

**RAPPORT FINAL : AMÉLIORATION DE L'IDENTIFICATION DES CAVITÉS SOUS LES ROUTES ET
DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE DIAGNOSTIC RAPIDE POUR L'USAGE DU MTQ**



Avril 2019



**SECTION GÉOTECHNIQUE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE**



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

RAPPORT FINAL :
AMÉLIORATION DE L'IDENTIFICATION DES CAVITÉS SOUS LES ROUTES ET
DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE DIAGNOSTIC RAPIDE POUR L'USAGE DU MTQ

Rapport Geo-04-19

Ahmed Mhenni, Simon Pierre Tremblay et Mourad Karray
Département de génie civil
Université de Sherbrooke

Présenté à :
DIRECTION DU LABORATOIRE DES CHAUSSÉES
SERVICE DE LA GÉOTECHNIQUE ET DE LA GÉOLOGIE
MINISTÈRE DES TRANSPORTS
(MTQ)
930, Chemin Sainte-Foy, 5e étage
Québec (Québec), G1S 4X9

Avril 2019

TABLE DES MATIÈRES :

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	2
CHAPITRE 2 : MÉTHODES D'INSPECTIONS	7
2.1 REVUE DE LITTÉRATURE	7
2.1.1 Méthodes de résistivités	8
2.1.2 Méthodes GPR	11
2.1.3 Méthodes sismiques	14
2.1.4 Méthode MMASW	15
CHAPITRE 3 : PROPAGATION DES ONDES ÉLASTIQUE DANS UN MILIEU HÉTÉROGÈNE.....	18
3.1 INTRODUCTION	18
3.2 ONDES DE RAYLEIGH.....	21
3.3 PROPAGATION D'ONDE DANS UN MILIEU SEMI-INFINI STRATIFIÉ	24
3.3.1 Réflexion des ondes de compression	25
3.3.2 Réflexion des ondes de cisaillement.....	26
3.3.3 Réflexion des ondes de Rayleigh	27
3.3.4 Phénomène de dispersion	29
3.3.5 Modes des ondes de Rayleigh.....	31
3.3.6 Milieu poreux et présence de l'eau dans les sols	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
3.3.7 Utilisation des ondes de surface pour la caractérisation des structures de chaussées.....	34
CHAPITRE 4 : ANALYSE ET COLLECTES DES SIGNAUX	37
4.1 APPROCHE MMASW ET APPROCHE PROPOSÉE.....	37
4.2 PRÉPARATION DES SIGNAUX AVANT ANALYSE DANS LE PLAN TEMPS FRÉQUENCE	41
4.3 NOTIONS IMPORTANTES : FRÉQUENCES INSTANTANÉES, DÉLAI DE GROUPE	42
4.4 DISTRIBUTIONS TEMPS-FRÉQUENCES	43
4.4.1 Distributions linéaires	47
4.4.2 Distributions quadratiques	51
4.4.3 Approche suggérée : Design de noyaux adaptatifs et mesure de concentration.....	55
4.5 ANALYSE D'ÉNERGIE.....	58
4.6 COLLECTE DES SIGNAUX SUR LE TERRAIN.....	59
CHAPITRE 5 : MODÈLE RÉDUIT ET SIMULATIONS NUMÉRIQUES.....	61
5.1 MOTIVATION.....	61
5.2 MODÈLE PHYSIQUE RÉDUIT	66
5.2.1 Description du modèle	66
5.2.2 Relevés réalisés sur le modèle réduit	69
5.3 MODELISATION NUMERIQUE EN 3D.....	69
5.3.1 Introduction	69
5.3.2 Modélisation du modèle physique réduit	71
a) Frontière du modèle.....	72
b) Amortissement	73
c) Propriétés mécaniques	73
d) Modélisation de la source	74

CHAPITRE 6 : ÉTUDE DE L'EFFET DES DIFFÉRENTES COMPOSANTES D'UN REMBLAI ROUTIER SUR LA PROPAGATION DES ONDES ÉLASTIQUES	78
6.1 PROCESSUS D'ANALYSE.....	78
6.2 MÉTHODE THÉORIQUE DE LA MATRICE DE PROPAGATION	79
6.2.1 <i>Effet de la profondeur de l'inclusion</i>	81
6.2.2 <i>Présence d'anomalie</i>	84
6.3 ÉTUDE DE L'EFFET DU REVÊTEMENT RIGIDE	85
6.3.1 <i>Introduction</i>	85
6.3.2 <i>Étude expérimentale de l'effet du revêtement</i>	86
6.3.3 <i>Étude numérique de la signature du revêtement</i>	88
6.4 ÉTUDE DE LA SIGNATURE UNE CAVITÉ/ANOMALIE.....	96
6.4.1 <i>Introduction</i>	96
6.4.2 <i>Étude numérique de la signature d'une anomalie</i>	97
6.4.3 <i>Étude expérimentale de la signature d'une cavité</i>	103
6.5 RÉSUMÉ ET ÉTUDE DE CAS.....	107
6.6 CONCLUSION : VERS UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DE LA RÉPONSE D'UN REMBLAI ROUTIER À UN CHAMP D'ACCÉLÉRATION À LA SURFACE ET ÉTUDE DE CAS.	112
CHAPITRE 7 : UTILISATION DE LA NOUVELLE PROCÉDURE POUR LA DÉTECTION D'ANOMALIES.....	114
7.1 INTRODUCTION	114
7.2 DÉTECTION D'ANOMALIES À L'AIDE DE LA CONFIGURATION PERPENDICULAIRE.....	116
7.2.1 <i>Effet de la profondeur d'une cavité</i>	117
7.2.2 <i>Effet de la position d'une cavité</i>	122
7.3 CONCLUSIONS	123
CHAPITRE 8 : ÉTUDES DE CAS ET VALIDATION SUR TERRAIN	124
8.1 INTRODUCTION	124
8.2 AUTOROUTE 15, SAINT-SAUVEUR	126
8.3 AUTOROUTE 50, GATINEAU	130
8.4 AUTOROUTE 40, TROIS-RIVIÈRES	137
8.5 AUTOROUTE 20, DRUMMONDVILLE.....	144
8.6 AUTOROUTE 50, GATINEAU	149
8.7 CONCLUSION	152
CHAPITRE 9 : SITE EXPÉRIMENTAL	153
CHAPITRE 10 : CONCLUSION ET CHEMINEMENT DU PROJET	162
10.1 RETOUR SUR LES OBJECTIFS DU PROJET ET CONCLUSIONS	162
10.2 TRAVAUX FUTURS ET CHEMINEMENT DU PROJET	167
ANNEXE A : LOCALISATION ET RAPPORTS DES SONDAGE F-02 ET F-05.....	168
ANNEXE B : LOCALISATION DU SITE EXPÉRIMENTALE DE SAINT RENÉ DE MATANE.....	172
RÉFÉRENCES.....	174

