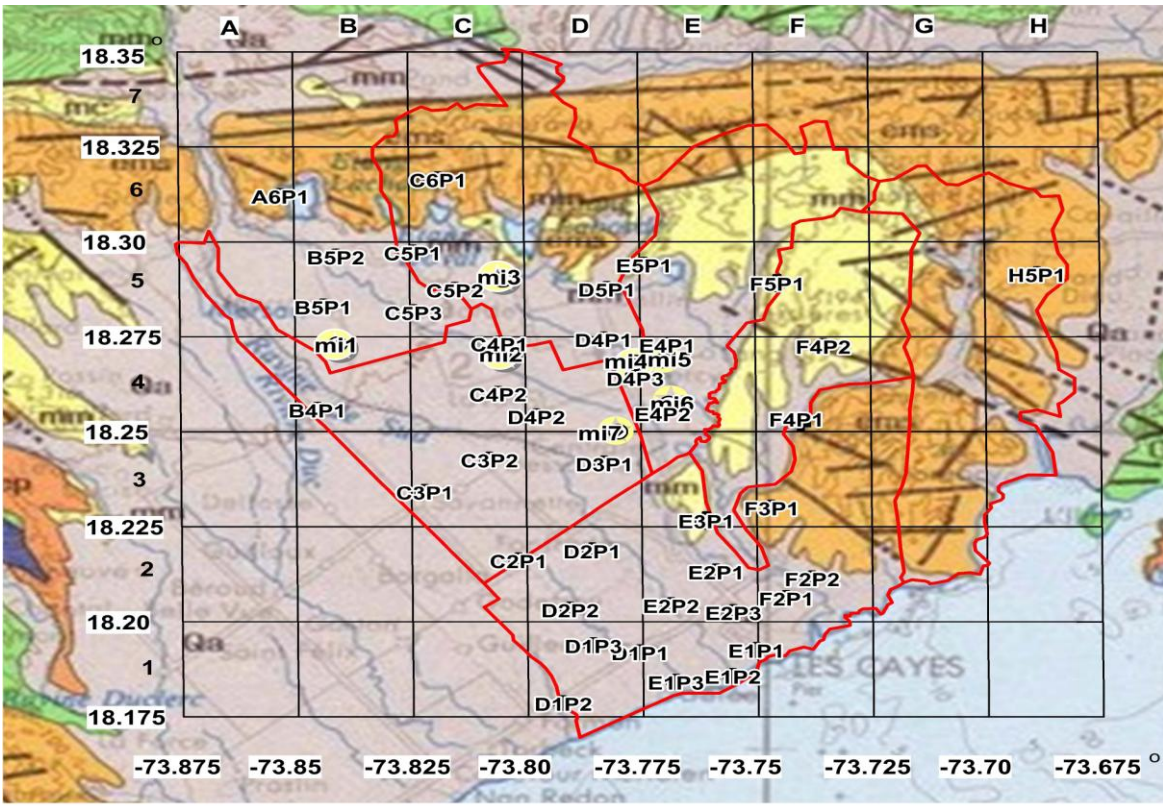

Figure 1. Contour de la ville et positionnement des points d'essais par rapport au quadrillage dessiné sur le fond de la carte géologie de la région des Cayes tirée du site du Bureau des Mines et de l'Énergie (BME)

- collection des données géotechniques et établissement des corrélations avec la vitesse des ondes de cisaillement ;
- exécution des mesures de vitesse des ondes de cisaillement par essai *SASW*) ;
- établissement des profils de vitesse et calcul de la vitesse moyenne dans les trente mètres (Vs30) ;
- classification et cartographie des sols sur la base du paramètre Vs30.

2.1 Localisation des mesures

Une répartition en zones est réalisée afin de localiser et répartir les essais sur les trois formations géologiques. Les zones sont délimitées par un maillage carré et régulier de 0,025°. Les chiffres 1 à 6 séparent les latitudes entre 18,175° et 18,35° nord et les lettres A, B, C, D, E, F, G et H séparent les longitudes allant de -72,875° à -72,675° ouest. Par exemple, pour localiser et nommer un point d'essai on procède de la manière suivante :

- un point d'essai situé entre 18,225° et 18,25° nord (niveau 3) et entre -72,825° et -73,80° ouest (niveau C) se trouve dans la maille C3 et il porte le nom de C3P1 ;
- le second point de mesure dans la même maille portera le nom de C3P2 et ainsi de suite.

