



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Ambassade de Suisse en République d'Haïti
Bureau de la coopération suisse

Etude de l'aléa sismique dans la commune de Jacmel

ALEAS SISMIQUES

GUIDE D'APPLICATION PRATIQUE ET ETUDE PILOTE



- Experts nationaux** : Berthoumieux Junior JEAN, Ing. Ph.D, (LNBTP/UEH)
Michael SAIMBERTIL, Géol., (ENGA)
Samuel GENEVA, Géol., (BME)
Julio JEAN-PHILIPPE, Ing., (LNBTP)
Ronaldine GILLES, Ing. Msc., (LNBTP)
Marceau JEAN-BAPTISTE, Géol., (BME)
- Participants** : Roosevelt CLERVIL, Inspecteur municipal (Mairie de Jacmel)
Laby RECULE, Inspecteur municipal (Mairie de Jacmel)
Berllanson THELUSMA, Aide Géophysique (LNBTP)
- Date** : 23 Avril 2019
- Révision** : 8 Mai 2019

Table des matières

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA MISSION.....	3
1.1 Rappel des objectifs de la mission.....	3
2. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU SECTEUR D'ÉTUDE	4
3. DÉROULEMENT DE LA MISSION.....	5
5. PHENOMENES, TERMES ET RESULTATS DES MESURES	6
5.1 ALEA SISMIQUE LOCAL.....	6
5.2 RESULTAT DES MESURES ANTERIEURES (2016)	10
5.3 RESULTAT DES MESURES DE LA MISSION (2019)	11
5.4 MESURES DE MITIGATION.....	13
Annexe 1	17
Fiche descriptive des sites.....	17
Annexe 2A.....	37
Carte Géologique et mesures H/V et MASW	37
Annexe 2B	39
Carte de l'aléa sismique local.....	39
Annexe 2C.....	41
Mesure H/V et MASW.....	41

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA MISSION

L'ambassade de Suisse en Haïti mène depuis avril 2014 un programme de réduction de risques de catastrophes dont l'un des objectifs est l'amélioration des capacités nationales à générer des outils d'analyse et de gestion de risques.

Au cours de la phase 1 du projet, une méthodologie d'analyse mixte pour l'étude du risque sismique a été implémentée au niveau de la commune de Jacmel avec un focus sur la partie urbaine. Cette première étude a permis d'aboutir à :

1. Un zonage sismique de la commune de Jacmel (classe de sol selon la classification NEHRP)
2. Carte de zonage sismique préliminaire

Dans le cadre de la STRACOH¹ 2018 - 2021, il a été décidé d'inclure la réduction des risques de catastrophes "naturelles" comme axe de travail d'une part à travers un projet spécifique de gouvernance locale et d'autre part comme thématique transversale. La stratégie d'action devrait envisager la poursuite des actions de la phase 1 du projet, leur extension en termes de couverture géographique et l'intégration d'autres axes d'intervention. Ces extensions tiendront compte de la valeur ajoutée apportée par la Suisse dans la thématique RRC et des opportunités d'intégration de la RRC dans l'ensemble des programmes de la DDC, en considérant l'évolution du contexte haïtien. Les effets visés par le projet sont recherchés à 3 niveaux :

1. Les **populations** des zones d'intervention connaîtront les « risques naturels » de leur territoire et participeront activement à leur réduction par des mesures de prévention et préparation. Cet effet sera recherché grâce à des activités de sensibilisation, la préparation pour les catastrophes et des mesures physiques de réduction des risques.
2. Les **capacités locales** seront renforcées et des processus pour une gestion locale intégrée des risques et désastres seront institutionnalisés. Les produits visés comprendront des processus plus efficaces et institutionnalisés de contrôle du bâti (y compris mesures réglementaires), la mise en place d'une organisation articulée entre différents niveaux pour la préparation face aux catastrophes (y compris gestion des alertes), ainsi que la planification et l'accompagnement de la mise en œuvre de mesures de mitigation par les mairies.
3. Les **capacités nationales** à produire des outils d'analyse et de gestion des risques naturels, basés sur une stratégie orientée vers les collectivités locales, seront renforcées. Ce volet impliquera des processus de formation et la génération proprement dite de cartes et d'analyses de risques.

Cette phase sera mise en œuvre sur 36 mois (01.09.2018 - 31.08.2021) dans 6 municipalités (Sud : 3 et Sud-est :3). Le projet interviendra à l'échelle de la section communale puis de la commune, ce qui permettra de travailler sur des processus plus généraux de gestion intégrée des risques et d'augmenter l'impact du projet. Le présent mandat s'intègre dans le point 3 de la phase 2 du projet RRC avec comme objectif de poursuivre avec le processus de renforcement des capacités du pool de spécialistes afin d'assurer une autonomie dans la conduite des études d'analyse de risques en support aux collectivités territoriales. De manière plus spécifique, ces termes de référence sont développés avec comme objectif la cartographie de l'aléa sismique spécifiquement, rafraîchissement des connaissances sur l'application de la méthodologie, analyses des compléments et révisions à apporter au guide d'application pour l'étude de l'aléa sismique pour les valider et les utiliser sur d'autres territoires géographiques.

Le rapport de mission présente les travaux qui ont été réalisés au cours de la période allant du 14 au 22 mars 2019.

1.1 Rappel des objectifs de la mission

La consultance a pour objectifs de :

1 Stratégie de coopération pour Haïti

1. Collecter les données de base nécessaires pour l'analyse de l'aléa sismique (compléter l'étude de l'aléa sismique dans la commune de Jacmel)
2. Appliquer de manière autonome le guide d'application pratique pour l'étude de l'aléa sismique
3. Conduire l'étude (terrain et bureau) et produire les documents (cartes, rapports, fiches terrain, etc.) caractérisant l'aléa sismique.
4. Compléter l'étude de l'aléa sismique initié dans la commune de Jacmel
5. Elaborer la carte de danger, identifier les sites critiques, élaborer les fiches de terrain indiquant les éléments exposés et proposer des mesures de réduction des risques et des recommandations pour l'aménagement du territoire dans les zones de danger.
6. Discuter les résultats de l'étude avec le génie municipal et prendre en compte leurs points de vue, en particulier, pour les mesures de réduction des risques proposées ;
7. Présenter les résultats au cours d'un atelier d'une demi-journée aux décideurs et représentants de la commune ;
8. Formuler des recommandations pour l'amélioration du guide d'application pratique pour l'étude de l'aléa sismique ;

2. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU SECTEUR D'ÉTUDE

La zone d'étude est située dans le département du Sud-Est dans la commune de Jacmel constituée de 11 sections communales qui sont les suivantes (Figures 1 et 2) :

1. 1ère Section Bas Cap Rouge
2. 2ème Section Fond Melon (Selles)
3. 3ème Section Cochon Gras
4. 4ème Section La Gosseline
5. 5ème Section Marbial
6. 6ème Section Montagne La Voûte
7. 7ème Section Grande Rivière de Jacmel
8. 8ème Section Bas Coq Chante
9. 9ème Section Haut Coq Chante
10. 10ème Section La Vanneau
11. 11ème Section La Montagne

La commune s'étend sur plus de 440 km² et comporte une région côtière sur la Mer des Caraïbes qui s'élève progressivement au Nord sur le Massif de la Selle.

Selon des estimations pour 2015, la population de la commune est d'environ 187,253 habitants, 73% en zone rurale et 17% en zone urbaine (le chef-lieu de Jacmel), soit environ 48,248 habitants (IHSI, 2015).

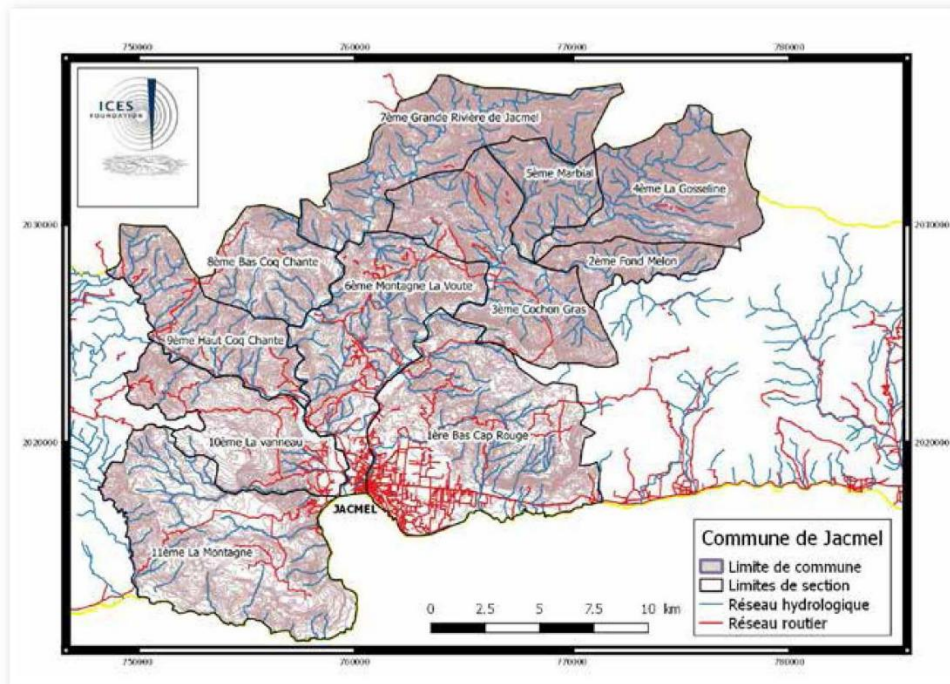


Figure 1 - Les 11 sections communales de Jacmel (Source : CNIGS, 2015).

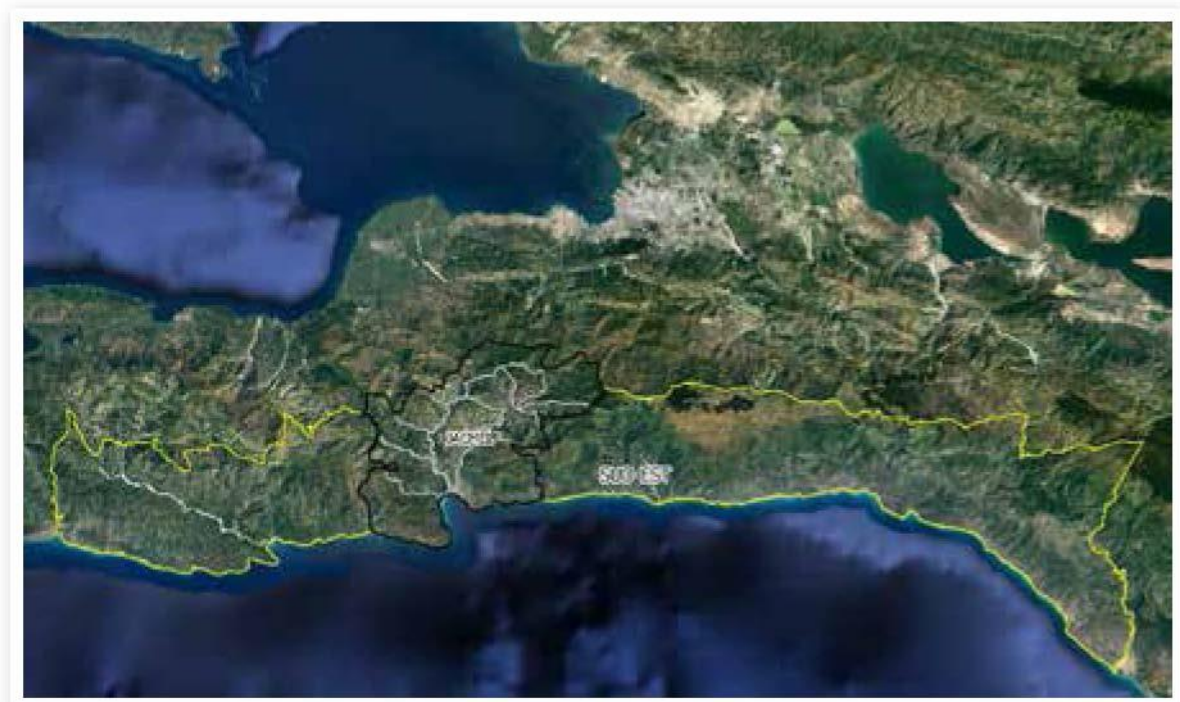


Figure 2 - Localisation de la zone d'étude. La commune de Jacmel (trait noir) se situe dans l'arrondissement du Sud-Est (trait jaune). □ □ Source: GoogleEarth, 2016

3. DÉROULEMENT DE LA MISSION

La mission s'est déroulée en quatre phases successives :

1. Préparation depuis Port-au-Prince
2. Travail de terrain (Essais H/V et MASW) et formation des praticiens à Jacmel
3. Interprétation des essais sismiques et cartographie

4. Finalisation du Rapport à Port-au-Prince.

Période	Tâches	Lieu
12 mars	Préparation de la mission avec les données existantes	LNBTP, Port-au-Prince
14 - 22 mars	Travail de terrain et formation des praticiens et cadres de la Mairie	Jacmel
14 - 27 mars	Interprétations des essais sismiques et cartographie	Jacmel / Port-au-Prince
27 - 29 mars	Finalisation du rapport	Port-au-Prince

Tableau 1 - Déroulement de la mission.

5. PHENOMENES, TERMES ET RESULTATS DES MESURES

5.1 ALEA SISMIQUE LOCAL

De nombreuses études montrent que les dépôts récents et non consolidés (argile, sable, tourbe, remblais, ...) peuvent amplifier de manière significative les mouvements du sol en amplitude et en durée. Ce phénomène s'exprime d'autant plus que le contraste de vitesse des ondes S dans les sols est important vis à vis des couches dures sous-jacentes et que l'épaisseur de ces couches meubles est importante.

La distribution géographique des dommages suite au séisme du 12 janvier 2010 a montré partiellement que les bâtiments sur des sols meubles (sédiments récents non consolidés) montraient des dommages plus importants (Hough et al., 2011).

1. Classification des sols

Il existe de nombreux paramètres géotechniques ou géophysiques qui permettent de classer les sols. Le choix de ces derniers dépend bien souvent des données qui sont à disposition dans la zone d'étude. Un des paramètres communément utilisé dans des analyses d'aléa sismique local et repris dans de nombreux codes parasismiques nationaux et internationaux (IBC, 2009) pour caractériser les conditions de site est le V_{s30} . Il correspond à la vitesse moyenne V_s des ondes S pour les 30 premiers mètres de sol et se calcule ainsi :

$$V_{s30} = 30 / \sum (h_n / V_{s_n})$$

$\sum (h_n / V_{s_n})$ étant la somme des rapports h/V_s des n couches d'épaisseur h et de vitesse de cisaillement V_s , constituant les 30 premiers mètres de sol tel que $\sum (h_n) = 30\text{m}$.

Nous adoptons la classification proposée par le US National Earthquake Risk and Hazard Program (NERHP, 1994), utilisée dans beaucoup de pays et également dans le Code National du Bâtiment d'Haïti (CNBH, 2012). Elle comporte six classes de sol de A à F avec des valeurs de V_{s30} décroissantes telles que définies dans le Tableau 2. **La couleur adoptée pour chaque classe de sol sera utilisée pour la cartographie de l'aléa local.**

Classe de sol	Description du profil stratigraphique	Paramètres		
		$V_{s_{30}}$ (m/s)	N_{SPT} (cps/30cm)	c_u (kPa)
A	Rocher « dur »	> 1500	-	-
B	Rocher	760 - 1500	-	-
C	Sol ferme ou Rocher « mou »	360 - 760	> 50	> 250
D	Sol « mou »	180 - 360	15 - 50	70 - 250
E	Sol « très mou »	< 180	< 15	< 70
F	Autres sols	Une étude spécifique du site est nécessaire		

Tableau 2 - Classification des sols en terme de $V_{s_{30}}$ et autres paramètres. Les limites en valeur de $V_{s_{30}}$ pour chaque classe sont celles adoptées par le NERHP (1994). N_{SPT} : nombre de coups au pénétromètre dynamique SPT (Standard Penetration Test) ; c_u : cohésion non drainée.

2. Méthodes de mesure sismique

La **méthode H/V**, proposée au Japon il y a plus de 20 ans (Nakamura, 1989) consiste à mesurer les vibrations ambiantes (très petites, non perceptibles) d'origine anthropique (circulation, machines, ventilations, etc...) ou naturelle (vent, écoulements fluides, activité océanique, ...).

Ces mesures sont effectuées avec un capteur sismologique très sensible permettant d'enregistrer le mouvement du sol dans trois directions, 2 horizontales et 1 verticale, puis de comparer leur contenu fréquentiel en effectuant le rapport "H/V" des spectres de Fourier des composantes horizontales H et verticale V (voir Figure 3). L'expérience et la théorie montrent que, pour des sites "mous", c'est-à-dire à faibles caractéristiques mécaniques reposant sur un substratum beaucoup plus rigide, comme du roc, ce rapport présente un pic marqué à une fréquence f_0 , appelé "fréquence de résonance fondamentale du site", qui est reliée à l'épaisseur des matériaux "mous" et à leur rigidité (i.e. Chouinard et Rosset, 2012; Bard, 1999).

La formule de base $f_0 = V_s/4h$, où V_s est la vitesse des ondes de cisaillement S dans les sédiments et h leur épaisseur, indique que cette fréquence sera d'autant plus basse que les matériaux seront plus "mous" (faible vitesse des ondes S) ou épais. Cette méthode a donc l'avantage d'être très simple et très facile à mettre en œuvre, tout en procurant un indicateur combiné de la rigidité et l'épaisseur des matériaux de surface.