LISTE DES FIGURES :

FIGURE 2.1. MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE SELON LA CONFIGURATION DE SCHLUMBERGER ET DE WENNER.....	8
FIGURE 2.2. TOMOGRAPHIE DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE CALCULÉE À LA SUITE DE L'INVERSION DES DONNÉES RECUEILLIES LE LONG DE 5 LIGNES DIFFÉRENTES. SOURCE : FAROOQ ET COLL., 2012.	9
FIGURE 2.3. DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS POUVANT ÊTRE UTILISÉES LORS D'INVESTIGATIONS RÉALISÉES À L'AIDE DU GPR. SOURCE : YELF (2007).	12
FIGURE 2.4. DÉTECTION DE CAVITÉ À L'AIDE DE LA TECHNIQUE GPR. SOURCE : ANCHUELA ET COLL. (2009).....	13
FIGURE 2.5. CONFIGURATION DES ESSAIS MMASW.....	16
FIGURE 3.1. PERTURBATION D'UN ÉLÉMENT DE SOL (D'APRÈS KARRAY, 1999).....	19
FIGURE 3.2. SCHÉMATISATION DES ONDES DE VOLUME A) ONDES DE COMPRESSION P ET B) ONDES DE CISAILEMENT S ET DES ONDES DE SURFACE C) ONDES DE RAYLEIGH R ET D) ONDES DE LOVE L (D'APRÈS ATHANASOPOULOS ET AL., 2000)	20
FIGURE 3.3. RAPPORT DE VITESSES DES ONDES ÉLASTIQUES EN FONCTION DU COEFFICIENT DE POISSON (D'APRÈS RICHART, 1962).	20
FIGURE 3.4. PROPRIÉTÉS DES ONDES DE RAYLEIGH DANS UN MILIEU SEMI-INFINI HOMOGÈNE ET ISOTROPE (D'APRÈS RICHART ET AL., 1970).	23
FIGURE 3.5. RÉFLEXION ET RÉFRACTION DES ONDES DE COMPRESSION A) À UNE SURFACE LIBRE, B) À L'INTERFACE DE DEUX COUCHES, C) À L'INTERFACE DE DEUX COUCHES AVEC UN ANGLE D'INCIDENCE CRITIQUE i_{1c} ET D) À L'INTERFACE DE DEUX COUCHES AVEC UN ANGLE D'INCIDENCE CRITIQUE i_{2c}	25
FIGURE 3.6. RÉFLEXION ET RÉFRACTION DES ONDES DE CISAILEMENT A) POLARISÉE VERTICALEMENT (SV) À UNE SURFACE LIBRE, B) POLARISÉE HORIZONTALEMENT (SH) À L'INTERFACE DE DEUX COUCHES, C) POLARISÉE VERTICALEMENT (SV) À L'INTERFACE DE DEUX COUCHES ET D) POLARISÉE HORIZONTALEMENT (SH) À L'INTERFACE DE DEUX COUCHES AVEC UN ANGLE D'INCIDENCE CRITIQUE.	27
FIGURE 3.7. ILLUSTRATION DU PROBLÈME DE RÉFLEXION DE L'ONDE DE RAYLEIGH AU CONTACT D'UNE PENTE ET RAPPORT DES ÉNERGIES RÉFLÉCHIE ET INCIDENTE DE L'ONDE R (D'APRÈS KARRAY, 1999).	28
FIGURE 3.8. DISPERSION GÉOMÉTRIQUE DES ONDES DE RAYLEIGH DANS UN MILIEU SEMI-INFINI HOMOGÈNE STRATIFIÉ (D'APRÈS RIX 1988).....	30
FIGURE 3.9. EXEMPLES DE COURBE DE DISPERSION DANS UN DEMI-ESPACE HOMOGÈNE A) NON DISPERSIF, B) NORMALEMENT DISPERSIF ET C) INVERSEMENT DISPERSIF (D'APRÈS RIX, 1988).....	32
FIGURE 3.10. A) PROPAGATION D'UNE ONDE DE RAYLEIGH APPARTENANT AU MODE FONDAMENTAL ; B) PREMIER MODE (FLAC); C) COURBES DE DISPERSION DES DEUX PREMIERS MODES DE RAYLEIGH (D'APRÈS KARRAY, 1999).....	33
FIGURE 3.11. EFFET DE LA SATURATION SUR Vs (D'APRÈS HARDIN ET RICHART, 1963).	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE 3.12. MODE DE PROPAGATION DES ONDES DE RAYLEIGH DANS LES STRUCTURES DE CHAUSSÉES. B) LES DIFFÉRENTS MODES DE VIBRATION DES ONDES DE RAYLEIGH DANS LE CAS D'UN PAVÉ EN BÉTON DE 23 CM D'ÉPAISSEUR ET D'UNE VITESSE DE CISAILEMENT V_s DE 2750 M/S SURMONTANT UN MILIEU SEMI-INFINI D'UNE VITESSE DE COMPRESSION V_p DE 900 M/S. C) UN CAS ENCORE PLUS COMPLEXE DE LA PROPAGATION DES ONDES DE RAYLEIGH DANS UN MILIEU ILLUSTRÉ EN (A) CONSTITUÉ D'UNE COUCHE DE FAIBLE VITESSE COMPRISE ENTRE DEUX COUCHES RIGIDES. (1 PO. = 25,4 MM; 1 PIED = 304,8 MM, D'APRÈS JONES, 1962).	35
FIGURE 4.1. SCHÉMA ILLUSTRANT LA CONFIGURATION UTILISÉE LORS DES ESSAIS MMASW.	38
FIGURE 4.2. SCHÉMAS ILLUSTRANT LA PROCÉDURE UTILISÉE LORS DES ESSAIS MMASW (GAUCHE) ET CELLE QUI SERA DÉVELOPPÉE À L'AIDE DE NOUVELLES RECHERCHES (DROITE). LES RECTANGLES INDIQUENT DES RÉSULTATS OBTENUS À L'AIDE D'OPÉRATIONS DÉCRITES DANS LES ELLIPSES.	39
FIGURE 4.3. (A) REPRÉSENTATION TEMPORELLE D'UN SIGNAL COMPOSÉ DE DEUX COMPOSANTES. (B) REPRÉSENTATION DANS LE PLAN TEMPS-FRÉQUENCE DU MÊME SIGNAL. CETTE REPRÉSENTATION PERMET DE CONNAÎTRE LE DÉLAI DE GROUPE (DG) ET LA FRÉQUENCE INSTANTANÉE (FI) DE CHACUNE DES DEUX COMPOSANTES.....	45