Les mesures SASW sont réparties dans les trois formations géologiques des Cayes. Trente-deux (32) mesures sont effectuées dans la région plaine du quaternaire qui est la plus habitée. Quatre (4) mesures sont effectuées dans chacun des faciès du miocène et de l'éocène qui sont des zones montagneuses d'une faible densité de population.

2.2 Données géotechniques collectées

Des études géotechniques, constituées d'essais de pénétration standard (SPT) et de pénétration dynamique (PD) de type Borros, ont été également collectées pour caractériser les couches de surface. Ces données proviennent des études géotechniques réalisées par le Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP).

À partir des corrélations établies par différents auteurs (Spagnoli, 2008) entre divers types de pénétromètre dynamique et la valeur SPT, la corrélation moyenne donnée à l'équation 1 a été établie entre le pénétromètre dynamique Boros du LNBTP et les valeurs SPT. Cette relation sert à transformer le nombre de coup pour un enfoncement de 20 cm du pénétromètre Boros à la valeur N du SPT standard.

$$N = 0{,}94\ N_{B20} + 1{,}54 \qquad [1]$$

Avec :

N, la valeur au pénétromètre standard ;

N_{B20}, la valeur du pénétromètre Boros (employé dans cette étude) qui correspond au nombre de coups pour un enfoncement de 20 cm.

Les valeurs SPT sont transformées en valeurs de vitesse des ondes de cisaillements (Vs) à l'aide des corrélations établies par divers auteurs (tableau 1). Cette seconde transformation donne les profils Vs qui ont servi à comparer et à valider les essais SASW réalisés dans les terrains voisins aux essais PD et SPT.

Tableau 1. Corrélations entre valeurs SPT et Vs établies par divers auteurs 1 (Uma et al., 2010)

Auteurs	Argile	Sable et gravier
Osaki and Iwasaki 1973	$59N^{0,40}$	
Imai 1977	$80,2N^{0,292}$	$80,60N^{0,331}$
Ohta and Goto 1979	$62,14z^{0,219}N^{0,23}$	
sable fin		$67.79z^{0,219}N^{0,23}$
gravier		$92,28z^{0,219}N^{0,23}$
Sykora and Stokoe 1983		$100,52N^{0,29}$
Lee (1990)	$114.43N^{0.31}$	57,4N
Karray et Ethier 2012		$108N_1^{0,25}D_{50}^{0,18}$
Hasancebi 2007	$107,63N^{0,237}$	
Hasancebi 2007	$97.89N^{0.269}$	

2.3 Acquisition des mesures SASW

L'analyse spectrale des ondes de surface ou *SASW (spectral analysis of surface waves)* est une des techniques employées pour déterminer la vitesse des ondes de cisaillement traversant les couches de surface. D'une manière générale, cette méthode est exécutée en trois étapes :

- l'excitation du sol au moyen d'une ou plusieurs sources d'impact ;
- l'enregistrement des données sur le terrain à l'aide des géophones, d'un ordinateur et d'un analyseur de signaux ;
- le traitement des signaux suivant un processus en deux étapes, la construction d'une courbe de dispersion et l'inversion de la courbe de dispersion pour obtenir un profil de vitesse des ondes de cisaillement.

Pour l'excitation du sol, deux sources d'impact sont employées dans la présente étude. Il s'agit d'un marteau de 5,45 kg ou 12 lb employé pour les faibles espacements entre capteurs (moins de 8 m) et une masse cylindrique de 40 kg ou 88 lb (figure 3) pour les grands espacements des géophones allant de 8 à 32 m. La masse cylindrique est soulevée par une poulie montée sur un trépied, dont la hauteur de chute peut atteindre 2,50 m. La hauteur de chute du cylindre varie en fonction de l'énergie nécessaire pour générer des ondes de Rayleigh à la profondeur souhaitée.

Pour l'enregistrement des données sur le terrain, deux géophones L-4C de la compagnie *Mark Products* de fréquence 1 Hz et de résistance 5,500 ohms ont été employés (Figure 5). Les signaux enregistrés sont, ensuite, traités par un analyseur de fréquences. L'appareil employé est le *HP 3567-A de Hewlett-Packard*.