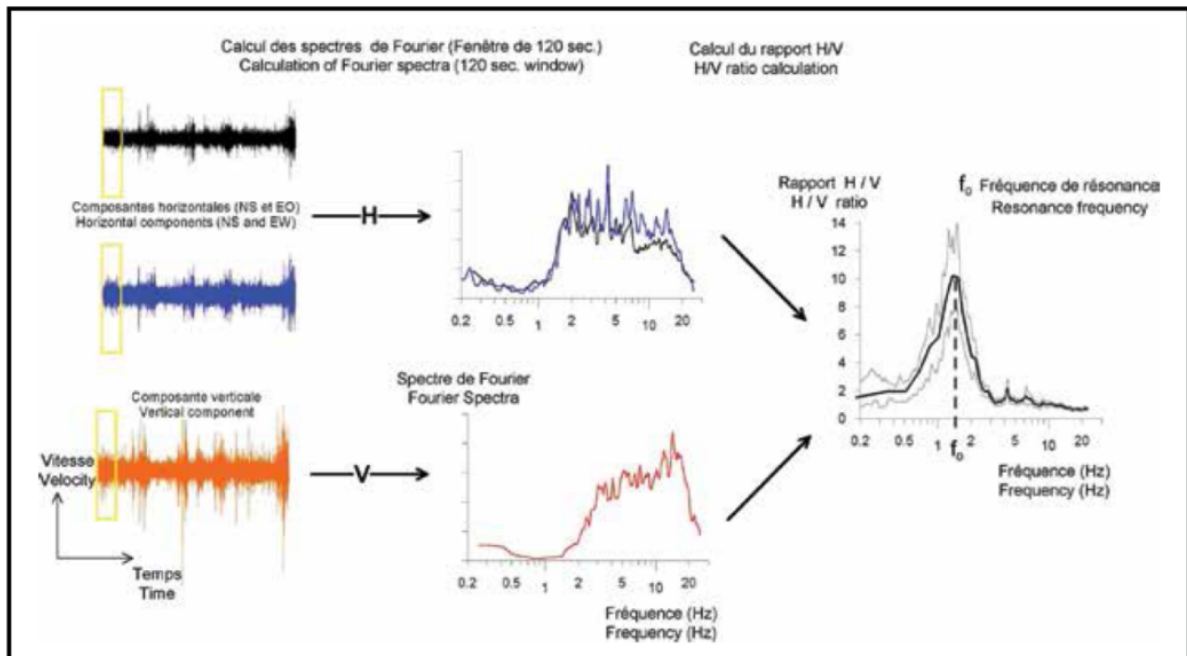


Figure 3 - Schéma d'analyse des enregistrements de bruit de fond (Rosset et Chouinard, 2009)

La **méthode MASW** (Park et al. 1999) consiste à enregistrer sur une série de capteurs à 1 composante verticale (dans notre cas 24 capteurs), disposés en ligne avec un espacement régulier, les ondes sismiques de surface générées par différents types de sources (dans notre cas, des coups de masse sur une plaque métallique) localisés aux deux extrémités de la ligne. Compte tenu du niveau de bruits ambiants, ces chocs ont été répétés 8 fois, et les signaux enregistrés sommés après synchronisation. On obtient ainsi une image sismique qui inclut les ondes dites “de Rayleigh”, ondes qui se propagent à proximité de la surface avec une vitesse qui dépend à la fois de la stratification avec la profondeur et de la fréquence des ondes considérées (Figure 4).

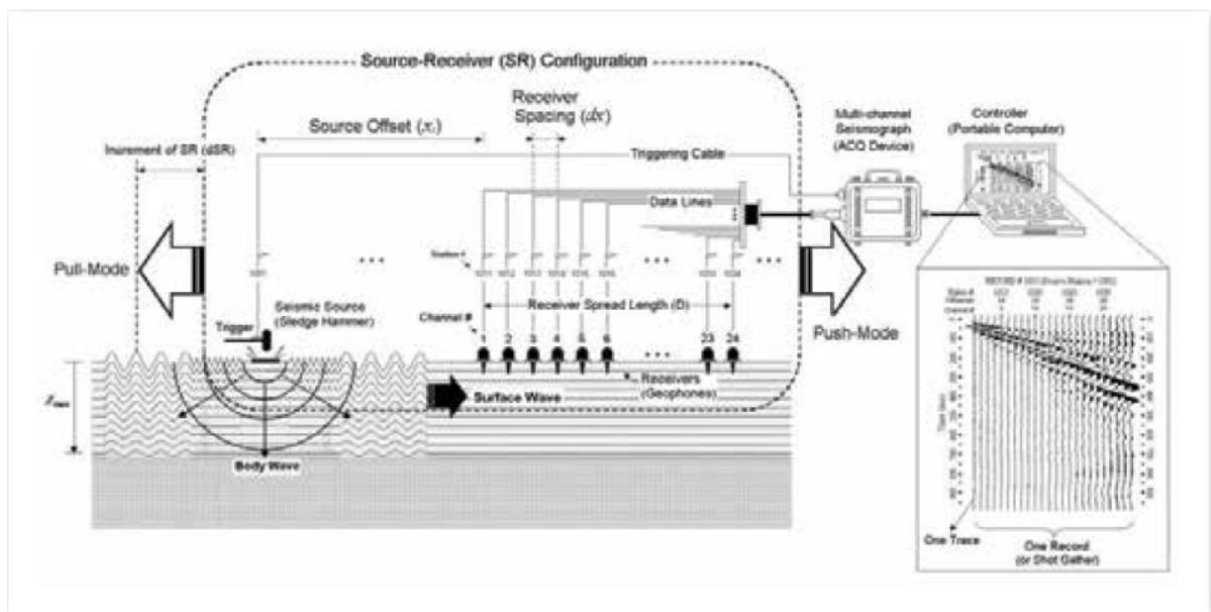


Figure 4 - Procédure d'acquisition des données (source : www.masw.com)

La méthode (voir Figure 5) consiste à décomposer tous les signaux en fréquence individuelle (via une FFT - transformée de Fourier rapide) et de normaliser leur amplitude. Pour chaque fréquence, la somme de l'amplitude de chaque signal est calculée pour une vitesse de phase donnée et la procédure répétée pour une gamme de vitesses de phase. En répétant ces calculs pour les différentes fréquences, on obtient une image de dispersion dans l'espace fréquence vitesse de phase (Park et al., 1999) identifiant les niveaux d'amplitude ou d'énergie. Cette image de dispersion montre des zones de forte amplitude par

lesquelles on peut faire passer une courbe de dispersion. Celle qui possède les vitesses de phase les plus faibles est souvent le mode fondamentale des ondes de Rayleigh. C'est celle-ci qui est utilisée pour déduire les variations d'onde de cisaillement V_s au droit de la ligne sismique selon une procédure d'inversion.

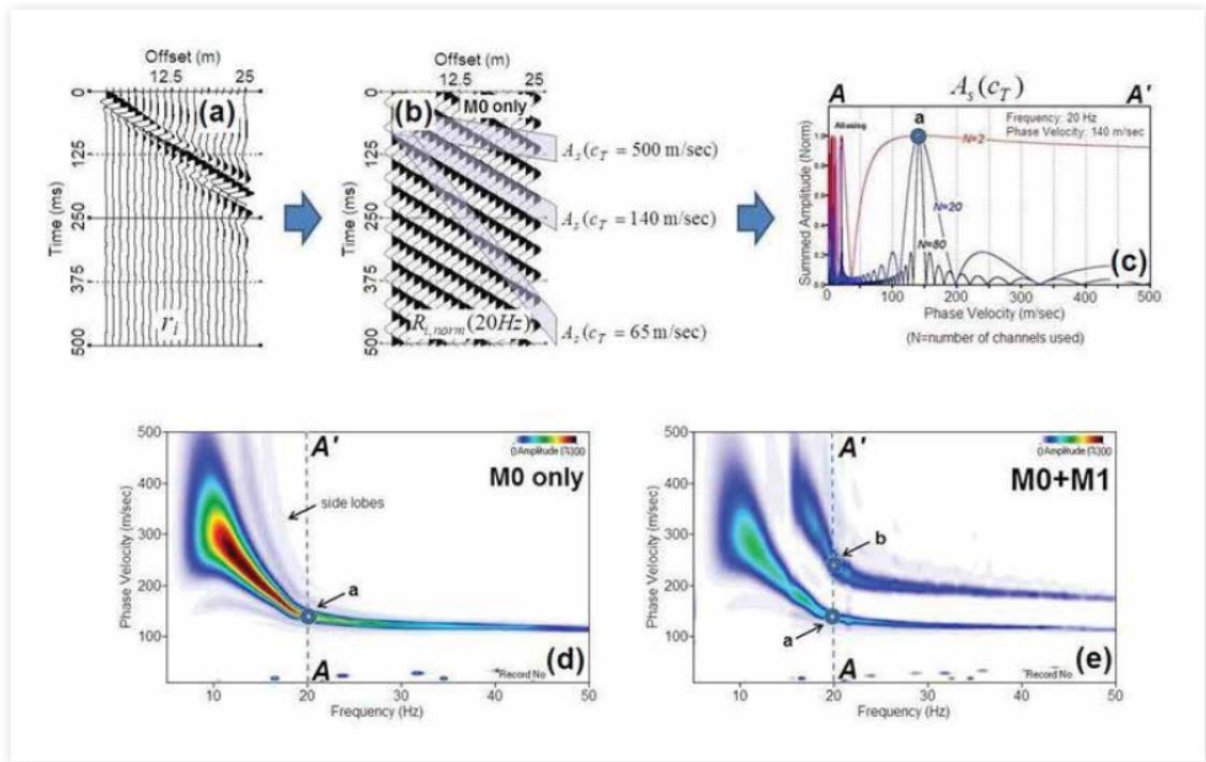


Figure 5 - Procédure d'analyse MASW (source : www.masw.com)

3 Zonage sismique

Le zonage sismique consiste à identifier et cartographier les zones présentant des réponses sismiques (H/V et MASW) homogène par des essais sur place et des extrapolations.

Ce zonage a pour objectif de pallier au manque de mesures géophysiques (MASW et H/V) utilisées dans la « Méthodologie pour l'étude de l'aléa séisme - Guide d'Application Pratique » (Rosset et al., 2017). Ces nouvelles mesures effectuées vont compléter l'étude d'aléa sismique par l'analyse de 20 sites supplémentaires situés principalement dans les environs des zones potentielles de développement urbain de Jacmel en utilisant les méthodes H/V et MASW. La carte de la Figure 6 localise les anciens sites du Guide d'Application Pratique et les nouveaux sites avec environ 22 profils MASW et 42 points H/V.

Les ronds bleus et rouges indiquent les nouveaux sites qui ont à la fois des points H/V et un profil V_s par la méthode MASW. Le fond de carte reprend les informations de la carte géologique au 1/250'000. Un zoom sur la ville de Jacmel est proposé.

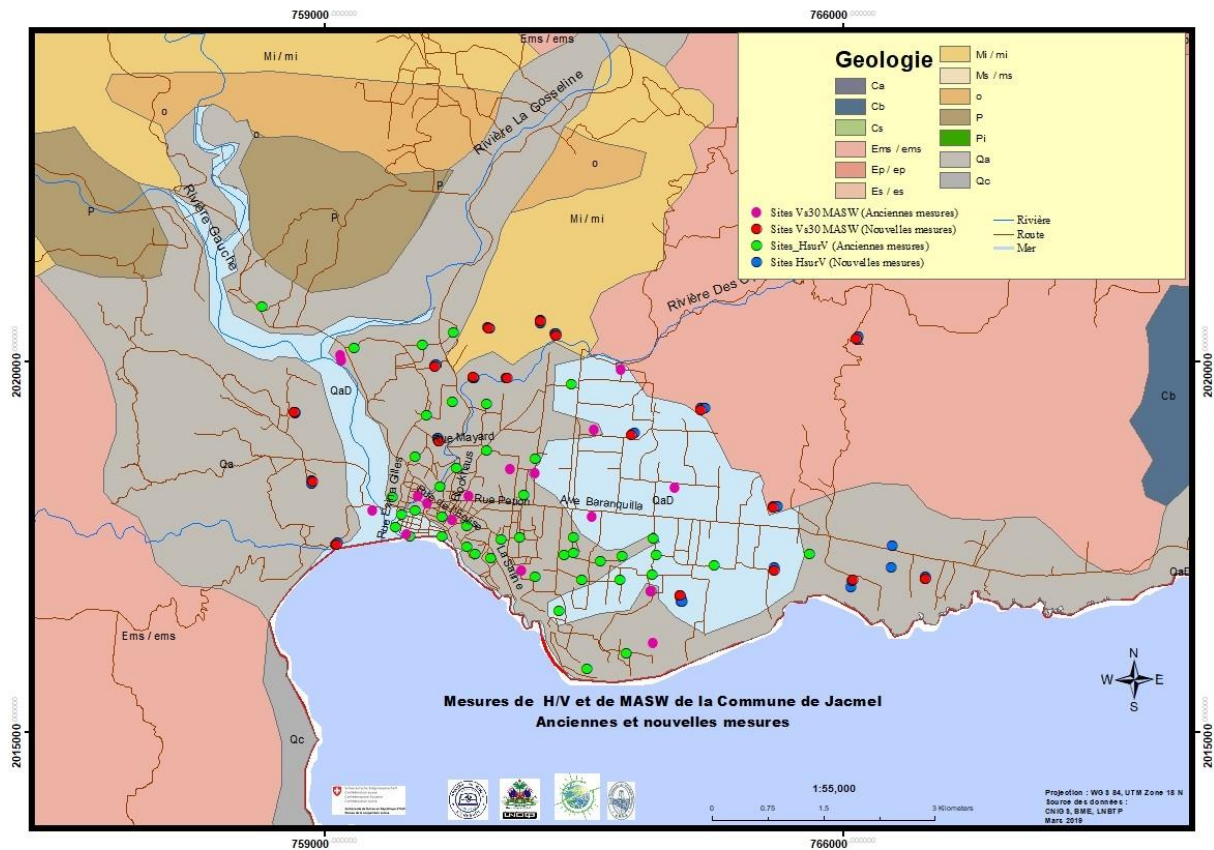


Figure 6 - Localisation des mesures H/V et MASW dans la commune de Jacmel

5.2 RESULTAT DES MESURES ANTERIEURES (2016)

1. Les sols de classe D ($180 \text{ m/s} \leq V_{s_{30}} < 360 \text{ m/s}$)

Des mesures H/V ont été réalisées sur cinq sites pour lesquels le profil V_s était disponible et un pic d'amplitude a été clairement visible sur le spectre H/V à des fréquences variant de 1.2 à 2.1 Hz. Dans la commune de Jacmel, les sites présentant un pic d'amplitude net dans cette gamme de fréquence se trouvent proches de la côte en rive droite de la grande rivière à des altitudes inférieures à 10 m et aux alentours du terrain d'aviation, (Rosset et al. 2017, « Méthodologie pour l'étude de l'aléa sisme - Guide d'Application Pratique »).

2. Les sols de classe C ($360 \text{ m/s} \leq V_{s_{30}} < 760 \text{ m/s}$)

Des mesures H/V ont été réalisées sur 22 sites pour lesquels la classe de sol est C. Onze des sites de mesure ont eu des graphiques présentant un pic d'amplitude à des fréquences variant de 2.9 à 5.0 Hz. 4 des sites ont des pics d'amplitude clair à une fréquence inférieure à 1 Hz. 1 des sites a un spectre H/V plat et 6 autres sites ne montrent pas de pic prononcé mais plutôt un plateau avec plusieurs pics de même amplitude, (Rosset et al. 2017, « Méthodologie pour l'étude de l'aléa sisme - Guide d'Application Pratique »).

3. Les sols de classe B ($760 \text{ m/s} \leq V_{s_{30}} < 1500 \text{ m/s}$)

Nous n'avons pas identifié de site clairement en classe B avec les données de V_s , (Rosset et al. 2017, « Méthodologie pour l'étude de l'aléa sisme - Guide d'Application Pratique »).