FIGURE 4.4. REPRÉSENTATION DE DEUX SIGNAUX ÉTANT CHACUN FORMÉ DES DEUX MÊMES COMPOSANTES. (A) SIGNAL ET (B) SIGNAL. LA LIGNE POINTILLÉE BLEUE ET LA LIGNE POINTILLÉE VERTE REPRÉSENTENT LES ENVELOPPES DES DIFFÉRENTES COMPOSANTES DES SIGNAUX SE PROPAGEANT SELON LA VITESSE DE GROUPE.....	46
FIGURE 4.5. CROQUIS SCHÉMATIQUE DE LA RÉOLUTION TF DE LA (A) STFT ET DE LA (B) WT POUR LE SIGNAL: $x(t) = \delta(t - t_1) + \delta(t - t_2) + \sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t)$ LA RÉOLUTION TF DE LA STFT EST INDÉPENDANTE DE LA FRÉQUENCE (F) TANDIS QUE LA RÉOLUTION TEMPORELLE DE LA WT EST MEILLEURE À BASSE FRÉQUENCE. D'APRÈS: HLAWATSCH AND BOUDREAUX-BARTELS, 1992.....	49
FIGURE 4.6. IMPACT DE LA FONCTION DE LISSAGE $\psi_T(t, f)$ SUR L'ALLURE D'UNE TFD CALCULÉE DEPUIS (A) UN SIGNAL THÉORIQUE SYNTHÉTIQUE TYPIQUE DE LA RÉPONSE DYNAMIQUE D'UN DÉPÔT DE SOL. DISTRIBUTION TF OBTENUE À L'AIDE DE LA (B) WVD ET (C, E) DE SES VERSIONS LISSÉES À L'AIDE DE LA SPWVD ET DE LEUR RÉALLOCATION (RSPWVD) (D, F). LA MÉTHODE DE RÉALLOCATION PERMET D'AUGMENTER LA LISIBILITÉ D'UN SIGNAL DANS LE PLAN TEMPS-FRÉQUENCE (AUGER ET FLANDRIN, 1995).	54
FIGURE 4.7. (A) : SIGNAL $x_1(t)$ (B) : SIGNAL $x_2(t)$ (C) : SIGNAL $x_1(t)$ DANS LE DOMAINE (τ, ν) (D) : SIGNAL $x_2(t)$ DANS LE DOMAINE (τ, ν) . (C-D) L'OPÉRATION DE LISSAGE 'OPTIMUM' EST DÉFINIE PAR LA FONCTION $\psi_T(t, f)$ DANS LE DOMAINE CORRÉLATIF (AF).	55
FIGURE 4.8. INFLUENCE DU PARAMÈTRE γ SUR LA RÉOLUTION TEMPORELLE (A-B) ET TEMPS-FRÉQUENCE (C-D) DE LA FENÊTRE GAUSSIENNE DE LA GST UTILISÉE DANS LE CHAPITRE 6.....	57
FIGURE 4.9. ILLUSTRATION DES DEUX CONFIGURATIONS DE LIGNES POSSIBLES LORS DES ESSAIS SUR LE TERRAIN. (A) CONFIGURATION LINÉAIRE UTILISÉE LORS DE LA MÉTHODE MMASW. (B) CONFIGURATION PERPENDICULAIRE UTILISÉE LORS DES NOUVEAUX ESSAIS.	60
FIGURE 5.1. LA TRANSFORMÉ PAR ONDELETTES D'UN SIGNAL PRODUIT NUMÉRIQUEMENT À 12.5M DE LA SOURCE (A) EN ABSENCE DE CAVITÉ (B) EN PRÉSENCE D'UNE CAVITÉ DE 1 M DE PROFONDEUR, 1 M DE LARGEUR, 1 M DE PROFONDEUR ET À 14 M DE LA SOURCE.	62
FIGURE 5.2. CONFIGURATION DE LA MÉTHODE MMASW POUR CARACTÉRISATION DU SOL EN DESSOUS D'UN PAVÉ AVEC UNE SOURCE EXTERNE AU PAVÉ (KARRAY ET LEFEBVRE, 2009A).	63
FIGURE 5.3. (A) PRÉPARATION POUR LA CRÉATION D'UNE CAVITÉ (B) DÉCOUPAGE DU PONCEAU EN TÔLE ONDULÉE (C) INTÉRIEUR DE LA CAVITÉ (D) DISPOSITION DES CAPTEURS POUR LA RÉALISATION DES ESSAIS MMASW (KARRAY ET LEFEBVRE, 2009A).	65
FIGURE 5.4. A) MISE EN PLACE ET COMPACTAGE DU SOL DU TALUS; B) MISE EN PLACE DE LA DALLE DE BÉTON; C) MISE EN PLACE DU DEMI-PONCEAU.	67
FIGURE 5.5. DEUX OUVERTURES EFFECTUÉES SUR LE PONCEAU; A) AVEC TRAPPE FERMÉE; B) OUVERTE.....	68
FIGURE 5.6. RELEVÉS SISMQUES EFFECTUÉS (A) SANS PAVÉ (B) AVEC PAVÉ. (C) DIFFÉRENTS TYPES DE SOURCE CONSIDÉRÉS....	70
FIGURE 5.7. MODÉLISATION DU MODÈLE PHYSIQUE SOUS FLAC3D (VUE LATÉRALE D'UNE COUPE À TRAVERS LE PLAN X-Z). ..	72
FIGURE 5.8. (A) REPRÉSENTATIONS TEMPORELLES ET (B) FRÉQUENTIELLES DES IMPULSIONS CRÉÉES PAR LES ÉQUATIONS 5.2A ET 5.2B.....	75
FIGURE 5.9. INFLUENCE DES PROPRIÉTÉS DE LA SOURCE SISMQUE SUR LA RÉACTION NUMÉRIQUE DU MAILLAGE DURANT LES MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES. (A) LORSQUE LA SOURCE UTILISÉE EST SOUS LA FORME DE L'ÉQUATION 5.2A ET (B) LORSQUE LA SOURCE UTILISÉE EST SOUS LA FORME DE L'ÉQUATION 5.2A ET (B) LORSQUE LA SOURCE UTILISÉE EST SOUS LA FORME DE L'ÉQUATION 5.2B.	76
FIGURE 6.1. ILLUSTRATION DES 4 PROFILS DE SOLS CONSIDÉRÉS LORS DE L'ANALYSE À L'AIDE DE LA MÉTHODE DE LA MATRICE DE PROPAGATION. LES PROPRIÉTÉS DYNAMIQUES DES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX SE TROUVENT DANS LA TABLE 6.1.	80
FIGURE 6.2. DÉPLACEMENT VERTICAL NORMALISÉ DU MODE R0 EN FONCTION DE SA LONGUEUR D'ONDE (CHAI ET COLL. 2012).	81