Le traitement signaux est réalisé en deux étapes : la construction d'une courbe de dispersion et l'inversion de ladite courbe. L'établissement de la courbe de dispersion, donnant la vitesse de phase en fonction de la fréquence (ou longueur d'onde), est basé sur la transformée de Fourier des signaux enregistrés entre deux récepteurs. L'inversion consiste à transformer ladite courbe en un profil de vitesse d'ondes de cisaillement. Dans la présente étude, la technique d'inversion simplifiée ou *Simplified Inversion Method (SIM)* a été utilisée. Cette méthode n'exige pas la mise en place d'un modèle de sol de départ ou de performance d'itérations. La *SIM* est une technique simple et rapide qui a été développée par Satoh et al., 1991 et améliorée par Pelekis et al., 2011.

Figure 3. Source d'impact constitué d'une masse 40 kg, surmontant une chèvre munie d'une poulie

Figure 4. Marteau de 5,45 kg, géophone L-4C et analyseur de fréquences *HP 3567-A*

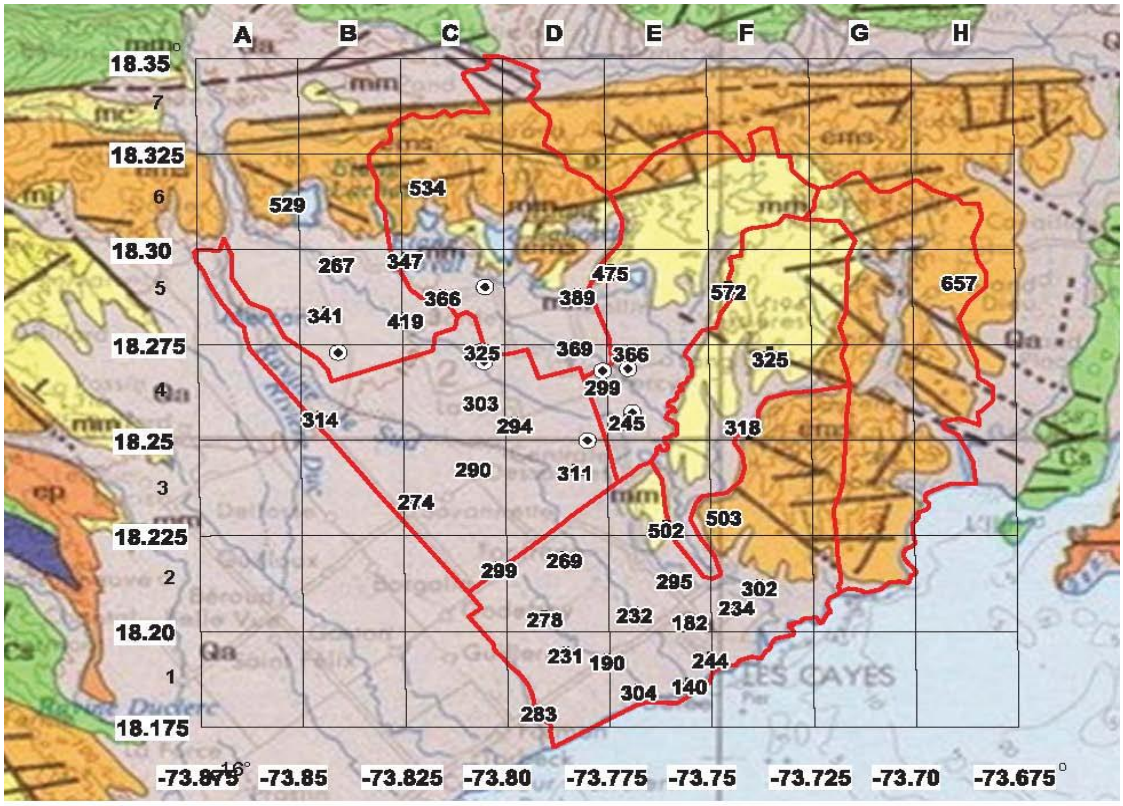

Figure 5. Valeurs de Vs30 en m/s des sites investigués par les mesures SASW

3 RESULTATS

À partir des profils de vitesse des ondes de cisaillement obtenus par essai SASW, trois catégories de sol ont été établies pour la ville des Cayes suivant le Code National du Bâtiment du Canada (CNBC).

La zone montagneuse de l'éocène moyen à supérieur (EMS) est caractérisée par les sols les plus durs. Les profils de vitesse d'ondes de cisaillement donnent des valeurs de *Vs*30 allant de 505 m/s à plus de 657 m/s et le sol est dans la borne supérieure de la classe C.