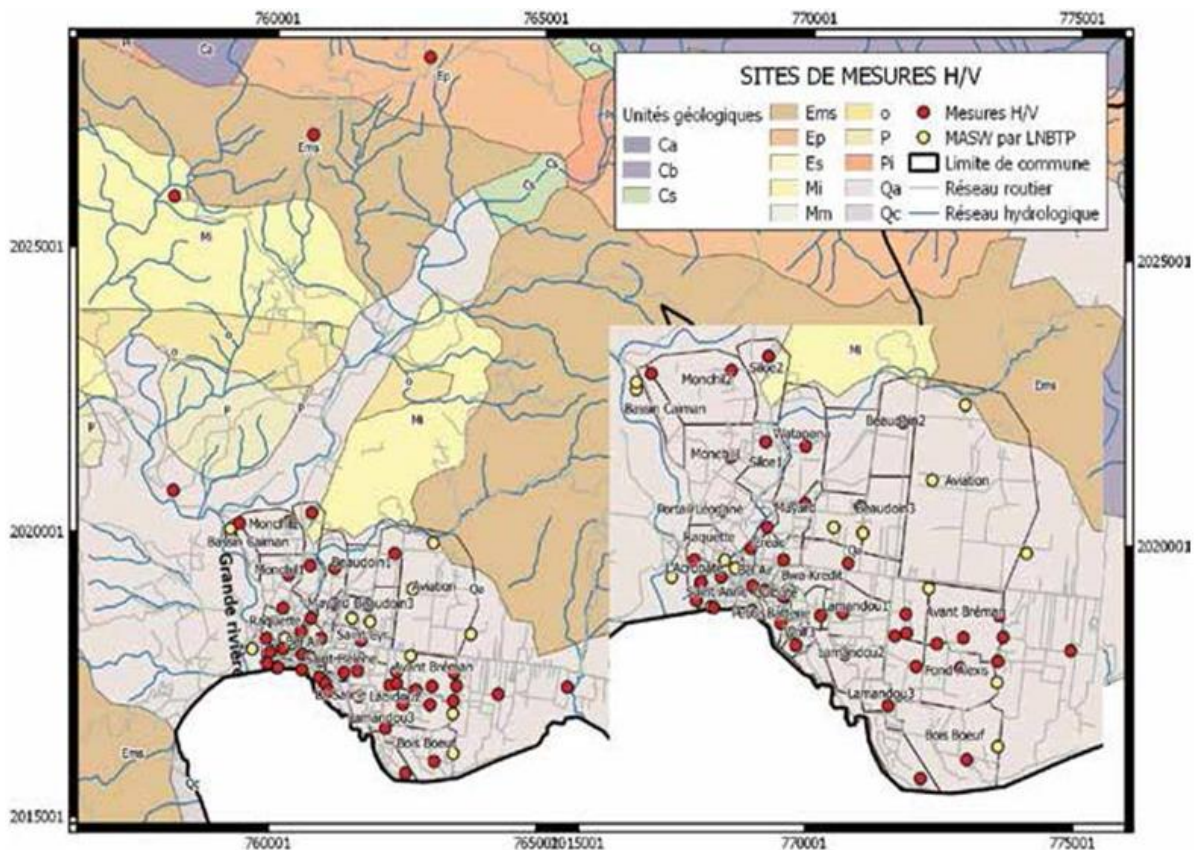


Figure 7 - Localisation des sites de mesures H/V et MASW dans la commune de Jacmel (2016)

5.3 RESULTAT DES MESURES DE LA MISSION (2019)

Cette nouvelle campagne de mesure permet de vérifier le classement sismique déjà réalisé dans la « Méthodologie pour l'étude de l'aléa séisme - Guide d'Application Pratique » et de compléter les informations sur la cartographie de l'aléa sismique local dans la commune de Jacmel.

Des mesures complémentaires ont été réalisées sur 20 nouveaux sites dans la zone d'étude. Au total 22 profils sismiques MASW ont été effectués sur ces sites (Figure 6 : ronds rouges). Concernant les points H/V bruit de fond, 42 mesures H/V ont été effectuées sur ces sites (Figure 6 : ronds bleus). Pour chaque site de mesure, en moyenne deux enregistrements distincts ont été effectués à quelques dizaines de mètres d'écart, afin de contrôler l'homogénéité de la réponse obtenue.

A partir de la synthèse des résultats obtenus (mesures directes Vs30 et points H/V), une nouvelle cartographie de classification sismique a été effectuée. Le zonage final en classes sismiques de sol est présenté (Figure 8). Certains sites ont été également identifiés comme présentant des risques d'effets de site (phénomène d'amplification).

Le tableau de synthèse (Tableau 3) montre que les sites étudiés sont dominés par des classes C (17 sites de classes C). 4 sites de classes B sont également identifiés. Ces derniers ne présentent pas de risque d'amplification. Certains sites de classe C/D ne présentent pas de pics d'amplitude. 9 sites ont des pics d'amplitude bien prononcés. Le site situé près de la mer a un risque d'effet de site à moins de 1 Hz.

Comme il a été remarqué pour la campagne de 2016, les sites de classe C sont dominants. Cependant, contrairement aux mesures de 2016, des sites de classe B ont été répertoriés.

Les effets de site enregistrés dans le cadre de cette mission sont majoritairement des effets de site lithologiques. Cependant, des effets de site topographiques sont possibles pour certaines configurations topographiques ainsi que d'autres phénomènes qui peuvent être préjudiciables à la sécurité des ouvrages. Le relief topographique de la commune est un paramètre important dans l'estimation du niveau d'aléa sismique mais aussi de glissement de terrain, chute de bloc, crue torrentielle et inondation. A ce jour, le

modèle numérique de terrain (MNT) a une résolution de 30 m en dénivelé qui n'est pas suffisante pour permettre des analyses fines. Il faudra envisager de mettre à jour ce MNT à une résolution de 10 m. Avec une telle résolution, nous pouvons affiner les contours du zonage sismique dans les zones.

En ce qui concerne le spectre de dimensionnement par classe de sol, il est souvent conseillé d'utiliser les spectres standards proposés par le NEHRP (1994) compatible avec la classification des sols que nous utilisons. Un zonage sismique pour plusieurs villes du pays est disponible qui comprend une série de spectres de dimensionnement spécifiques à chaque classe de sol.

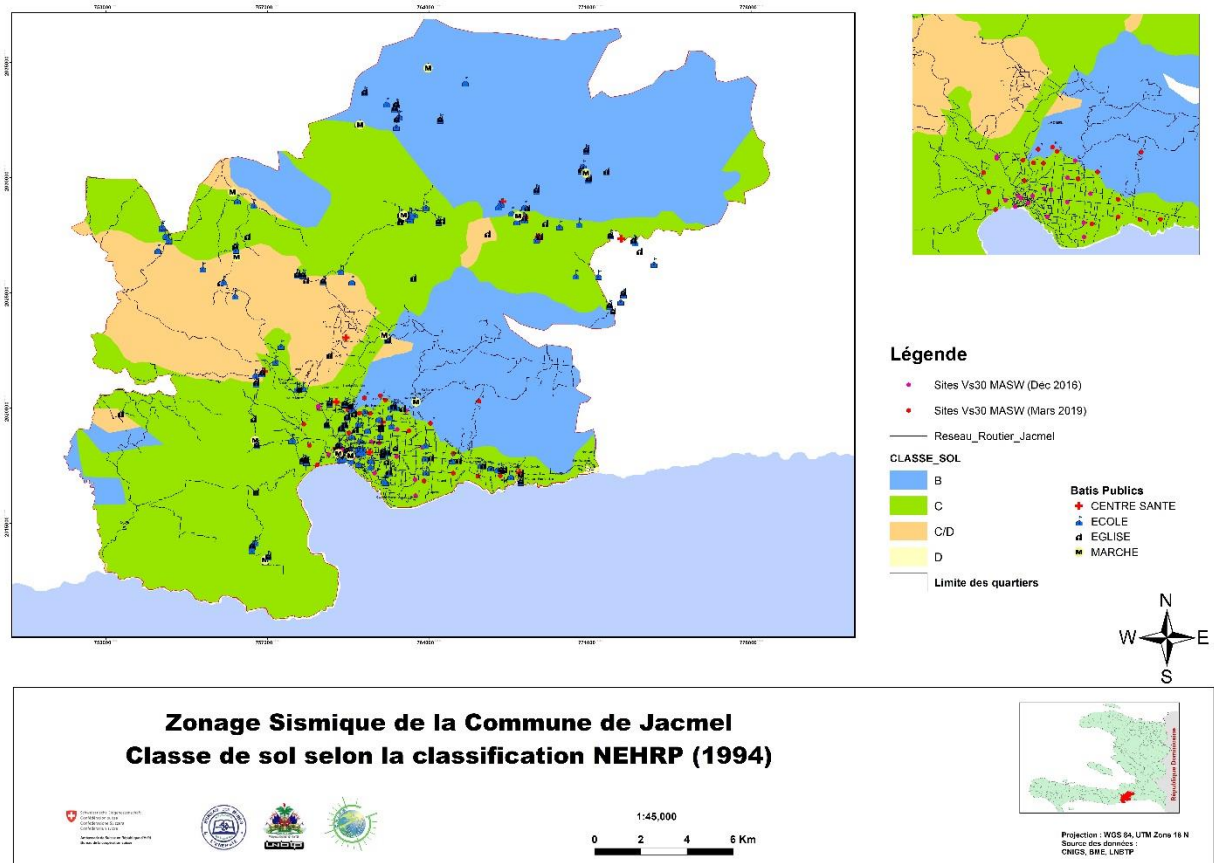


Figure 8 - Zonage sismique et sites de mesure sismique par classe de sol dans la commune de Jacmel

TABLEAU DE SYNTHÈSE DES MESURES H/V ET MASW										
ID	No	X	Y	Vs30 (m/s)	Profondeur atteint (m)	Équivalent HsurV (Hz)	Classe IBC	Commentaires	Fréquence propre (F0) HZ	
JCB MASW	51	763798	2016841	491.9	30	4.10	C	pic	3.06	
JCB MASW	52	763798	2016841	492.1	30	4.10	C	pic	3.02	
JCC MASW	53	765070	2017181	381.7	29	3.29	C	pic	3.28	
JCE MASW	54	766128	2017046	518.7	22	5.89	C	pic	2.16	
JCD MASW	55	767110	2017064	460.9	30	3.84	C	pic	2.97	
JCF MASW	56	766636	20177556	339.2	24	3.53	D	pic	4.16	
JCG MASW	57	765062	2018029	591.9	23.9	6.19	C	pas de pic clair	-	
JCA MASW	58	763141	2019013	636.4	30	5.30	C	pas de pic	-	
JCH MASW	59	766181	2020301	842.1	30	7.02	B	pas de pic clair	-	
JCI MASW	60	764076	2019347	1014.9	30	8.46	B	pas de pic	-	
JCJ MASW	61	760547	2018929	432.6	27	4.01	C	pic peu prononcé	4.84	
JCJ MASW	62	760547	2018929	386.7	22	4.39	C	pic peu prononcé	4.91	
JCK MASW	63	760488	2019927	360.8	17	5.31	C	pas de pic	-	
JCL MASW	64	761467	2019770	593.1	30	4.94	C	pic peu prononcé	1.63	
JCM MASW	65	760999	2019787	406.7	30	3.39	C	pic	2.66	
JCP MASW	66	761213	2020444	802.7	30	6.69	B	pas de pic clair	-	
JCT MASW	67	758834	2018378	377.9	30	3.15	C	pic peu prononcé	2.73	
JCU MASW	68	759164	2017532	431.3	29	3.72	C	pic	0.66	
JCR MASW	69	758583	2019313	371.1	30	3.09	C	pic	10.47	
JCO MASW	70	762124	2020343	701.8	30	5.85	C	pas de pic	-	
JCO MASW	71	762124	2020343	705.2	30	5.88	C	pas de pic	-	
JCN MASW	72	761910	2020543	843.8	30	7.03	B	pas de pic	-	

Tableau 3 - Tableau de synthèse des mesures MASW et H/V

En ce qui concerne le potentiel de liquéfaction, il a été proposé une analyse du potentiel de liquéfaction qui repose sur les informations du zonage sismique préliminaire et sur une approche qualitative de la susceptibilité des sols à la liquéfaction. L'aléa semble faible et bien évidemment concentré sur les sols de classe D en plaine. Comme indiqué pour le zonage sismique, cette première cartographie doit susciter des études complémentaires (étude géotechnique, identification des couches de sol) pour affiner le calcul du potentiel de liquéfaction.

Une fois cette phase achevée, les zones clairement identifiés devront faire l'objet d'une régulation spécifique à la délivrance du permis de construire. Des mesures devront être conseillées aux propriétaires pour combattre le phénomène.

5.4 MESURES DE MITIGATION

Le zonage sismique préliminaire en classe de sol indique des zones en classe de sol D et C avec des risques d'amplification entre 1 à 5 Hz. Les limites de ces zones sont encore préliminaires et des mesures complémentaires seront nécessaires pour les affiner et les confirmer. Cependant, cette première cartographie peut à la fois

- Servir de base pour informer la population sur l'importance de prendre en compte les effets de site lors de la construction d'une nouvelle structure
- Servir de base de travail pour mettre en place les règles de construction spécifiques dans les zones identifiées à risque.
- Servir d'outil pour renforcer la prise de conscience du danger sismique dans les zones d'extension de la ville
- Susciter le besoin d'affiner l'étude sur ce secteur et de l'étendre à d'autres secteurs
- faciliter l'identification des secteurs urbains pour lesquels des mesures de renforcement de bâtiments publics (écoles, centre de santé, etc.) et d'importance stratégiques (postes de police de pompiers, etc.) seraient nécessaires.

Au niveau des sites où il y a risque d'effet de site fort, il faut prendre des dispositions pour adapter la construction avec la situation du site. L'une des possibilités, c'est de concevoir des bâtiments d'une

manière à avoir des fréquences différentes des fréquences du site pour éviter la résonance. Si ce n'est pas possible, il faut dimensionner la structure des ouvrages en conséquence. Il existe des formules forfaitaires pour évaluer la période fondamentale d'un bâtiment selon le nombre de niveau et donc d'obtenir sa fréquence.

Le code Américain UBC 97 propose d'estimer la période fondamentale T du bâtiment en fonction de la hauteur (h_n) de l'immeuble depuis les fondations jusqu'au dernier étage.

Pour tous les bâtiments, la valeur T peut être approchée à partir de la formule

$$T = C_t h_n^{3/4}$$

Où:

$C_t = 0,0853$ pour les ossatures en portique en acier résistant aux moments ;

$C_t = 0,0731$ pour les ossatures en portique en béton armé résistant aux moments ;

$C_t = 0,0488$ pour toutes les autres structures ;

Pour des bâtiments de hauteur étage h_i entrant dans la dernière catégorie ($C_t = 0,0488$) ayant un nombre de niveau n , la fréquence ($f=1/T$) fondamentale peuvent être approchée des valeurs du tableau suivant.

f (Hz)	hn (m)	n	hi (m)
8.99	3	1	3
5.35	6	2	3
3.94	9	3	3
3.18	12	4	3
2.69	15	5	3
2.34	18	6	3
2.09	21	7	3
1.89	24	8	3
1.73	27	9	3
1.60	30	10	3
1.49	33	11	3
1.39	36	12	3
1.31	39	13	3
1.24	42	14	3
1.18	45	15	3
1.12	48	16	3
1.07	51	17	3
1.03	54	18	3
0.99	57	19	3
0.95	60	20	3

$C_t = 0.0488$ pour des bâtiments courants.

Le tableau suivant résume les sites où il faut éviter certains bâtiments en fonction du nombre de niveau n .

Pour apprécier cette formule vis-à-vis de la réalité haïtienne, il faudrait faire quelques mesures de fréquence de bâtiments courants en Haïti (1 à 10 niveaux).

X	Y	Vs30 (m/s)	Classe IBC	Commentaires	Fréquence propre (F0) HZ	Portance du sol de fondation	Nombre niveau	risque	remarque	effet
763798	2016841	491.9	C	Pic	3.06	Moyenne	4@5	fort	defavorable	
763798	2016841	492.1	C	Pic	3.02	Moyenne	4@5	fort	defavorable	
765070	2017181	381.7	C	Pic	3.28	Faible à moyenne	4@5	fort	defavorable	
766128	2017046	518.7	C	Pic	2.16	Moyenne	6@7	fort	defavorable	
767110	2017064	460.9	C	Pic	2.97	Moyenne	4@5	fort	defavorable	
766636	20177556	339.2	D	Pic	4.16	Faible à moyenne	2@3	fort	defavorable	
765062	2018029	591.9	C	Pas de pic clair	-	Moyenne	all	nul	favorable	
763141	2019013	636.4	C	Pas de pic	-	Moyenne à bonne	all	nul	favorable	
766181	2020301	842.1	B	Pas de pic clair	-	Bonne	all	nul	favorable	
764076	2019347	1014.9	B	Pas de pic	-	Bonne	all	nul	favorable	
760547	2018929	432.6	C	Pic peu prononcé	4.84	Moyenne	2@3	faible	peu favorable	
760547	2018929	386.7	C	Pic peu prononcé	4.91	Faible à moyenne	2@3	faible	peu favorable	
760488	2019927	360.8	C	Pas de pic		Faible à moyenne	all	nul	favorable	
761467	2019770	593.1	C	Pic peu prononcé	1.63	Moyenne	9@10	faible	peu favorable	
760999	2019787	406.7	C	Pic	2.66	Faible à moyenne	4@5	faible	peu favorable	
761213	2020444	802.7	B	Pas de pic clair	1.16	Bonne	all	nul	favorable	
758834	2018378	377.9	C	Pic peu prononcé	2.73	Faible à moyenne	4@5	faible	peu favorable	
759164	2017532	431.3	C	Pic	2.8	Moyenne	4@5	fort	defavorable	
758583	2019313	371.1	C	Pic	10.47	Faible à moyenne	1	faible	peu favorable	
762124	2020343	701.8	C	Pas de pic	5.63	Moyenne à bonne	all	nul	favorable	
762124	2020343	705.2	C	Pas de pic	1.3	Moyenne à bonne	all	nul	favorable	
761910	2020543	843.8	B	Pas de pic	-	Bonne	all	nul	favorable	

recommandation	Effet de site sur batiment courant
favorable	sans effet de site
peu favorable	moyen
defavorable	fort

Favorable : aucun risque d'amplification quelque soit le nombre de niveau du bâtiment.

Peu favorable : faible amplification ou pas clair

Défavorable : forte amplification, construction interdite en absence d'un spécialiste en structure

6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Il en ressort de cette campagne que les résultats des mesures se rapprochent des valeurs antérieures en termes de classification sismique de sol qui est dominé par des sites de classe C. A l'approche du littoral, la réponse sismique est enregistrée à basse fréquence (< 1Hz). Des sites de classe B sont enregistrés avec des vitesses allant de 800 m/s à 1100 m/s sans risque d'effet de site notable. En certains endroits de la commune, des risques d'amplifications sont importants avec des pics autour de 2 Hz à 4 Hz. L'amplification est très importante (résonance) quand la fréquence du bâtiment est très proche de la fréquence du sol. Les situations de résonance sont à éviter autant que possible. Si ce n'est pas possible, ce sont des spécialistes en calcul des structures qui doivent calculer ces bâtiments. Ils devront prendre en compte la résonance possible de l'immeuble avec le sol dans son dimensionnement. Les bâtiments de 4 à 5 niveaux sont à éviter dans les environs de 6 sites. Certains sites sont défavorables pour les bâtiments de 2 à 3 niveaux. 9 sites sont favorables pour les constructions sans risque d'amplification. Une modification (augmentation ou diminution) du nombre de niveaux du bâtiment peut être un moyen pour lutter la contre résonance dans les sites défavorables.