FIGURE 6.3. EFFET DE LA PRÉSENCE DU PONCEAU SITUÉ SOUS UNE COUCHE DE SOL DE : (A) 3 M (MODÈLE 1) ET (B) 5 M (MODÈLE 2) SUR LES COURBES DE DISPERSION EN VITESSE DE GROUPE (V_G) ET DE PHASE (V_P) DES MODES R0 ET R1 DES ONDES DE RAYLEIGH. LES CERCLES ROUGES SUR LES GRAPHIQUES (A) ET (B) INDIQUENT LA LOCALISATION DE $\mathcal{F}_{\text{AIRY}}$ ET LES LIGNES POINTILLÉES NOIRES INDIQUENT LE CROISEMENT ENTRE $V_G - V_P$ DU MODE R0 ET $\mathcal{F}_{\text{AIRY}}$.	82
FIGURE 6.4. VARIATION DE LA LONGUEUR D'ONDE EN FONCTION DE LA VITESSE DE PHASE POUR LES MODES R0 ET R1 DES MODÈLES 1 ET 2. LES CERCLES ROUGES SUR LES COURBES DU MODE R0 INDIQUENT LA LOCALISATION DE $\mathcal{F}_{\text{AIRY}}$. LES LIGNES NOIRES POINTILLÉES INDIQUENT LA LONGUEUR D'ONDE (λ_{AIRY}) ASSOCIÉE À $\mathcal{F}_{\text{AIRY}}$.	83
FIGURE 6.5. VARIATION DE LA LONGUEUR D'ONDE EN FONCTION DE LA VITESSE DE PHASE POUR LE MODE R0 DES MODÈLES 2, 3 ET 4.	85
FIGURE 6.6. DISTRIBUTION D'ÉNERGIE ET VITESSE DE GROUPE CALCULÉ À 1.6 M DE LA SOURCE DES MODÈLES EXPÉRIMENTAUX : (A) E1, (B) E2. COURBES DE DISPERSION DE LA VITESSE DE PHASE DU MODE R0 IDENTIFIÉ DES MODÈLES : (C) E1 ET (D) E2.	87
FIGURE 6.7. COURBES DE D COUPE À TRAVERS LES PLANS X-Z DES MODÈLES NUMÉRIQUES. LES AXES INDIQUENT LES DIMENSIONS DU MODÈLE ET LA POSITION PAR RAPPORT À L'EMPLACEMENT DE LA SOURCE QUI SE TROUVE À LA POSITION 0 M.	88
FIGURE 6.8. LA DISTRIBUTION D'ÉNERGIE ET LA VITESSE DE GROUPE CALCULÉES À UNE DISTANCE DE 1.6 M DE LA SOURCE DES MODÈLES NUMÉRIQUES : (A) N1, (B) N2, (C) N3 ET (D) N4. LES MARQUES INDIQUENT LA LOCALISATION OU LE MODE R0, LES MODES SUPÉRIEURS ET LES RÉFLEXIONS ONT ÉTÉ IDENTIFIÉS SUR LE VFP COMME MENTIONNÉS SUR LES LÉGENDES DES GRAPHES.	90
FIGURE 6.9. COURBES DE DISPERSION DE LA VITESSE DE PHASE DU MODE R0 CALCULÉE EN SE BASANT SUR LA VITESSE DE GROUPE IDENTIFIÉE À LA FIGURE 6. (B) DIFFÉRENCE EN POURCENTAGES ENTRE LA VITESSE DE PHASE DU MODÈLE N1 ET DES MODÈLES N2, N3 ET N4.	91
FIGURE 6.10. LA DISTRIBUTION D'ÉNERGIE ET LA VITESSE DE GROUPE CALCULÉES À UNE DISTANCE DE 1.6 M DE LA SOURCE DES MODÈLES NUMÉRIQUES : (A) N1, (B) N5, (C) N6 ET (D) N7. LES MARQUES INDIQUENT LA LOCALISATION OU LE MODE R0, LES MODES SUPÉRIEURS ET LES RÉFLEXIONS ONT ÉTÉ IDENTIFIÉS SUR LE VFP COMME IL EST MENTIONNÉ SUR LES LÉGENDES DES GRAPHES.	92
FIGURE 6.11. COURBES DE DISPERSION DES VITESSES DE PHASE DES MODES R0 CALCULÉES EN SE BASANT SUR LES VITESSES DE GROUPE IDENTIFIÉES À LA FIGURE 6.10 (B) DIFFÉRENCE EN POURCENTAGES ENTRE LA VITESSE DE PHASE DU MODÈLE N1 ET DES MODÈLES N5, N6 ET N7.	93
FIGURE 6.12. EFFET D'ACCÉLÉRATION DU FRONT D'ONDE INDUIT PAR LE REVÊTEMENT RIGIDE (À GAUCHE) EN COMPARAISON À UN FRONT D'ONDE VÉHICULÉ PAR LE SOL (À DROITE) SIMULÉ NUMÉRIQUEMENT.	95
FIGURE 6.13. VUE LATÉRALE D'UNE COUPE À TRAVERS LE PLAN X-Z DES MODÈLES 3D.	97
FIGURE 6.14. COUPE À TRAVERS LE PLAN X-Y DES MODÈLES NUMÉRIQUES. LES AXES INDIQUENT LES DIMENSIONS DU MODÈLE ET LA POSITION PAR RAPPORT À L'EMPLACEMENT DE LA SOURCE QUI SE TROUVE À LA POSITION 0 M.	98
FIGURE 6.15. COURBES DE DISPERSION DU MODE R0 CALCULÉ À PARTIR D'UN SIGNAL LOCALISÉ À 1.6 M DE LA SOURCE DU MODÈLE N1, N2 ET N3 (SANS PAVAGE) EXPRIMÉES : (A) V_G VS FRÉQUENCE (B) V_{PH} VS FRÉQUENCE ET (C) V_{PH} VS LONGUEUR D'ONDE (λ).	99
FIGURE 6.16. COURBES DE DISPERSION DU MODE R0 CALCULÉ À PARTIR D'UN SIGNAL LOCALISÉ À 1.6 M DE LA SOURCE DU MODÈLE N4, N5 ET N6 (AVEC PAVAGE) EXPRIMÉES : (A) V_G VS FRÉQUENCE (B) V_{PH} VS FRÉQUENCE ET (C) V_{PH} VS LONGUEUR D'ONDE (λ).	99
FIGURE 6.17. VARIATION DE LA V_G CALCULÉE À 40 Hz (LIGNES BLEUES) ET 65 Hz (LIGNES ROUGES) À LA SURFACE DES MODÈLES N1, N2 ET N3. (B) DIFFÉRENCE, EN POURCENTAGE, ENTRE V_G DE N1 ET N2 (CARRÉS) ET ENTRE N1 ET N3 (LOSANGES).	100