Les profils des montagnes du miocène montrent des mesures de vitesses d'ondes de cisaillement assez élevées qui sont proches de celles de l'EMS. La vitesse moyenne des ondes de cisaillement, dans les trente mètres (*Vs*30), varie entre 475 à 572 m/s et le sol correspond à la catégorie C. Toutefois, dans certaines régions de cette formation, le sol est plus altéré et plus friable en surface que l'EMS. Le paramètre *Vs*30 affiche des valeurs plus basses de l'ordre de 325 m/s correspondant à la classe D.

Les profils de vitesses, en relief plat dans la zone du quaternaire, donnent des mesures *Vs* inférieures à celles des faciès montagneux. Le paramètre Vs30, variant entre 182 et 311 m/s, correspond à des dépôts de classe D. Une superficie de 110 km^2, correspondant à plus de 87 % des régions plaines, répond à cette catégorie de sol. Les zones E4, D4, C5 et D5, localisées au nord de la commune et au pied des montagnes, totalisent une superficie d'environ 16 km^2 et sont de classe C (366 à 419 m/s).

Il est remarqué dans les zones côtières, les vitesses de propagation des ondes de cisaillement sont plus faibles. Dans certains sites, les mesures de *Vs*30 sont inférieures à 180 m/s et les sols correspondent, à priori, à la classe E. Ils peuvent être définis dans la catégorie F si des études complémentaires démontrent leur potentiel de liquéfaction. On constate également que les mesures de vitesse croissent au fur et à mesure qu'on progresse à l'intérieur des terres en s'éloignant des côtes.

Sur la carte de classe de sol (Figure 6), certaines zones numérotées 1 à 8 avec le symbole « ? » correspondent à des zones non investiguées. Elles ont une configuration particulière peu accessible et sont, dans la plupart des cas et à priori, non constructibles. Ce sont des terrains lacustres, des zones marécageuses et des lits de rivière qui méritent une étude plus approfondie.