Les experts nationaux recommandent de

- continuer la campagne de mesure dans les autres sections communales en extension afin de cartographier l'aléa sismique sur toute la commune de Jacmel. Les résultats de ces travaux devront être mis à la disposition des autorités locales afin de mieux gérer le risque sismique au niveau de la région.
- informer la population sur l'importance de prendre en compte les effets de site lors de la construction d'une nouvelle structure et d'éviter autant que possible la résonance des bâtiments avec le sol
- mettre en place des règles de construction spécifiques dans les zones identifiées à risque.
- Identifier des secteurs urbains pour lesquels des mesures de renforcement de bâtiments publiques (écoles, centre de santé, etc.) et d'importance stratégiques (postes de police de pompiers, etc.) seraient nécessaires.
- Prendre quelques mesures (H/V) des fréquences de bâtiments courants en Haïti (1 à 10 niveaux) pour apprécier la formule utilisée de la fréquence fondamentale des bâtiments.

Signature des Experts Nationaux

Berthoumieux Junior JEAN

Michael SAIMBERTIL

Samuel GENEVA

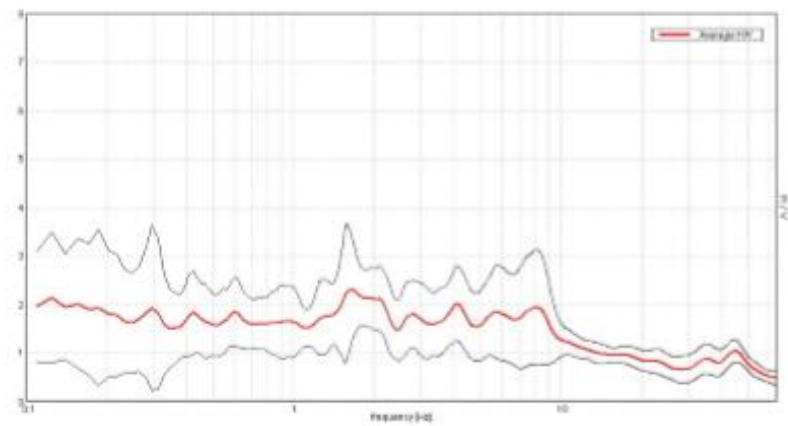
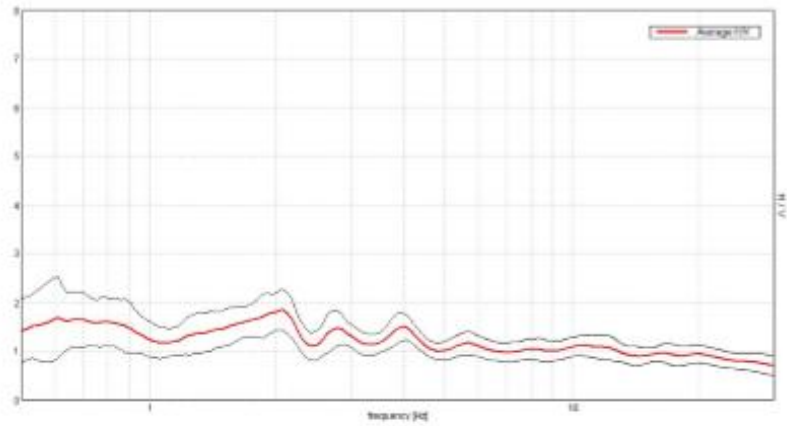
Ronaldine GILLES

Julio JEAN-PHILIPPE

Marceau JEAN BAPISTE

Annexe 1
Fiche descriptive des sites

Fiche#1: A

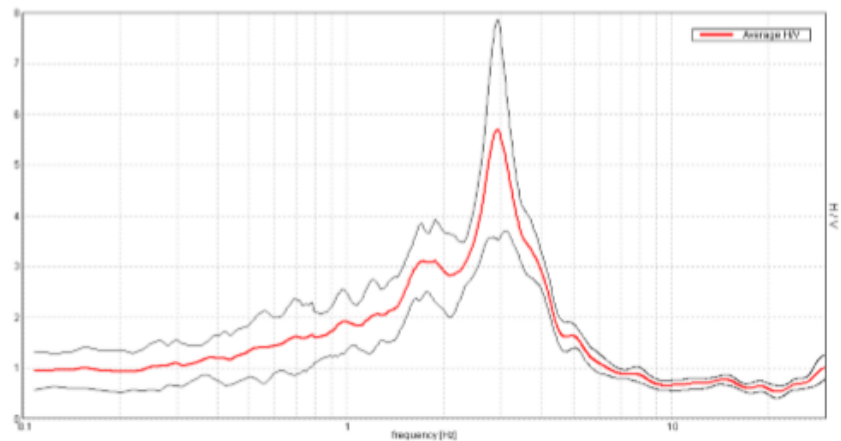


JCA: X= 763141; Y=2019013

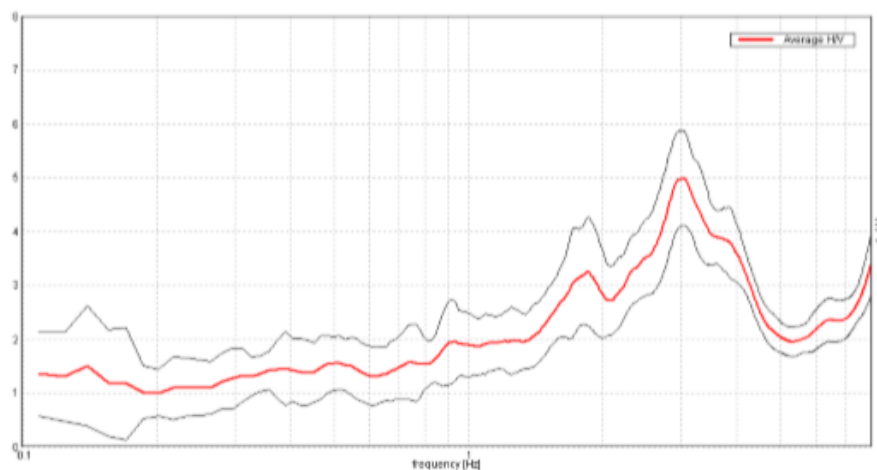
Pas d'effet de site, vs30=636.4 m/s, site de classe C

Fiche#2:B

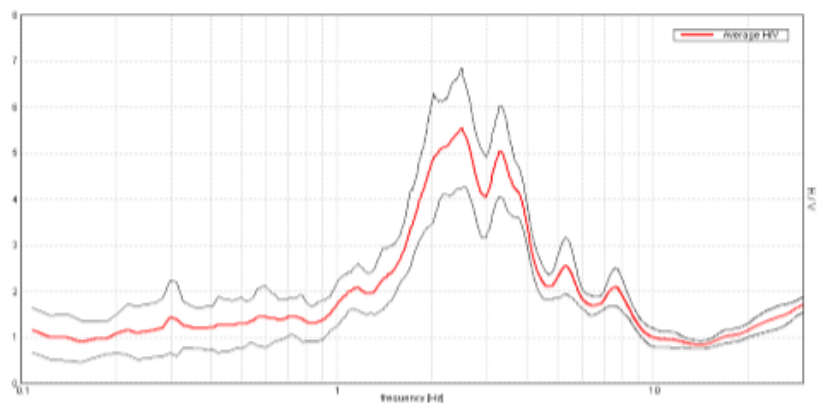
Max. HV at 2.92 ± 0.01 Hz. (in the range 0.5 - 30.0 Hz)



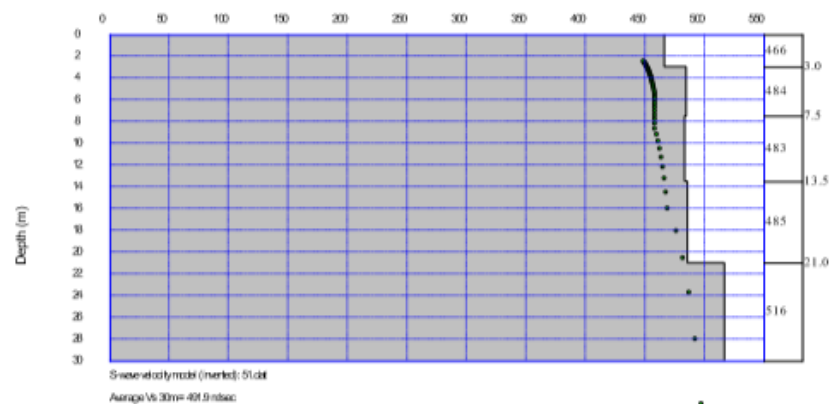
Max. HV at 3.02 ± 0.06 Hz. (in the range 0.5 - 6.0 Hz)



Max. HV at 2.5 ± 0.08 Hz. (in the range 0.5 - 30.0 Hz)



S-wave velocity (m/s)

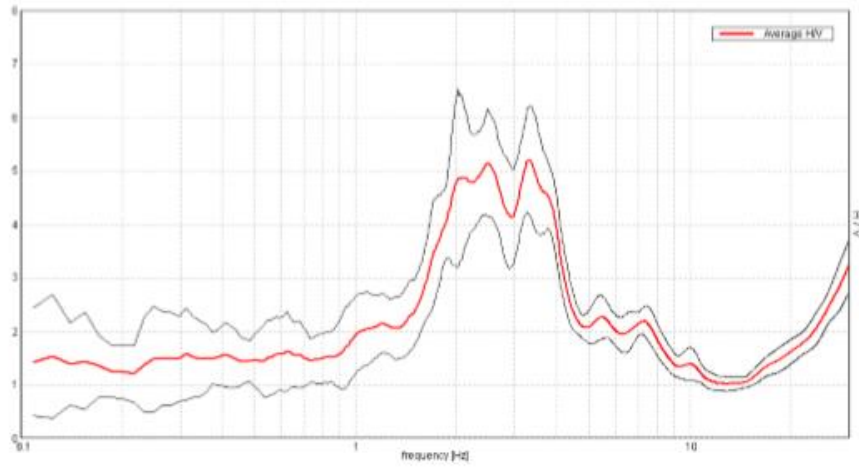


JCB: X=763798; Y=2016841

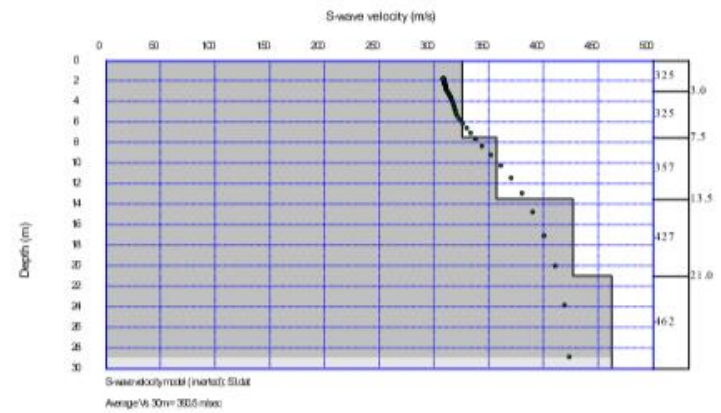
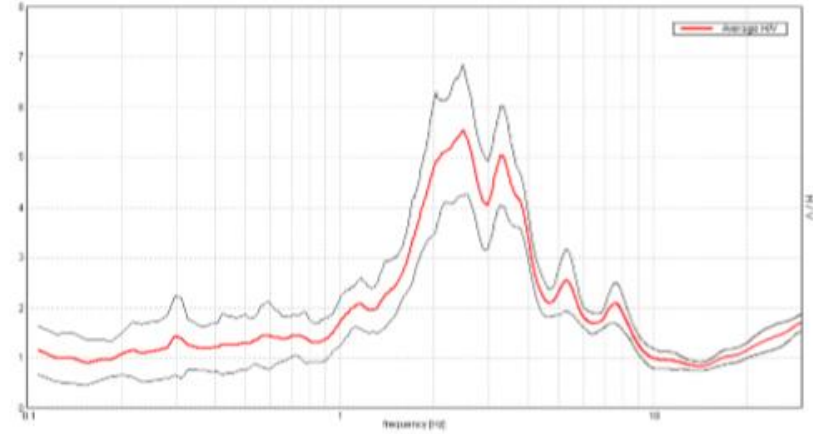
Effet de site entre 2.5 Hz et 3.02 Hz, Vs30=491.9 m/s, site de classe C

Fiche3: C

Max. HVV at 3.20 a 0.09 Hz. (n the range 0.5 - 30.0 Hz)



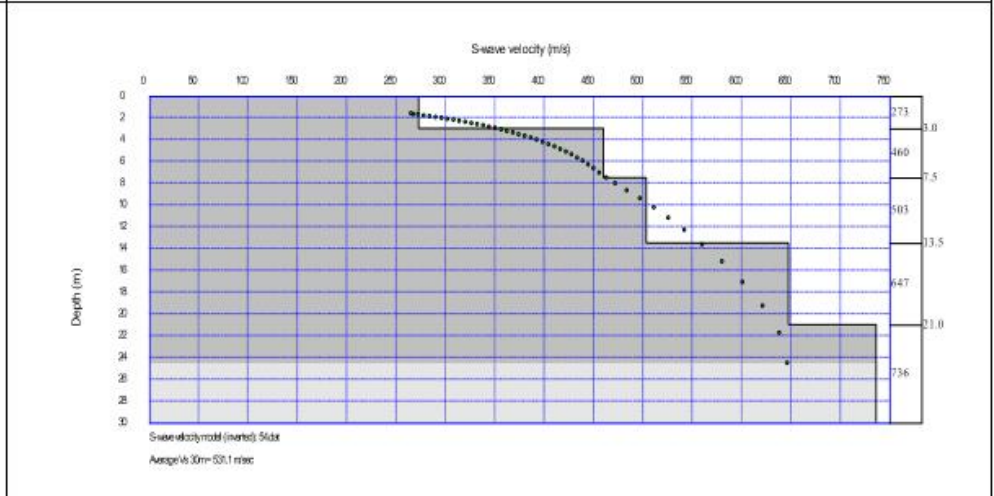
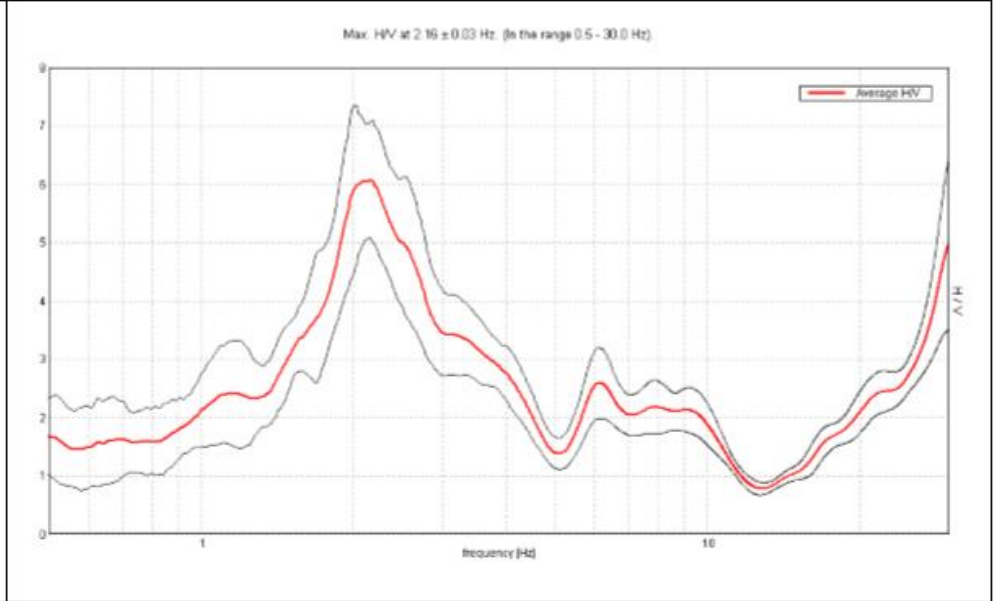
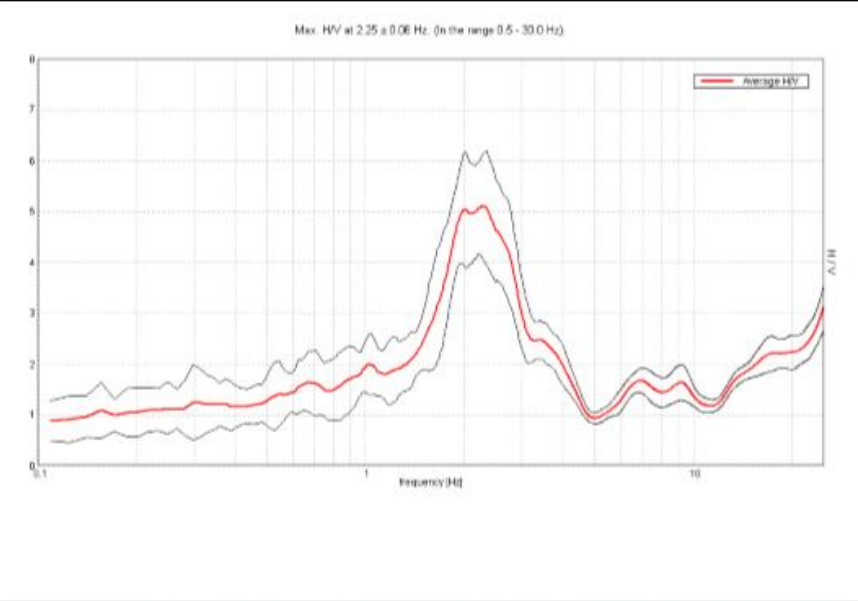
Max. HVV at 2.5 a 0.09 Hz. (n the range 0.5 - 30.0 Hz)



JCC: X=765070; Y=2017181

Effet de site entre 2.5 Hz et 3.28 Hz. Vs30=390.5 m/s, site de classe C.