FIGURE 6.18. VARIATION DE LA V_g CALCULÉE À 40 HZ (LIGNES BLUES) ET 65 HZ (LIGNES ROUGES) À LA SURFACE DES MODÈLES N4, N5 ET N6. (B) DIFFÉRENCE, EN POURCENTAGE, ENTRE V_g DE N4 ET N5 (CARRÉS) ET ENTRE N4 ET N6 (LOSANGES).	101
FIGURE 6.19. LES 6 PRÉLÈVEMENTS DE SOL EFFECTUÉS POUR L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE D'UNE CAVITÉ LOCALISÉE AU VOISINAGE D'UN PONCEAU.	103
FIGURE 6.20. LA DISTRIBUTION D'ÉNERGIE ET LA VITESSE DE GROUPE CALCULÉES À UNE DISTANCE DE 1.6 M DE LA SOURCE AVEC LE MODÈLE PHYSIQUE RÉDUIT : (A) SANS CAVITÉ, (B) AVEC UNE CAVITÉ DE 6 CM, (C) AVEC UNE CAVITÉ DE 10 CM (D) AVEC UNE CAVITÉ DE 15 CM. COURBES DE DISPERSION DES VITESSES (E) DE GROUPE ET (F) DE PHASE DU MODE R0 IDENTIFIÉS.	104
FIGURE 6.21. EFFET DE RALENTISSEMENT INDUIT PAR UNE ZONE DE FAIBLE DENSITÉ SUR UN FRONT D'ONDE (À GAUCHE) EN COMPARAISON À L'EFFET DE RÉFLEXION D'ÉNERGIE INDUIT PAR UN VIDE (À DROITE) SIMULÉ NUMÉRIQUEMENT.	106
FIGURE 6.22. LA DISTRIBUTION D'ÉNERGIE ET LA VITESSE DE GROUPE DES DIFFÉRENTES MODES (R0, R1 ET R2) CALCULÉES À UNE DISTANCE DE 1.6 M DE LA SOURCE AVEC LE MODÈLE PHYSIQUE RÉDUIT POUR DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS : EN PRÉSENCE ET ABSENCE DE REVÊTEMENT RIGIDE, PONCEAU ET CAVITÉ.	108
FIGURE 6.23. COURBES DE DISPERSION DES VITESSES DE GROUPE DU MODE R0 IDENTIFIÉ À LA FIGURE 6.23 SANS/AVEC PONCEAU ET CAVITÉ (A) AVEC REVÊTEMENT RIGIDE ET (B) SANS REVÊTEMENT RIGIDE.	109
FIGURE 6.24. COURBES DE DISPERSION DES VITESSES DE PHASE DU MODE R0 IDENTIFIÉ À LA FIGURE 6.23 SANS/AVEC PONCEAU ET CAVITÉ (A) AVEC REVÊTEMENT RIGIDE ET (B) SANS REVÊTEMENT RIGIDE.	110
FIGURE 6.25. SCHÉMA DE LA CONFIGURATION DU REMBLAI ROUTIER.	111
FIGURE 6.26. CONTOURS DES VITESSES DE PHASE DU MODE R0 (A) AVANT ET (B) APRÈS L'ASPHALTAGE DE LA ROUTE.	112
FIGURE 6.27. CONTOURS D'ÉNERGIE, DE VITESSES DE GROUPE ET DE PHASE CALCULÉS AVEC LA MÉTHODE MMASW AVANT ET APRÈS L'ASPHALTAGE DE LA ROUTE. (A-C) VITESSES DE GROUPE ET DE PHASE CALCULÉES CORRESPONDANT À LA POSITION DE 3,8 M SUR LA FIGURE 6.26A. (B-D) VITESSES DE GROUPE ET DE PHASE CALCULÉES CORRESPONDANT À LA POSITION DE 3,8 M SUR LA FIGURE 6.26B.	113