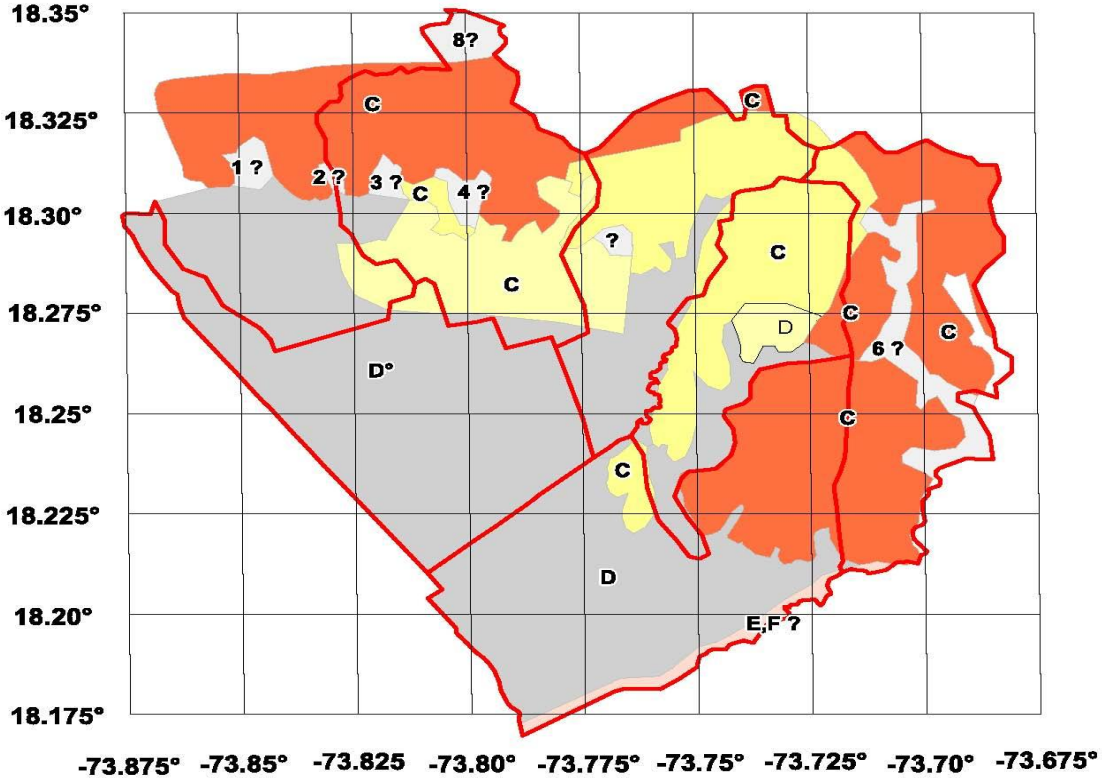

Figure 6. Valeurs de Vs30 des sites investigués par les mesures SASW

4 DISCUSSION

Les mesures géotechniques (SPT, PD) collectées et les mesures SASW sont les deux méthodes employées pour définir les profils de vitesse et les classes de sol. Il convient de comparer les profils obtenus à partir de ces deux techniques différentes et indépendantes pour les sites proches afin de vérifier et valider les résultats. Le tableau 2 indique les sites voisins avec les résultats des deux types d'investigations. Aux Figures 7 à 10, les profils de vitesses, obtenus à partir de ces sites pour les deux méthodes, sont aussi présentés.

Table 2. Comparaison des résultats de profils corrélés via SPT et PD et ceux des essais SASW pour des sites voisins

Références	Essais	Vs30 (m/s)	Classe	Distance (m)
B09/214	*SPT*	*191/203*	*D*	*500-700*
E2P3 et E2P2	*SASW*	*182/232*	*D*	
B09/235	*SPT*	*160/170*	*E*	*750*
E1P2	*SASW*	*140*	*E*	
B11/207	*SPT*	*171/178/180*	*D/E*	*250*
E1P1	*SASW*	*244*	*D*	
B11/241	*SPT*	*186/301*	*D*	*50-1500*
D4P1 et E4P1	*SASW*	*369/436*	*C*	

Dans les quatre cas de comparaison, les deux méthodes donnent, dans certaines limites, des résultats concordants.

- Pour les SASW des sites E2P2 et E2P3 et les SPT du site B09/214, les profils de vitesse suivent la même allure et sont presque confondus, en restant dans les mêmes ordres de grandeur sur toute la profondeur d'investigation de 30 m (Figure 7). Les valeurs de *Vs*30 et la classe de sol (tableau 2) sont aussi en accord pour les deux méthodes.

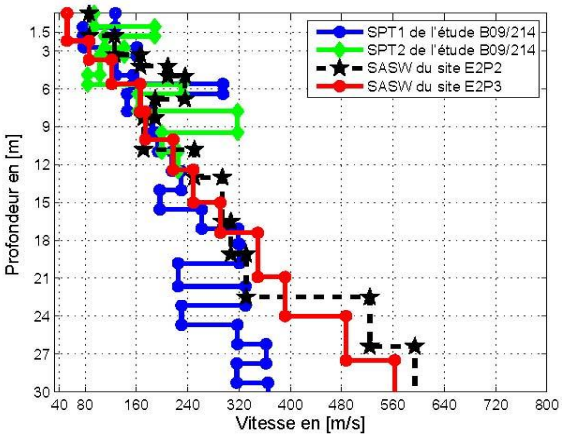

Figure 7. Valeurs de Vs30 des sites investigués par les mesures SASW

- Ces remarques sont également valables pour le SASW du site E1P2 et des essais SPT du site B09/235 (figure 8). La concordance est totale dans l'allure, des courbes, dans l'ordre de grandeur des vitesses et dans la détermination de la classe de sol.
- Pour le SASW du site E1P1 et les pénétromètres dynamiques de l'étude B11/207, les profils suivent la même allure, mais les vitesses obtenues par SASW restent supérieures à celles obtenues à partir des pénétromètres dynamiques (Figure 9). Cependant, cette divergence peut être due à une sous-estimation des valeurs de Vs par les corrélations. La bonne concordance de l'allure des courbes prouve que les mesures de la rigidité du sol par les SASW sont correctes.