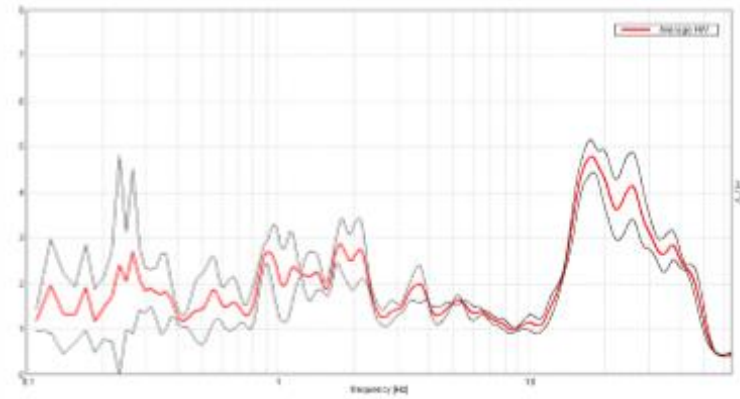
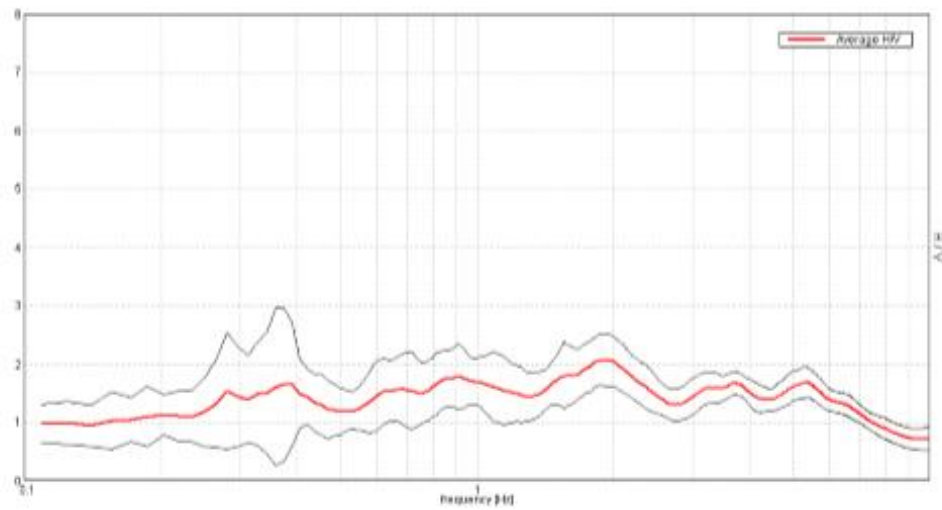
Fiche5:E



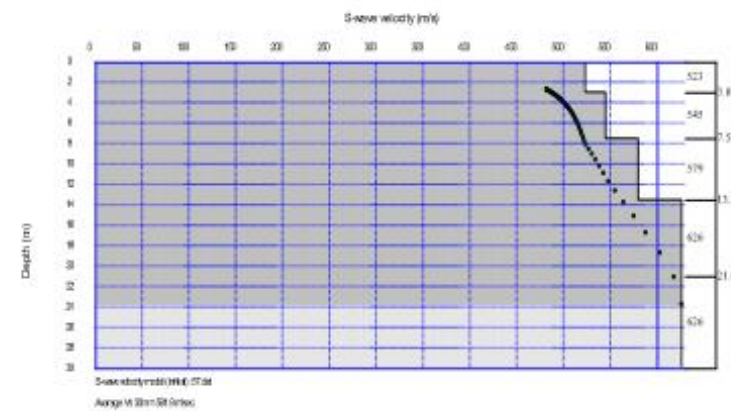
JCE: X=766128; Y=2017046

Effet de site entre 2.16 Hz et 2.25 Hz, Vs30=531.1 m/s, site de classe C

Fiche#7: G

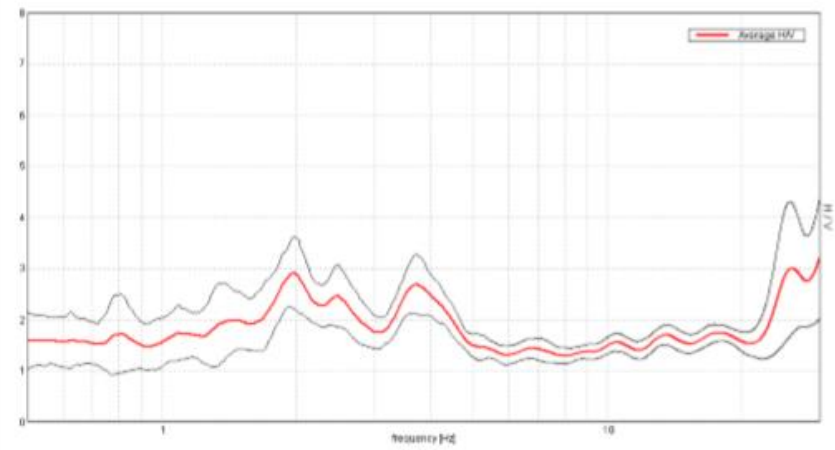
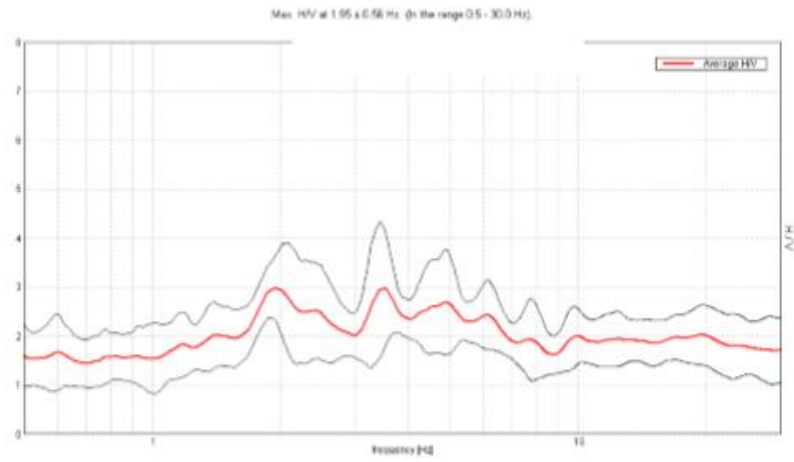


JCG: X= 765062; Y=2018029

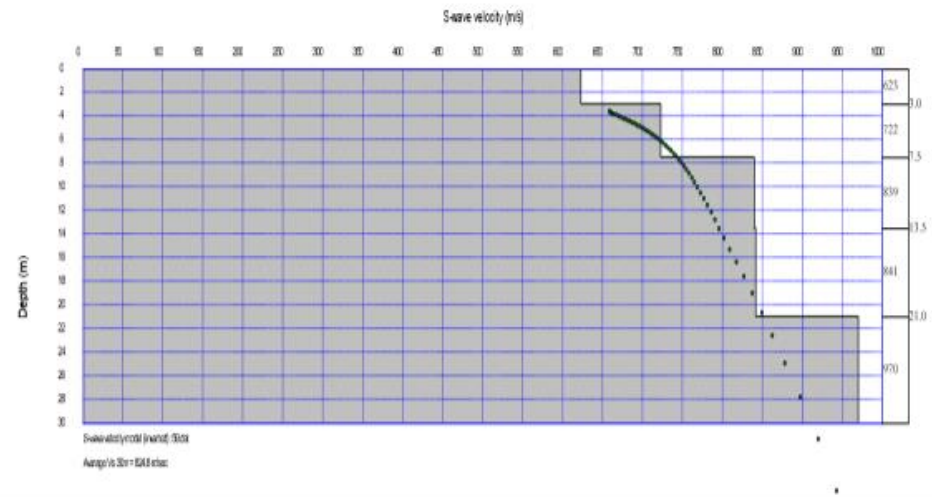


Pas d'effet de site Vs30=591.9 m/s site de classe C.

Fiche#8-H

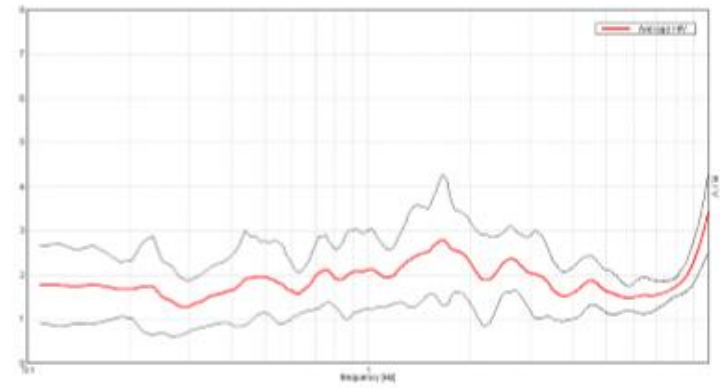
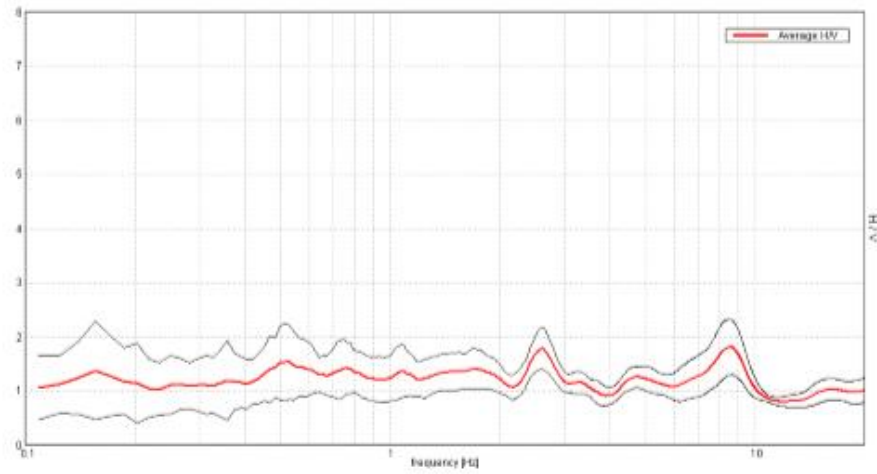


JCH: X= 766181; Y=2020301

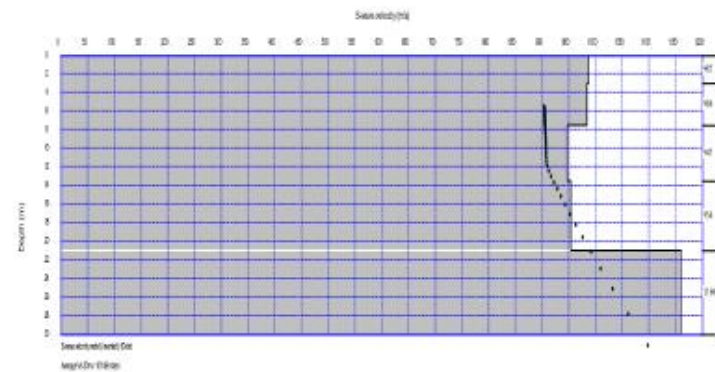


Pas d'effet de site, vs30=824.8 m/s, site de classe B

Fiche#9-I



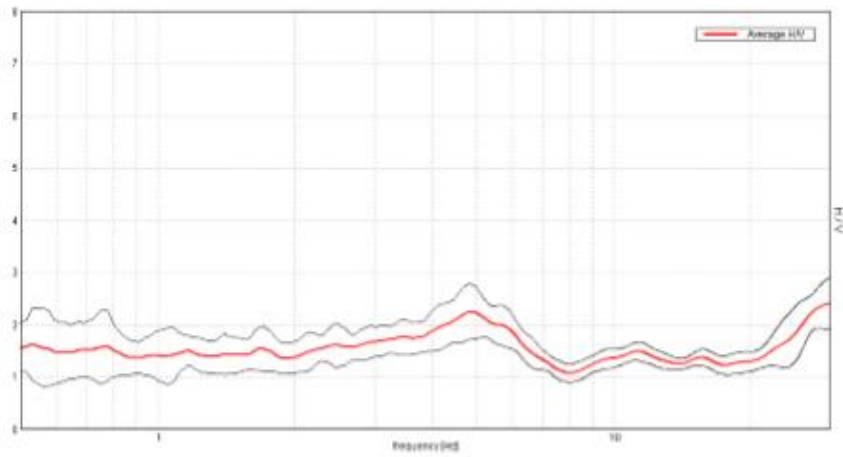
JCI: X=764076; Y=2019347



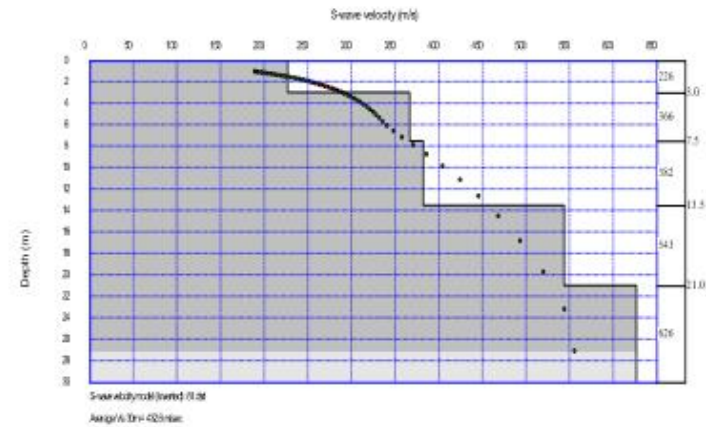
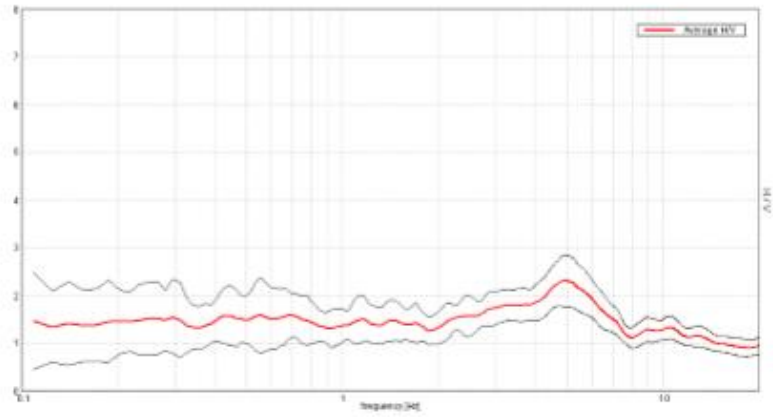
Pas d'effet de site, Vs30=1014.9 m/s, site de classe B

Fiche#10-J

Max. HV at 4.84 ± 0.03 Hz (in the range 0.5 - 20.0 Hz)



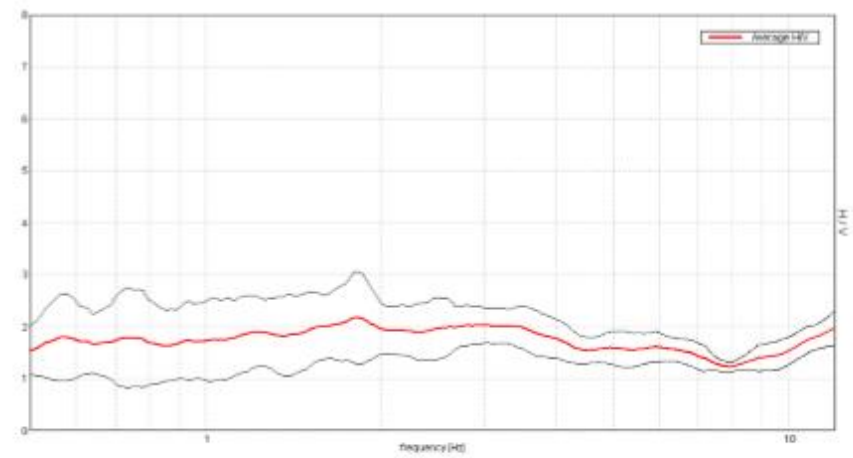
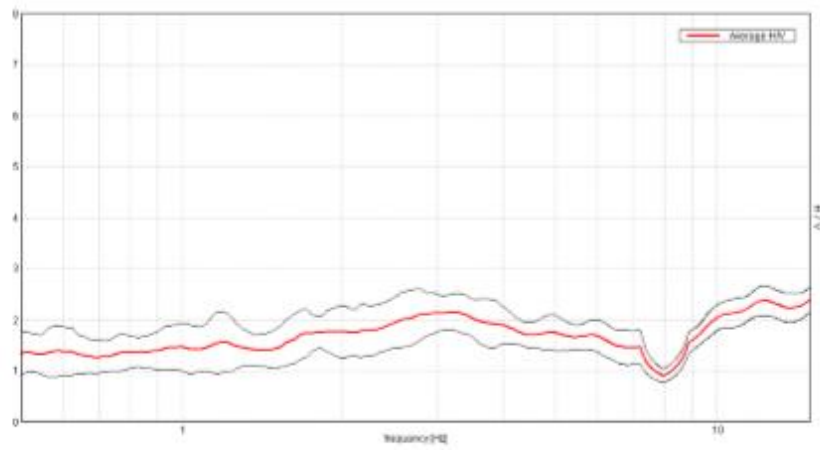
Max. HV at 4.91 ± 0.07 Hz (in the range 0.5 - 20.0 Hz)



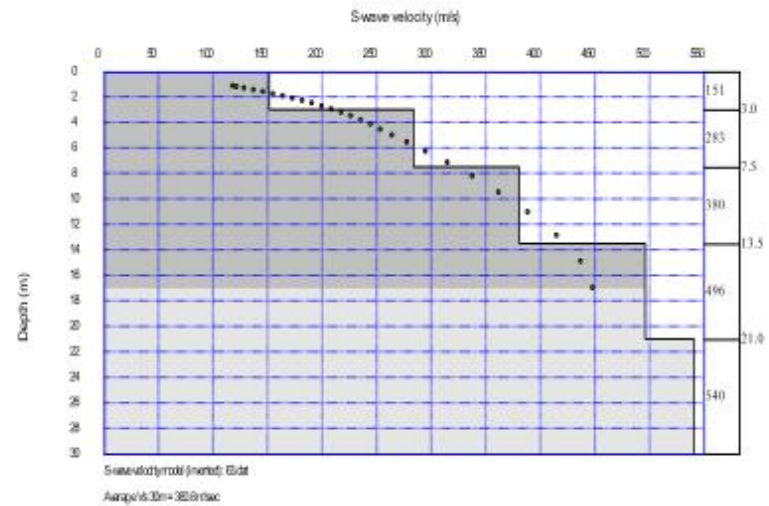
JCJ: X=760547; Y=2018929

Faible effet de site entre 4.84 Hz et 4.91 Hz. Vs30=432.6 m/s, site de classe C.