FIGURE 7.1. DIFFÉRENTES COMPOSANTES (SOL, PAVÉ, PONCEAU, CAVITÉS) DES MODÈLES NUMÉRIQUES. (A) COUPE À TRAVERS LES PLANS X-Y. (B) VUE 'AÉRIENNE' DU MODÈLE. LA POSITION DE LA SOURCE EST INDIQUÉE PAR LA FLÈCHE ET LE CERCLE ROUGE TANDIS QUE LA POSITION DES TROIS DIFFÉRENTES CAVITÉS MODÉLISÉES EST INDIQUÉE PAR LES RECTANGLES C1, C2 ET C3 (DÉCALÉE EN Y PAR RAPPORT À C1 DANS LE PLAN X-Z EN (A)). LES FLÈCHES DOUBLES P1, P2 ET P3 INDIQUENT LA POSITION DES COURBES DE VITESSES DE PHASE PRÉSENTÉES DANS LES FIGURES 7.4 ET 7.5.	115
FIGURE 7.2. EFFET CONSIDÉRÉ POUR LES MODÉLISATIONS EN 3D DE LA PRÉSENCE D'UNE CAVITÉ DANS LE SOL.	117
FIGURE 7.3. EFFET DE LA PROFONDEUR D'UNE ANOMALIE SUR LES VITESSES DE GROUPE CALCULÉES À PRÈS DE 35 HZ LORSQUE LE MODÈLE N'EST PAS RECOUVERT D'UN PAVÉ (A, B ET C) ET LORSQUE LE MODÈLE EST RECOUVERT D'UN PAVÉ DE 0.15 M (D, E ET F). (A, D) MODÈLES SANS CAVITÉ, (B, E) MODÈLES AVEC CAVITÉ C1 ET (C, F) MODÈLES AVEC CAVITÉ C2. LA POSITION DES CAVITÉS EST INDIQUÉE PAR LES RECTANGLES ROUGES ET L'ÉCHELLE DE COULEUR INDIQUE LA VALEUR DES CONTOURS EN VITESSES DE GROUPE.	118
FIGURE 7.4. EFFET DE LA PRÉSENCE ET DE LA PROFONDEUR D'UNE CAVITÉ LORSQUE LE SOL N'EST PAS RECOUVERT D'UN PAVÉ. VITESSE DES ONDES DE RAYLEIGH CALCULÉES AVEC LA MGST ENTRE (A) 4.0 ET 4.9 M, (B) ENTRE 4.7 ET 5.6 M ET (C) ENTRE 5.4 ET 6.3 M LE LONG DE L'AXE HORIZONTAL (X) DE LA FIGURE 7.1A.	119
FIGURE 7.5. EFFET DE LA PRÉSENCE ET DE LA PROFONDEUR D'UNE CAVITÉ LORSQUE LE SOL EST RECOUVERT D'UN PAVÉ. VITESSE DES ONDES DE RAYLEIGH CALCULÉES AVEC LA MGST ENTRE (A) 4.0 ET 4.9 M, (B) ENTRE 4.7 ET 5.6 M ET (C) ENTRE 5.4 ET 6.3 M LE LONG DE L'AXE HORIZONTAL (X) DE LA FIGURE 7.1A.	120
FIGURE 7.6. EFFET DE LA POSITION D'UNE ANOMALIE SUR LES VITESSES DE GROUPE CALCULÉES À PRÈS DE 35 HZ LORSQUE LE MODÈLE N'EST PAS RECOUVERT D'UN PAVÉ (A, B ET C) ET LORSQUE LE MODÈLE EST RECOUVERT D'UN PAVÉ DE 0.15 M (D, E ET F). (A, D) MODÈLES SANS CAVITÉ, (B, E) MODÈLES AVEC CAVITÉ C1 ET (C, F) MODÈLES AVEC CAVITÉ C3. LA POSITION DES CAVITÉS EST INDIQUÉE PAR LES RECTANGLES ROUGES ET L'ÉCHELLE DE COULEUR INDIQUE LA VALEUR DES CONTOURS EN VITESSES DE GROUPE.	121