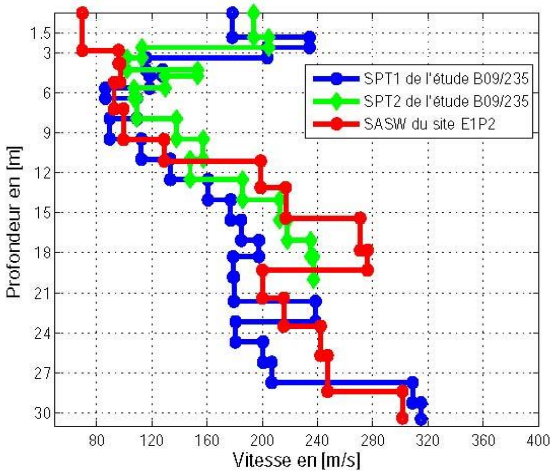

Figure 8. Valeurs de Vs30 des sites investigués par les mesures SASW

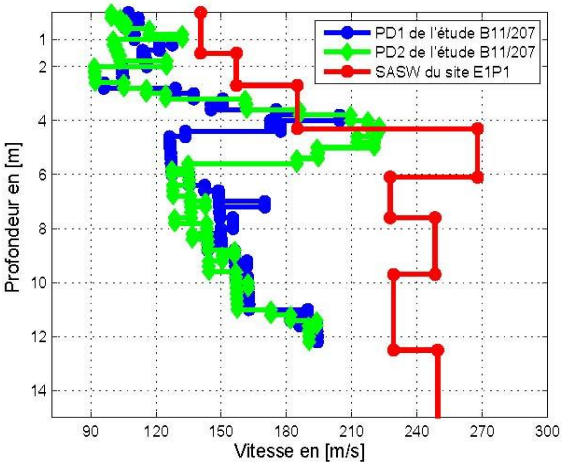

Figure 9. Valeurs de Vs30 des sites investigués par les mesures SASW

- Pour les SASW des sites D4P1 et E4P1 et les SPT du site de l'étude B11/241 (Figure 10), les profils coïncident dans les quinze mètres supérieurs en allure et en ordre de grandeur. Au-delà de 15 m de profondeur, les profils SASW ont tendance à croitre beaucoup plus rapidement et l'ordre de grandeur des mesures ne correspond plus. De cette divergence découle une classe de sol différente entre les deux méthodes (tableau 2).

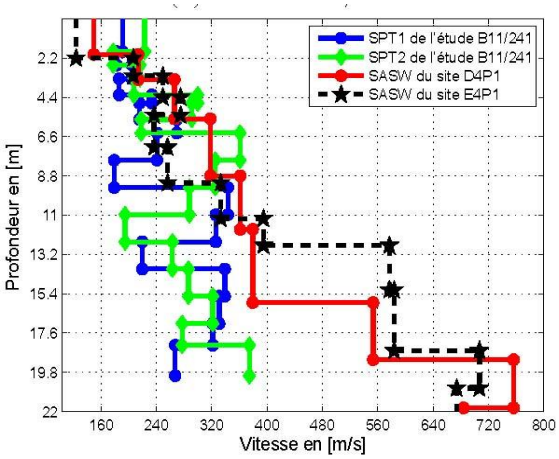

Figure 10. Valeurs de Vs30 des sites investigués par les mesures SASW

Les écarts observés entre les profils des deux méthodes peuvent provenir d'origine diverse.

- Premièrement, il faut faire preuve de prudence lorsqu'on emploie des corrélations. Ces dernières, satisfaisantes pour les terrains auxquels elles ont été établies, peuvent mal fonctionner dans une autre région. Elles peuvent, dans certains cas, surestimer ou sous-estimer la rigidité réelle du sol. La tendance ou l'allure est généralement plus indicatrice de bonnes mesures de vitesse que l'ordre de grandeur des valeurs au cours d'une comparaison des profils de vitesse réels et ceux obtenus par corrélation ;
- Les essais ne sont pas réalisés exactement aux mêmes endroits. Même si les sites sont placés dans la même configuration géologique, des écarts peuvent être observés dans les mesures en raison de leur éloignement qui varie entre 50 et 1500 m. De plus, il est toujours possible, sur un même site et avec une même méthode d'investigation, d'obtenir un écart entre deux mesures consécutives. Cette remarque est juste, car, en observant les figures 8 à 12, les profils obtenus à partir des SPT et PD sur le même terrain présentent des divergences remarquables en différentes profondeurs.
- Les conditions de site (sècheresse pluvieuse, marécage, route en remblai) sont différentes. Une différence de rigidité peut être observée pour des sites proches qui sont réalisés en zone verte ou en zone de circulation routière ayant déjà subi un compactage.