Fiche#11: K

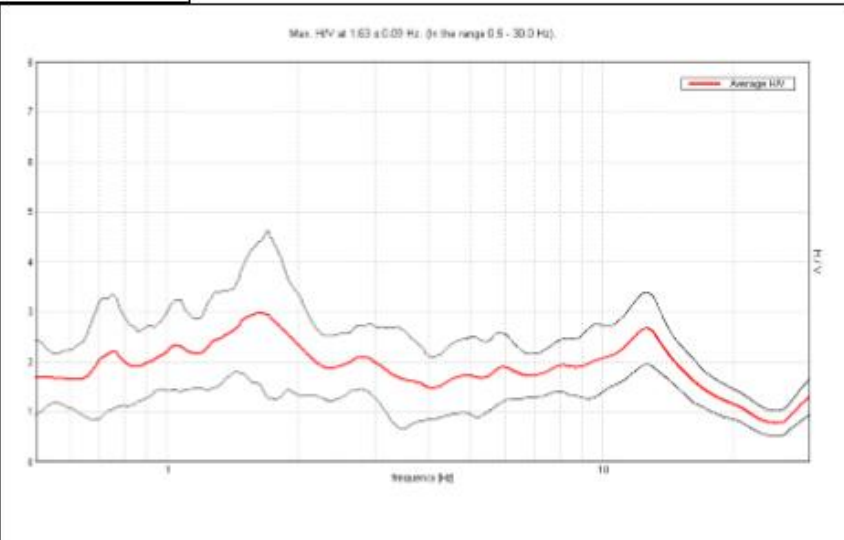
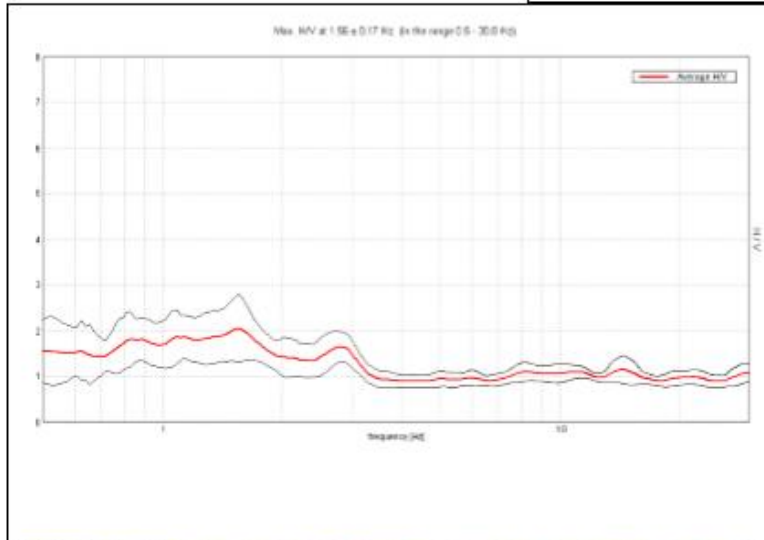


JCK: X=760488; Y=2019927

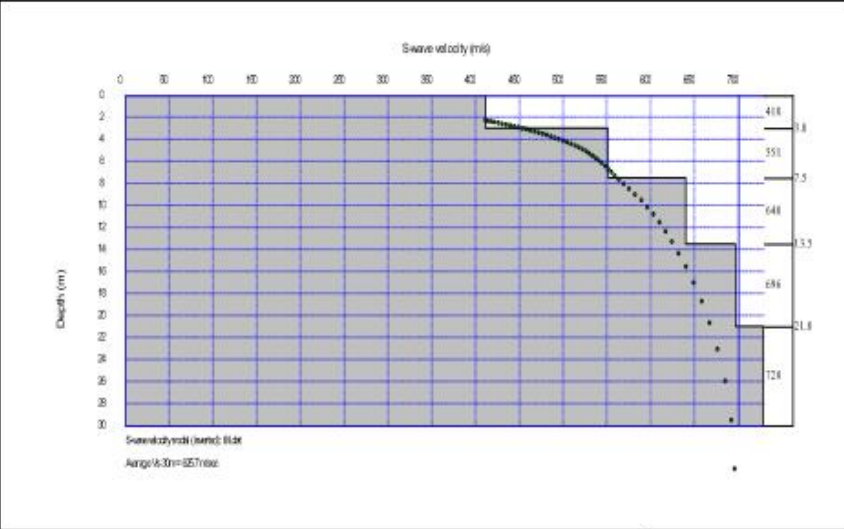


Pas d'effet de site, vs30=360.8 m/s, site de classe C.

Fiche#12: L



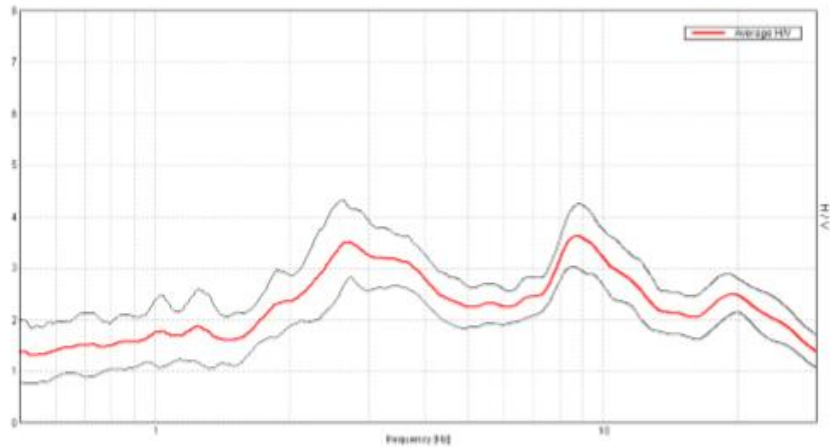
JCL: X=761467; Y=2019770



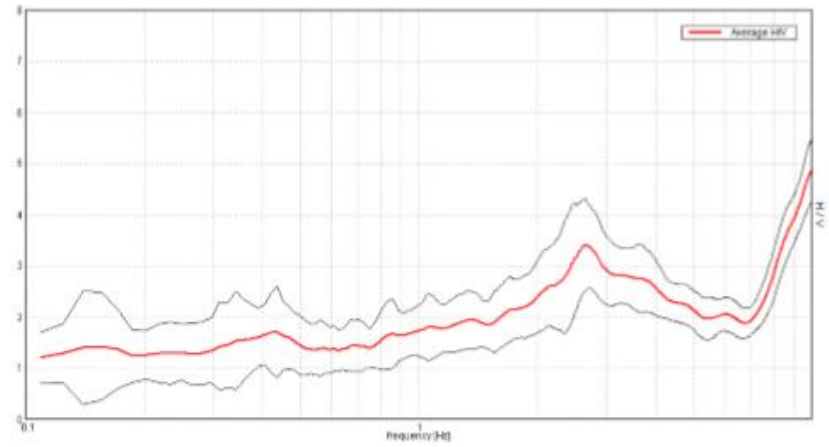
Faible effet de site entre 1.56 Hz à 1.63 Hz. Vs30=625.7 m/s, site de classe C

Fiche#13: M

Max. HV at 2.7 ± 0.06 Hz. (in the range 0.5 - 6.0 Hz)

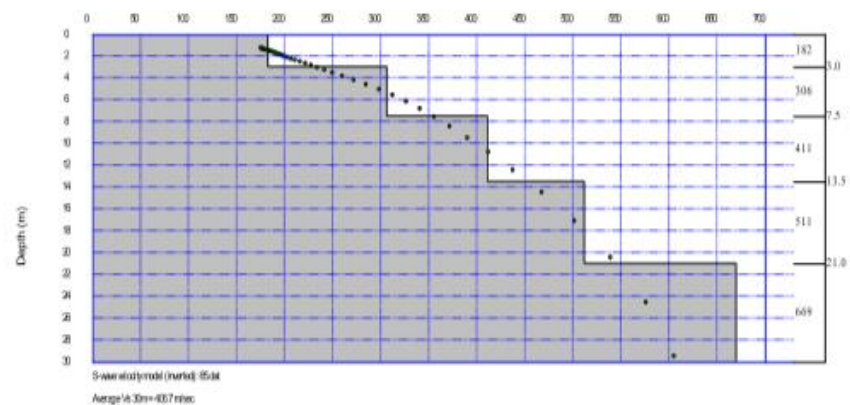


Max. HV at 2.06 ± 0.05 Hz. (in the range 0.5 - 6.0 Hz)



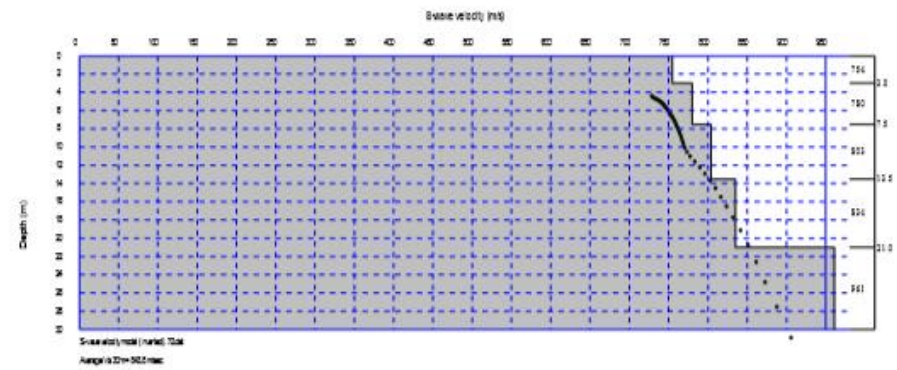
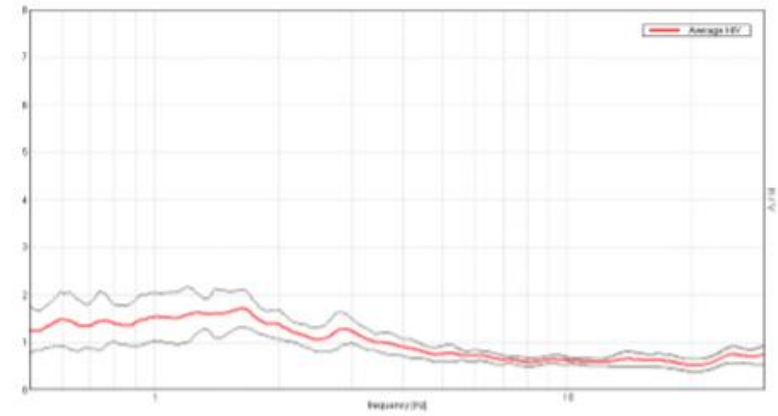
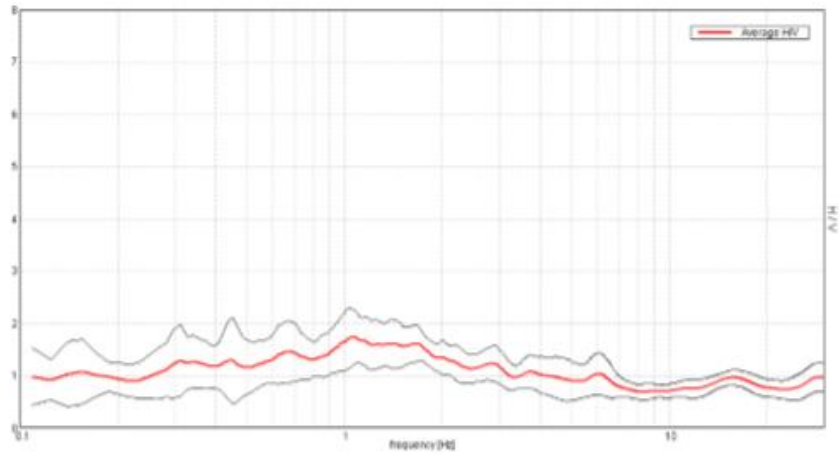
JCM: X=760999; Y=2019787

S wave velocity (m/s)



Effet de site entre 2.66 Hz et 2.7 Hz. Vs30=406.7 m/s, site de classe C.

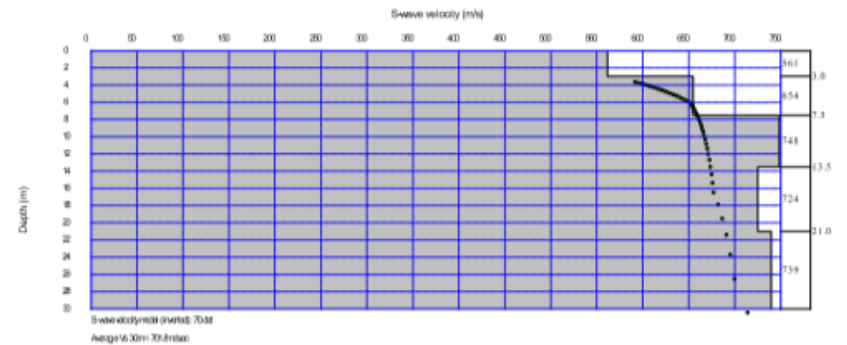
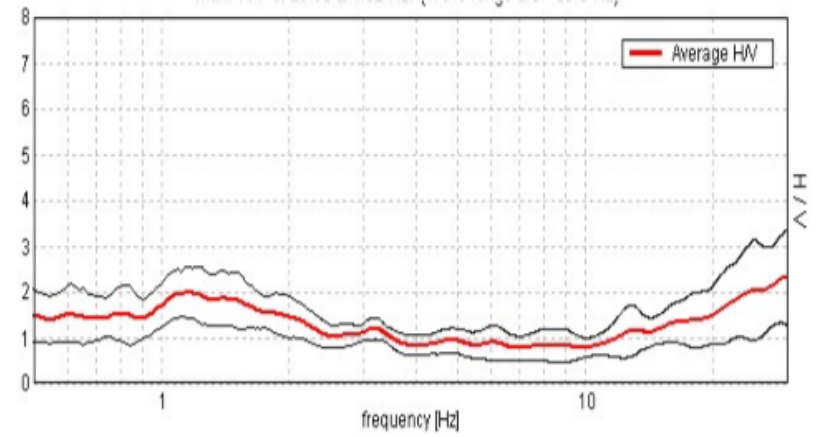
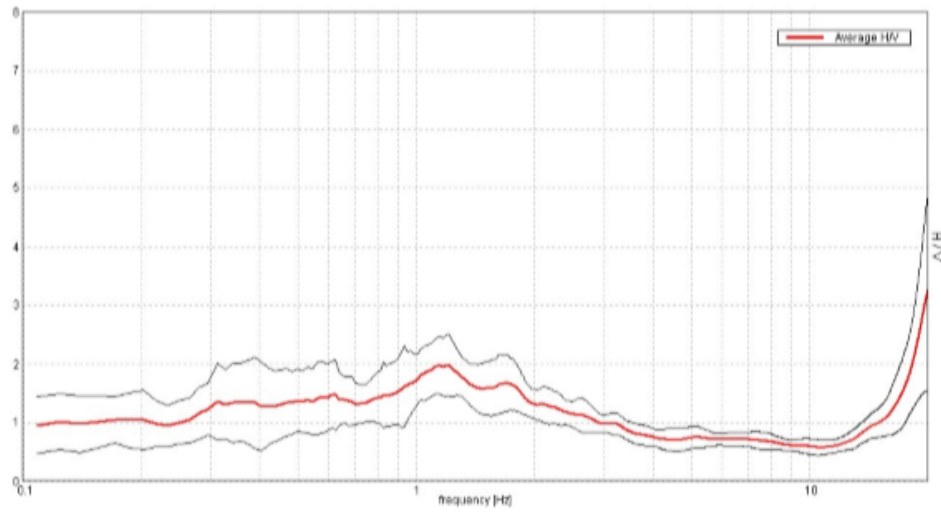
Fiche#14: N



JCN: X= 761910; Y=2020543;

Pas d'effet de site. Vs30=843.8 m/s, site de classe B.