FIGURE 7.7. VARIATION DES VITESSES DE GROUPE CALCULÉES À PRÈS DE 35 HZ DANS UN MODÈLE (A) EN PRÉSENCE D'UN PAVÉ ET D'UN PONCEAU ET (B) EN PRÉSENCE D'UN PAVÉ, D'UN PONCEAU ET DE LA CAVITÉ C3. LA POSITION DE LA CAVITÉ C3 EST INDIQUÉE PAR LE RECTANGLE ROUGE ET L'ÉCHELLE DE COULEUR INDIQUE LA VALEUR DES CONTOURS EN VITESSES DE GROUPE.	122
FIGURE 8.1. COURBES DE DISPERSION EN (A) VITESSE DE GROUPE ET (B) EN VITESSE DE PHASE CALCULÉES POUR UN ACCÉLÉROMÈTRE SITUÉ AU-DESSUS DU PONCEAU.....	127
FIGURE 8.2. COURBES DE DISPERSION ($\lambda-V_{PH}$) DES MODES R0 ET R1 CALCULÉES POUR UN ACCÉLÉROMÈTRE SITUÉ AU-DESSUS DU PONCEAU.	128
FIGURE 8.3. TOMOGRAPHIE EN VITESSE DE GROUPE OBTENUE À L'AIDE DE LA CONFIGURATION PERPENDICULAIRE. LES PLANS 1 ET 2 CORRESPONDENT RESPECTIVEMENT AUX TOMOGRAPHIES DE VITESSE DE PHASE DES FIGURES 8.4A ET 8.4B. L'ÉCHELLE DE COULEURS INDIQUE LES VALEURS DE LA VITESSE.	128
FIGURE 8.4. TOMOGRAPHIE DE VITESSE DE PHASE DE (A) LA LIGNE 5 (PLAN 1) ET DE (B) LA LIGNE 6 (PLAN 2) CALCULÉE SELON LA MÉTHODE MMASW. LES RECTANGLES POINTILLÉS ROUGES MONTRENT LES ZONES COUVERTES PAR LES PLANS 1 ET 2.	129
FIGURE 8.5. LOCALISATION DES ESSAIS MMASW SUR L'AUTOROUTE 50 OUEST. LES POINTILLÉS ROUGES INDIQUENT LA POSITION DES ESSAIS RÉALISÉS À L'AIDE DE LA CONFIGURATION PERPENDICULAIRE.	131
FIGURE 8.6. SCHÉMA MONTRANT LA CONFIGURATION DES ESSAIS RÉALISÉS À L'AIDE DE LA CONFIGURATION PERPENDICULAIRE. LES CERCLES C1 ET C2 INDIQUENT LA POSITION DES CAPTEURS UTILISÉS POUR LE CALCUL DES COURBES DE DISPERSIONS DES FIGURES 8.8 ET 8.9.	132
FIGURE 8.7. (A) PROFILS DE VITESSE DES ONDES DE CISAILLEMENTS NORMALISÉS ET (B) CONTOURS DE VITESSE DES ONDES DE RAYLEIGH CALCULÉS LE LONG DE LA LIGNE 1AV. LA ZONE DÉLIMITÉE PAR LES LIGNES POINTILLÉES ROUGES INDIQUE LA ZONE COUVERTE PAR LES ESSAIS PERPENDICULAIRES. LA LIGNE POINTILLÉE NOIRE INDIQUE LA POSITION OÙ SE TROUVE LE CAPTEUR C1.	133
FIGURE 8.8. (A) PROFILS DE VITESSE DES ONDES DE CISAILLEMENTS NORMALISÉS ET (B) CONTOURS DE VITESSE DES ONDES DE RAYLEIGH CALCULÉS LE LONG DE LA LIGNE 2AM. LA ZONE DÉLIMITÉE PAR LES LIGNES POINTILLÉES ROUGES INDIQUE LA ZONE COUVERTE PAR LES ESSAIS PERPENDICULAIRES. LA LIGNE POINTILLÉE NOIRE INDIQUE LA POSITION OÙ SE TROUVE LE CAPTEUR C2.	134