Au-delà des remarques susmentionnées, une bonne concordance a été observée entre les profils réels et corrélés dans l'allure des profils ou dans l'ordre de grandeur des valeurs Vs. La conformité entre les résultats des deux catégories de mesures témoigne de bonnes mesures de vitesse par essai SASW.

5 CONCLUSION

Le séisme du 12 janvier 2010 a eu pour conséquences des pertes majeures en vies humaines et en biens matériels dans plusieurs villes d'Haïti. En vue de mitiger de pareils dommages dans l'éventualité de nouveaux séismes, il devient une nécessité de connaitre la nature et de prévoir le comportement des sols en cas de séisme dans les régions urbaines d'Haïti. Cette étude, de microzonage sismique de la ville des Cayes, cherche à atteindre cet objectif. Elle vise la caractérisation et l'identification des classes de sol qui pourront être employées dans la prise en compte du risque sismique.

Au cours de cette étude, une quarantaine de profils de vitesse des ondes de cisaillement a été établie à partir des mesures SASW. En complément aux mesures SASW, d'autres profils de vitesse ont été établis en utilisant des corrélations de littérature entre la vitesse des ondes de cisaillement et les valeurs de pénétration standard (SPT) et pénétromètre dynamique (PD). Les profils établis indirectement par corrélation et ceux obtenus par SASW donnent des résultats concordants pour des sites voisins ayant une même nature géologique. La concordance est totale dans la tendance des profils, et elle est remarquable dans l'estimation des classes de sol. La conformité des résultats des deux types d'investigation exécutés de manière indépendante indique de bons essais SASW et de bonnes estimations de la rigidité du sol.

Les mesures de vitesse montrent que la catégorie de sol C (suivant le CNBC) prévaut dans les terrains montagneux avec des valeurs de *Vs*30 allant 475 à 657 m/s. Toutefois, dans les régions altérées et friables du faciès miocène, les valeurs de *Vs*30 sont plus faibles (325 m/s) et le sol est de classe D. Quant à la plaine des Cayes, elle est caractérisée, généralement, par la classe de sol D avec des *Vs*30 variant, en général, entre 182 et 311 m/s. Cependant, au nord de la plaine, la classe C a été identifiée. Dans plusieurs points d'essai, on observe des valeurs de *Vs*30 variant entre 366 à 419 m/s. Proche des côtes, le sol est plus mou. Les vitesses sont plus faibles et correspondent, à priori, à la classe E. Le sol peut être classé dans la catégorie F si des études spécifiques confirment leur potentiel de liquéfaction.

La carte géologique, utilisée dans cette étude, ne traduit pas parfaitement les limites des formations existantes. En effet, de nombreuses collines calcaires du miocène, émergées à la plaine des Cayes, ne sont nullement pointées sur la carte géologique. Dans ce cas, des classes de sol C peuvent également se trouver dans certains espaces indiqués pour des plaines et dont la classe est D.

D'autres études spécifiques sont nécessaires pour la prise en compte totale du comportement de la ville. Des études de stabilités de pente et les effets de sites topographiques sont à considérer pour les régions montagneuses. D'autres essais SPT, CPT, et H/V sont aussi à considérer pour la plaine des Cayes. Des analyses dynamiques seront aussi nécessaires en complément de ces travaux.

Dans le cas de nouveaux essais à ondes de surface, une source d'énergie plus pesante que celle employée dans la présente étude serait plus adaptée pour investiguer le sol à des profondeurs plus importantes.

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nos sincères remerciements s'adressent à tous les membres de l'équipe de recherche en géotechnique du professeur KARRAY et à toute l'équipe de recherche en génie parasismique du professeur PAULTRE.

L'expression de notre plus profonde gratitude est adressée à la Direction Générale du LNBTP, représentée par son Directeur Général, Monsieur Yves Fritz Joseph, et par le Directeur Administratif, Monsieur Yves Jean qui ont rendu possible techniquement et financièrement cette étude.

Nous remercions les techniciens Herold Seguy, Yves Jacinthe et Elisma Honel qui ont grandement aidé dans l'exécution des essais SASW sur le terrain.

Nous tenons également à remercier tous les ingénieurs et techniciens du LNBTP qui ont communiqués les données géotechniques utiles dans le cadre de cette étude.

REFÉRENCES

Augustin, C. J. et Saint-Victor, S. 2009. Rap. tech. Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP). *Construction du complexe administratif et socioculturel des Cayes*, réf. B-09/235.