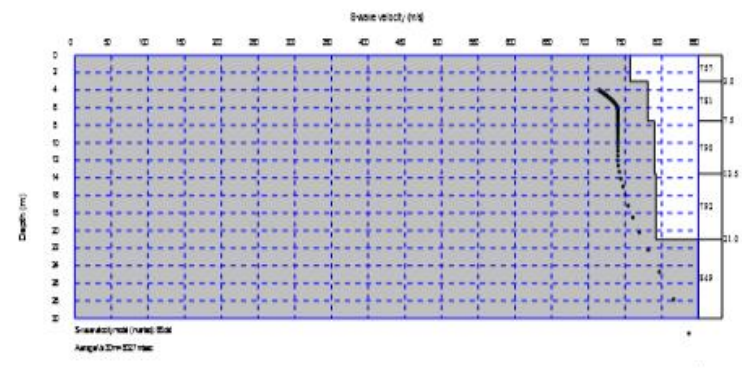
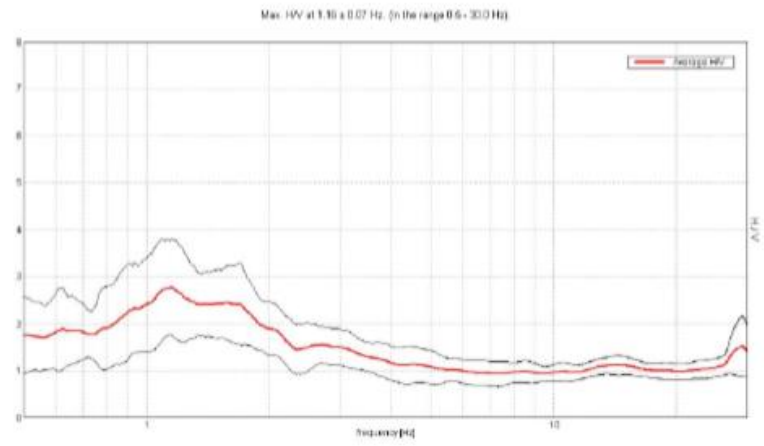
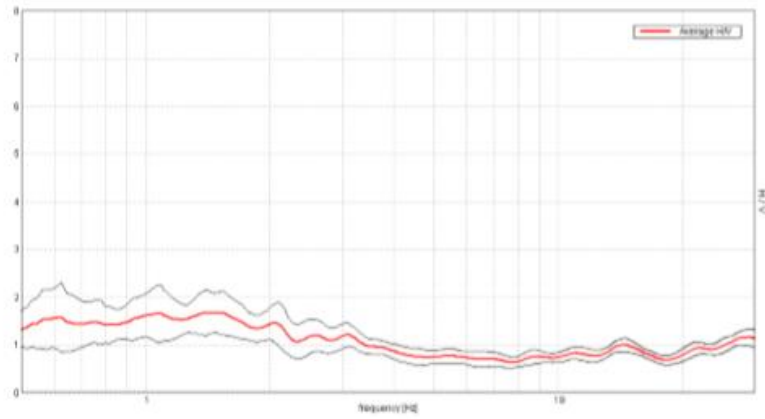
Fiche#15-O



JCO: X= 762124; Y=2020343;

Pas d'effet de site. Vs30=701.8 m/s, site de classe C.

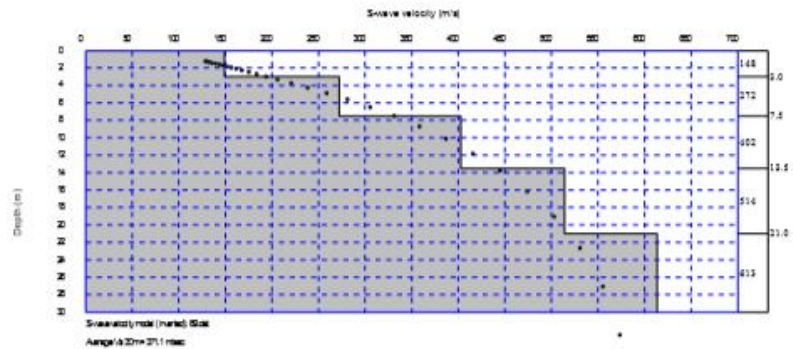
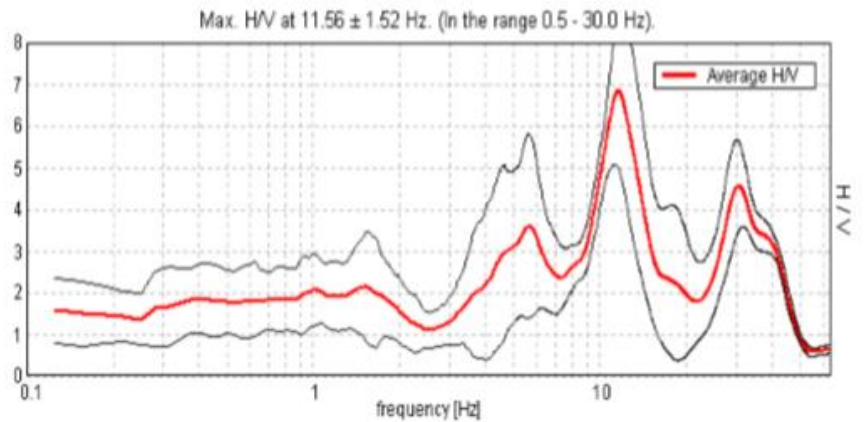
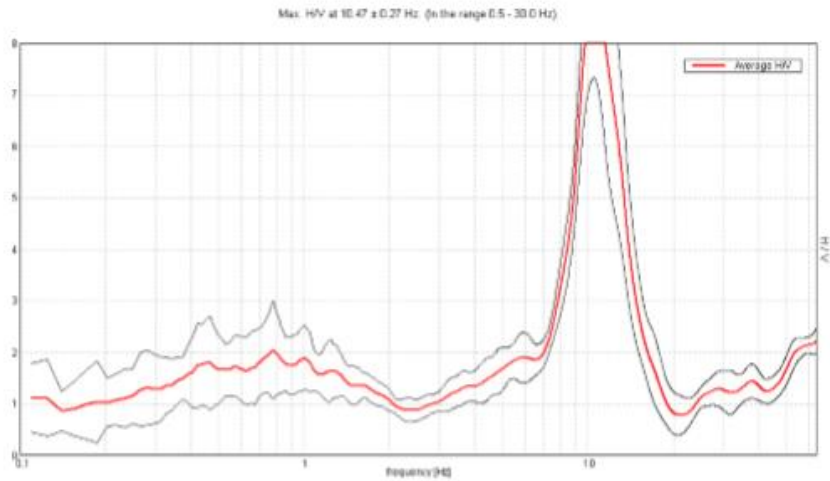
Fiche#16-P



JCP: X=761213; Y=2020444

Pas d'effet de site notable. Légère amplification au graphique droit.
vs30=802.7 m/s, site de classe B.

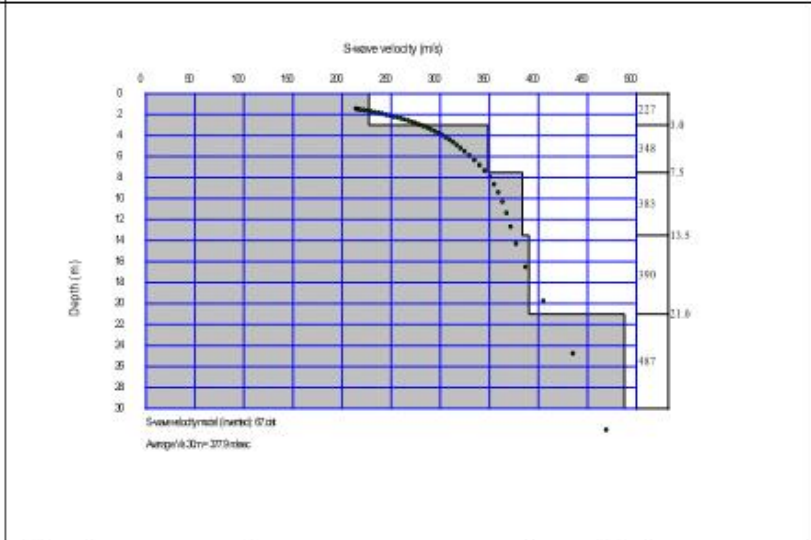
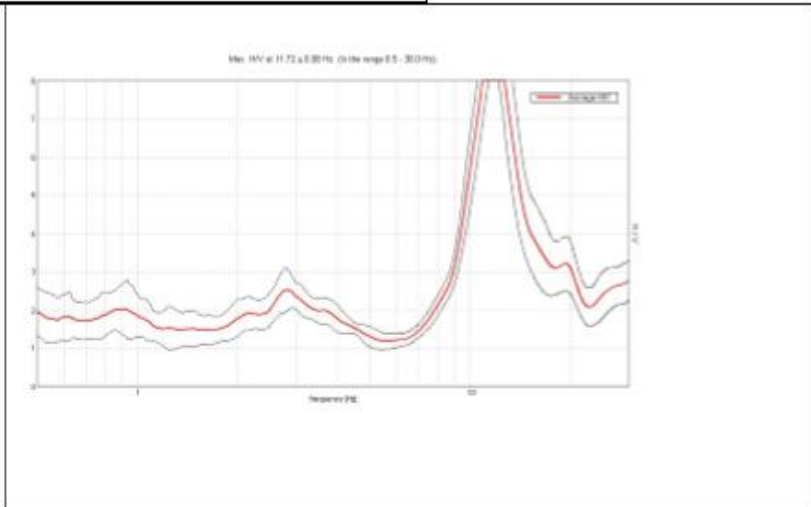
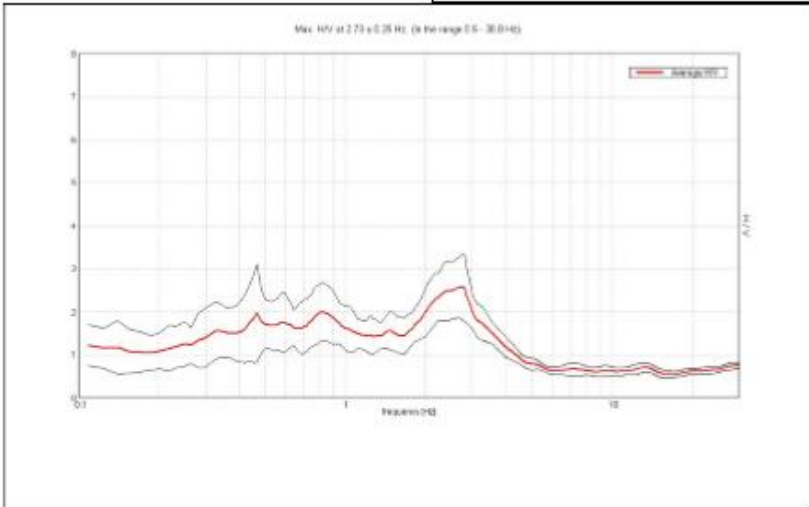
Fiche#17:R



JCR: X=758583;Y=2019313;

Effet de site autour de 10.47 Hz et 11.56 Hz. Réponse superficielle. Vs30=371.1 m/s, site de classe C.

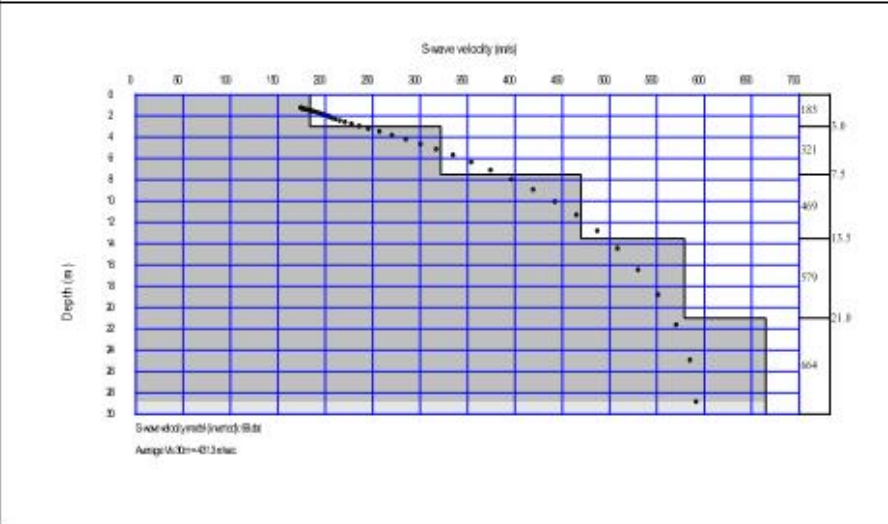
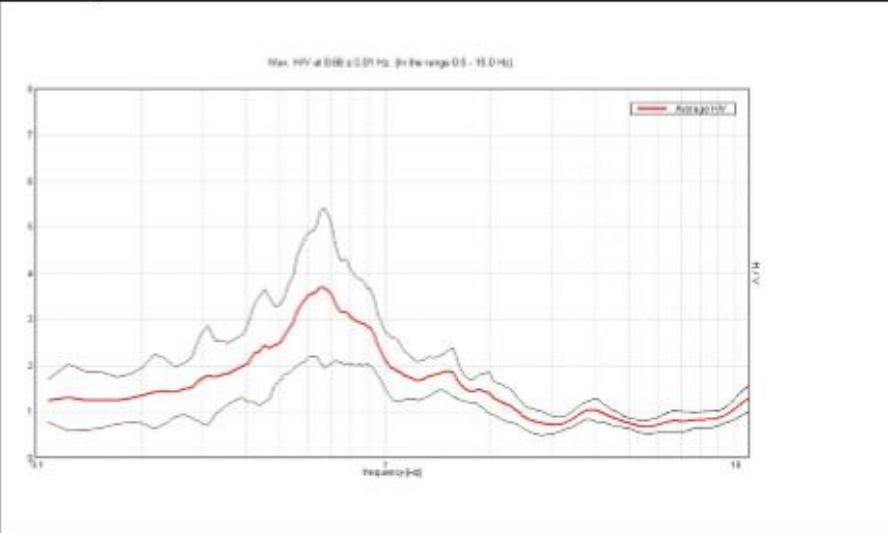
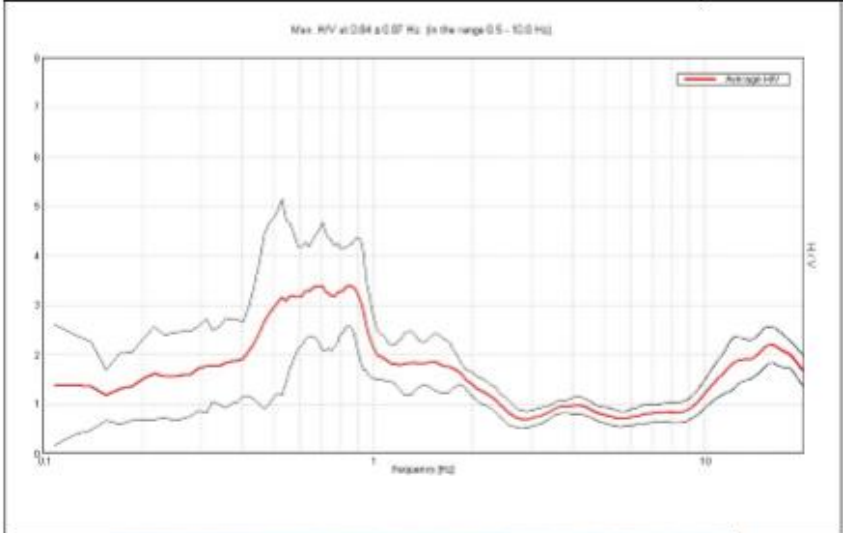
Fiche#18-T



JCT: X=758834; Y=2018378

Effet de site autour de 2.73 Hz. Vs30=377.9 m/s, site de classe C.

Fiche#19-U

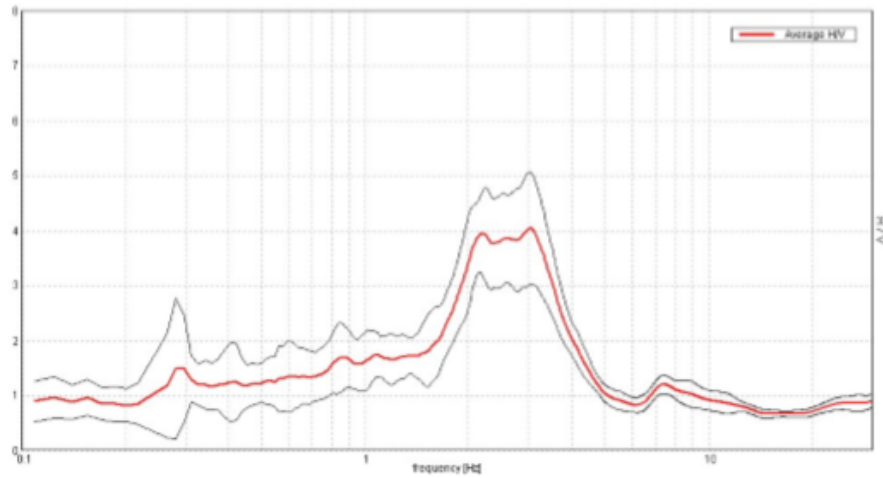


JCU: X=759164; Y=2017532

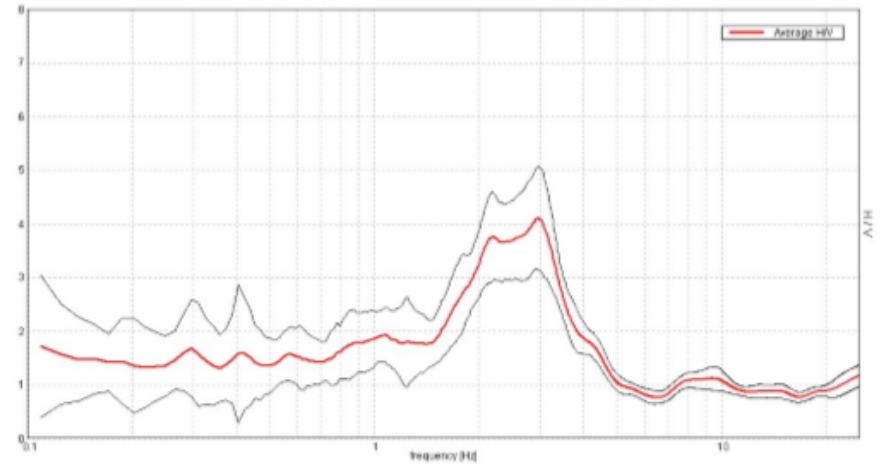
Effet de site entre 0.66 Hz et 0.84 Hz. Vs30=431.3 m/s, site de classe C.

Fiche20-D

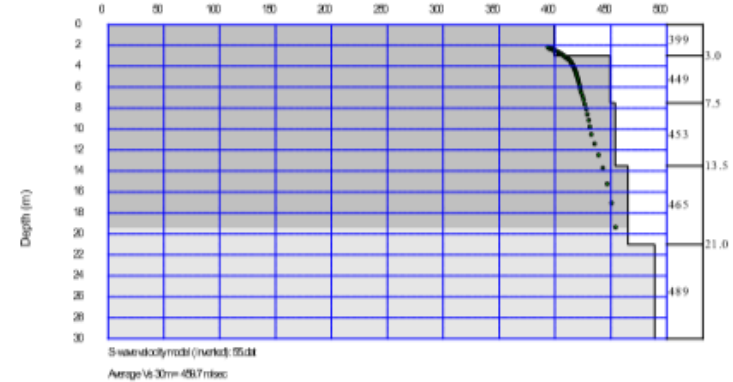
Max. HVV at 3.03 ± 0.21 Hz. (in the range 0.5 - 30.0 Hz)



Max. HVV at 2.97 ± 0.16 Hz. (in the range 0.5 - 30.0 Hz)



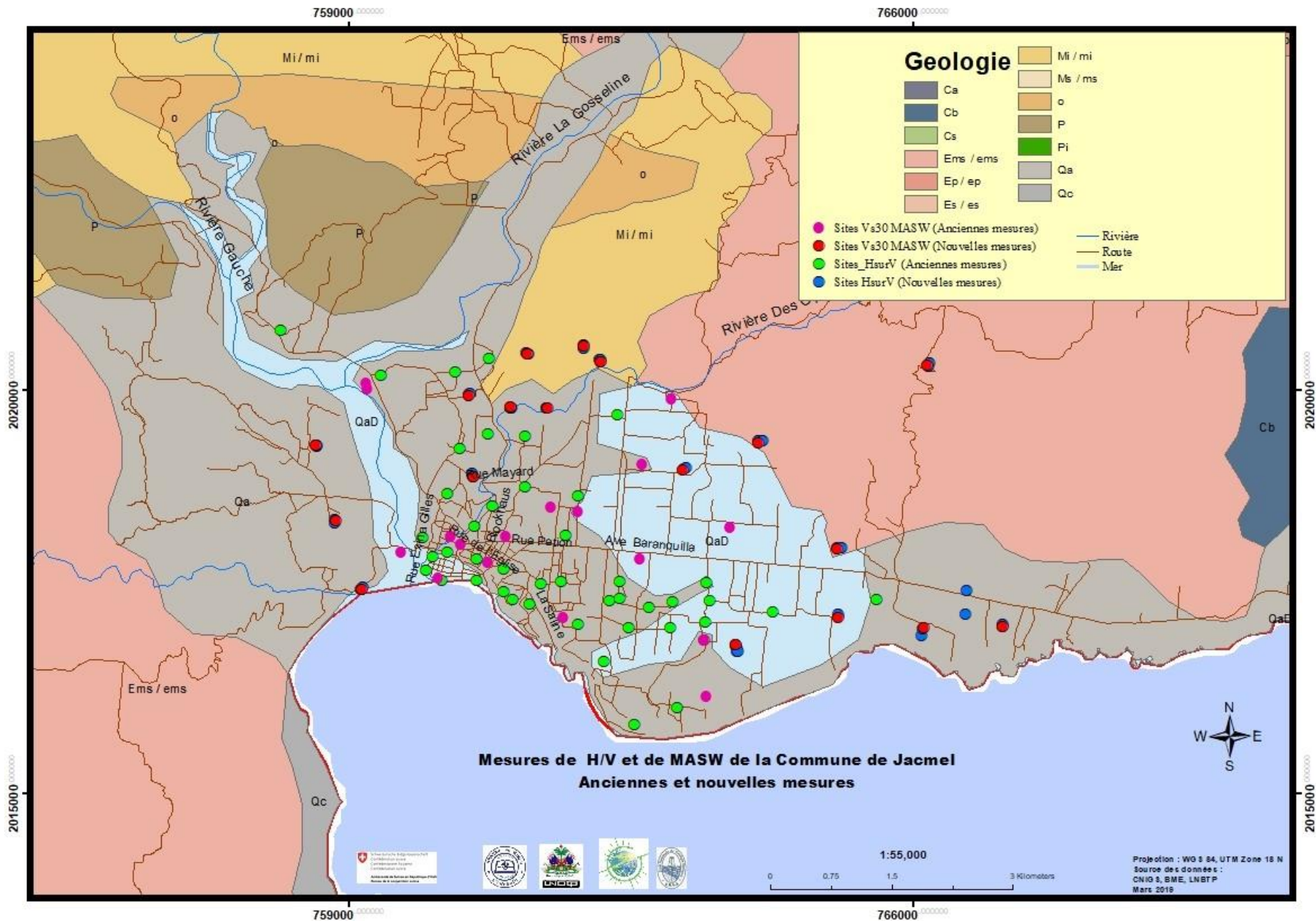
S-wave velocity (m/s)



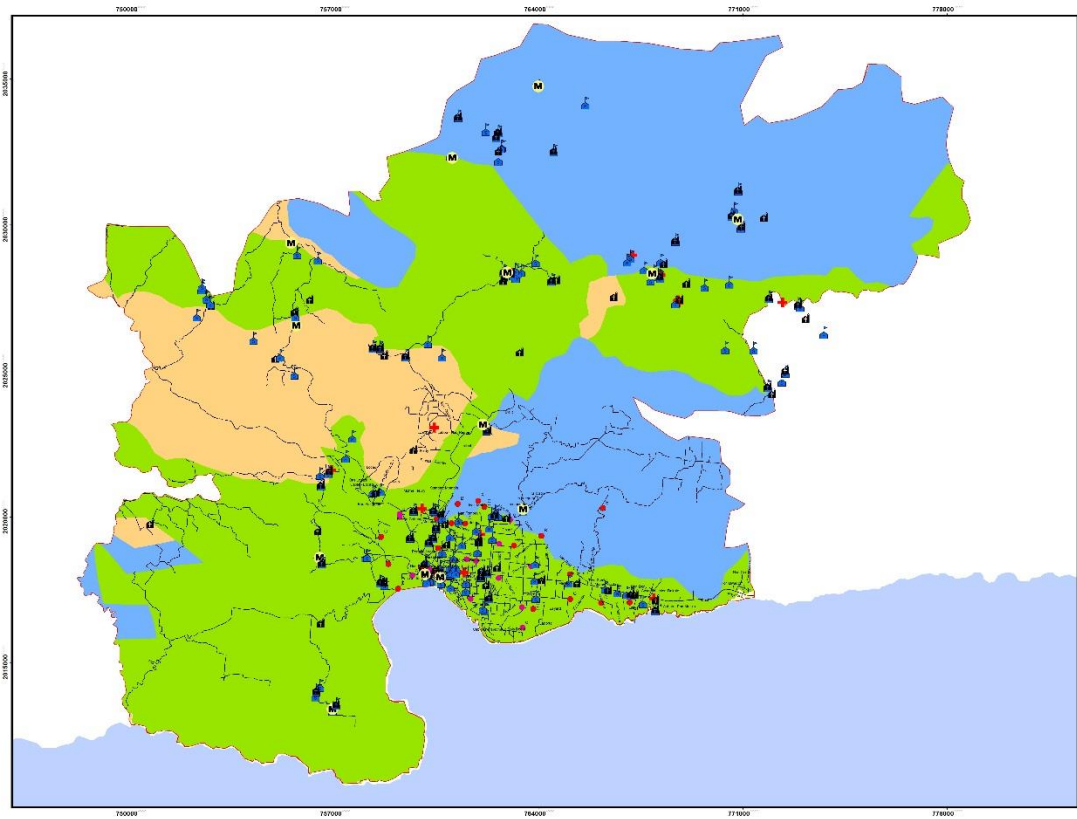
JCD: X=767110; Y=2017064

Effet de site entre 2.97 Hz et 3.03 Hz. Vs30=459.7m/s, site de classe C

Annexe 2A
Carte Géologique et mesures H/V et MASW



Annexe 2B
Carte de l'aléa sismique local



Légende

- Sites Vs30 MASW (Déc 2016)
- Sites Vs30 MASW (Mars 2019)

— Réseau Routier_Jacmel

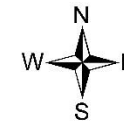
CLASSE_SOL

- B
- C
- C/D
- D

Batis Publics

- + CENTRE SANTE
- ▲ ECOLE
- EGLISE
- MARCHE

— Limite des quartiers



Zonage Sismique de la Commune de Jacmel Classe de sol selon la classification NEHRP (1994)

Ministère de l'Énergie et des Mines
Centre National de
Géotechnique et de
Sismologie
Bureau de la Recherche Sismologique

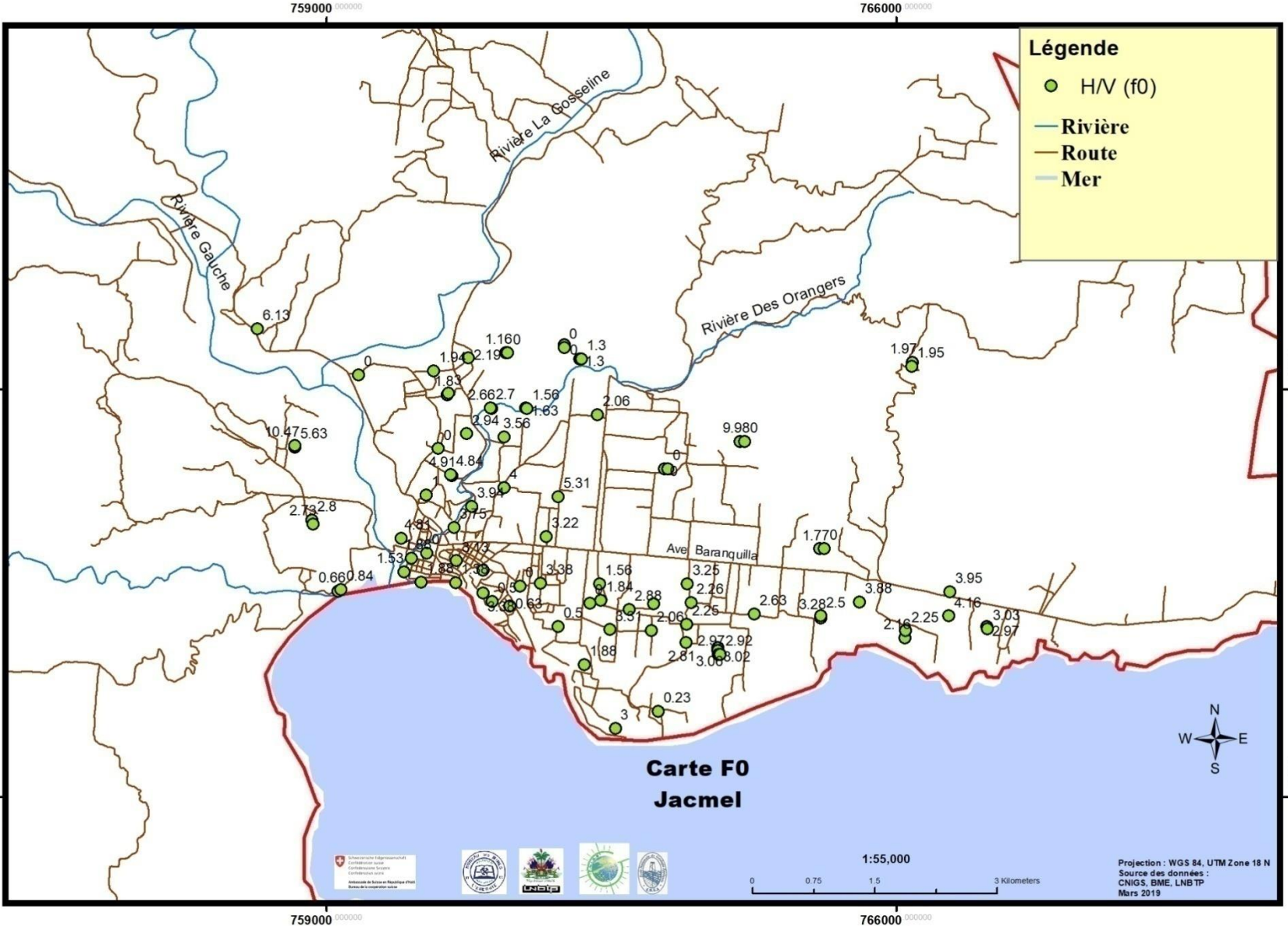


1:45,000

0 2 4 6 Km

Projection : WGS 84, UTM Zone 18 N
Source des données :
CNIGS, BME, LNBT

Annexe 2C
Mesure H/V et MASW



759000 000000

766000 000000

2020000 000000

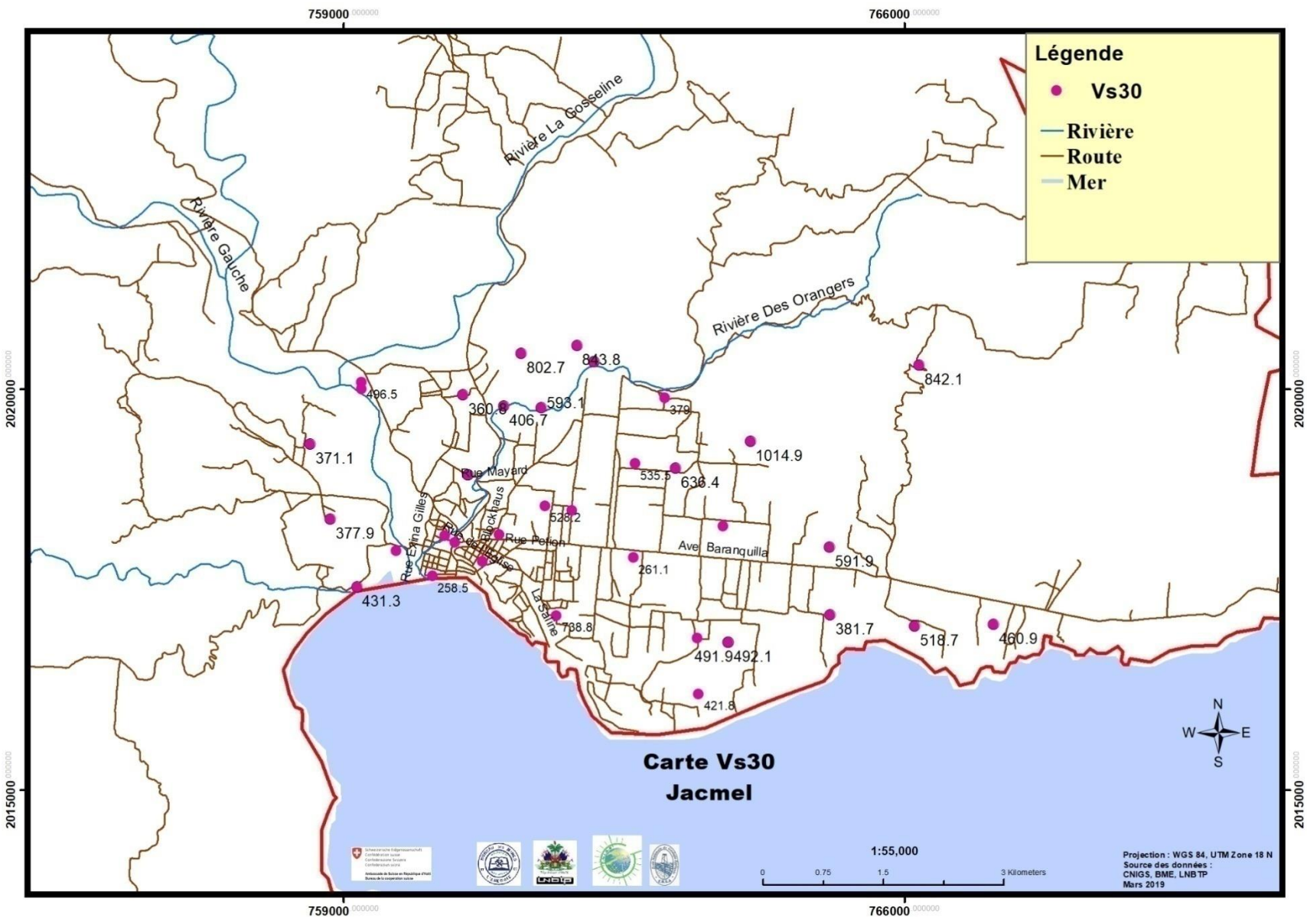
2020000 000000

2015000 000000

2015000 000000

759000 000000

766000 000000



759000 000000

766000 000000

2020000 000000

2020000 000000

2015000 000000

2015000 000000

759000 000000

766000 000000



Projection : WGS 84, UTM Zone 18 N
 Source des données : CNIGS, BME, LNBTP
 Mars 2019