Augustin, C. J. et Saint-Victor, S. 2011. Rap. tech. Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP). *Construction d'un pont sur la ravine dèyè mòn sur la route Cayes-Jérémie*, réf. B-11/241.

Augustin, C. J. et Saint-Victor, S. 2012. Rap. tech. Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP). *Construction d'un hôtel avec différents bâtiments (à 10 minutes de gelée)*, réf. B-12/299-2.

BME, 2013. Available at: http://www.bme.gouv.ht/carte/index.html.

Boore, D. M. 2004. Estimating *Vs*30 (or nehrp site classes) from shallow velocity models (depths < 30 m). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94:591–597.

BWG, OFEG, UFAEG and FOWG, 2004. *Principe pour l'établissement et l'utilisation d'études de microzonage en Suisse*, vol. 1. Office fédéral des eaux et de la géologie, OFEG, Bienne, Suisse.

Foti, S. Parolai, S. Albarello, A. and Picozzi, M. 2011. Application of surface-wave methods for seismic site characterization. *Surv Geophys*, 32:777–825.

Ganji, V. Gucunsky, N. Nazarian, S. and A. Associate members, 1998. Application of surface-wave methods for seismic site characterization. *Geotechnical and Geoenvironemental Engineering*, 124:757–770.

IHSI, 2012. *Population totale, population de 18 ans et plus ménages et densités estimés en 2012*. Institut Haïtien de Statistique et d'Informatique (IHSI), Port-au-Prince, Haïti.

Jean-François S. and Saint-Victor, S. 2011. Rap. tech. Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP). *Construction d'un bâtiment de deux niveaux à bergeau Cayes*, réf. B-11/200-6.

Jean-Philippe, J. et Saint-Victor, S. 2010. Rap. tech. Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP). *Agrandissement de l'école soeur salésienne de don bosco des cayes*, réf. B-11/207.

Jean-Philippe J. et Saint-Victor, S. 2010. Rap. tech. Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP). *Construction du bâtiment des témoins de Jéhovah aux cayes*, réf. B-11/206.

Jeudy, B. et Saint-Victor, S. 2008. Rap. tech. Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP). *Construction d'un stade de football à Cité soleil (bois-neuf)*, réf. B-08/215.

Jeudy, B. et Saint-Victor, S. 2009. Rap. tech. Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP). *Construction d'un réservoir surélevé d'AEP à quatre chemins (Les Cayes)*, réf. B-09/214.

Karray, M., and Ethier, Y. 2012. Reply to the discussion by P.K. Robertson on "Influence of particle size on the correlation between shear wave velocity and cone tip resistance". Canadian Geotechnical Journal, 49(1): 124–128. doi: 10.1139/t11-101.

Karray, M. 2000. *Utilisation de l'analyse modale des ondes de Rayleigh comme outil d'investigation géotechnique in-situ*. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke. Sherbrooke, Québec, Canada.

Lacroix, A. 1992. *Étude de la méthode sismique non destructive SASW*. Mémoire de Maîtrise. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.

Pelekis, P. C. et Athanasopoulos, G. A. 2011. An overview of surface wave methods and a reliability study of simplified inversion technique. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31:1654–1668.

Rogers, J. D. 2006. Subsurface exploration using the standard penetration test and the cone penetrometer test. *Environmental and Engineering Geoscience*, 12:161–179.

Satho, T. Poran, C. J. Yamagata K. and Rodriguez, J. 1991. Soil profilling by spectral analysis of surface waves. *In* S.Prakash, éd., *Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, vol. 2 de *Proceedings*, p. 1429–1434, St. Louis, Missouri. Shamsher Prakash.

Spagnoli, G. 2008. An empirical correlation between different dynamic penetrometers. *EJGE*, 2:1–11.

Uma Maheswari, R. and Boominathan, A. 2010. Use of Surface Waves in Statistical Correlations of Shear Wave velocity and Penetration Resistance of Chennai Soils. *Geotech Geol Eng*, 28:119–137

Waschkowski, E. Rap. tech. Laboratoire Pont et Chaussée, 1983. Le pénétromètre dynamique, réf. 2805-2806.

Woodring, W. P. Brown, J. S. and Burbank, W. S. 1924. *Geology of the Republic of Haiti*, vol. 1. Geological Survey des Etats-Unis, USA.