FIGURE 8.9. ÉNERGIE ET COURBES DE DISPERSIONS (FRÉQUENCES-VITESSE DE GROUPE) DES MODES R0 ET R1 CALCULÉES AVEC LA GST À PARTIR DE L'ACCÉLÉRATION VERTICALE DU SOL MESURÉE PAR LE CAPTEUR PLACÉ À LA POSITION (A) C1 ET (B) C2.	135
FIGURE 8.10. (A) COURBES DE DISPERSION EN VITESSE DE PHASE / FRÉQUENCE ET (B) COURBES DE DISPERSION EN VITESSE DE PHASE / LONGUEUR D'ONDE DES MODES R0 ET R1 IDENTIFIÉS À L'AIDE DE LA FIGURE 8.5A-B.....	136
FIGURE 8.11. CONTOURS DES VITESSES DE GROUPE CALCULÉES À (A) 25 ET (B) 35 HZ À L'AIDE DE LA GST. LES LIGNES POINTILLÉES INDIQUENT LA POSITION DES LIGNES 1AV ET 2AM ET LES CERCLES ROUGES INDIQUE LA POSITION DES CAPTEURS C1 ET C2. L'ÉCHELLE À GAUCHE MONTRE LES VALEURS DE VITESSE DE GROUPE ASSOCIÉES AUX COULEURS DES CONTOURS.....	137
FIGURE 8.12. LOCALISATION DES RELEVÉS PERPENDICULAIRES, A-40, PONCEAU P-12600, LIGNE-LIGNE = 0.4 M, CAPTEUR-CAPTEUR = 0.1 M, ÉCHELLE : 12:1.....	138
FIGURE 8.13. A) TOMOGRAPHIE EN VITESSE DE GROUPE CALCULÉE À 50 HZ À L'AIDE DE LA GST OBTENUE AVEC LA PREMIÈRE SÉRIE DE RELEVÉS PERPENDICULAIRES, A-40 DIRECTION EST, PONCEAU P-12600. ÉNERGIE ET COURBES DE DISPERSIONS (FRÉQUENCE-VITESSE DE GROUPE) DES MODES R0, R1 ET R2 CALCULÉES AVEC LA GST À PARTIR DE L'ACCELERATION VERTICALE DU SOL MESURÉE PAR DIFFÉRENTS CAPTEURS LOCALISÉS SUR LA TOMOGRAPHIE, B) CAPTEUR 6-LIGNE 1 (C6-L1), c) C6-L3 ET d) C6-L5.....	139
FIGURE 8.14. DEUXIÈME SÉRIE DES RELEVÉS PERPENDICULAIRE, AUTOROUTE 40, DIRECTION OUEST.....	141
FIGURE 8.15. TOMOGRAPHIE DES VITESSES DES ONDES DE CISAILLEMENT OBTENUE AVEC LA MÉTHODE MMASW, A40 DIRECTION EST, LE LONG, A) DES LIGNES 5V-7V, B) DES LIGNES 6M-8M, C) DES LIGNES 2M-4M.	142

FIGURE 8.16. E) TOMOGRAPHIE DES VITESSES DE GROUPE CALCULÉE À 30 Hz À L'AIDE DE LA GST OBTENU AVEC LA DEUXIÈME SÉRIE DE RELEVÉS PERPENDICULAIRES, A-40 DIRECTION OUEST, PONCEAU P-12600, AINSI QUE L'ÉNERGIE ET COURBES DE DISPERSIONS (FRÉQUENCES-VITESSE DE GROUPE) DES MODES R0, R1 ET R2 CALCULÉES AVEC LA GST À PARTIR DE L'ACCÉLÉRATION VERTICALE DU SOL MESURÉE PAR LES CAPTEURS LOCALISÉS SUR LA TOMOGRAPHIE, A) C7-L2, B) C7-L4 ET C) C7-L7 ET D) C7-L9.	143
FIGURE 8.17. A) LOCALISATION DES RELEVÉS PERPENDICULAIRES, A-20, PONCEAU 6548-0, ÉCHELLE : 17:1. B) RELEVÉS PERPENDICULAIRES, AUTOROUTE 20, DIRECTION OUEST.	145
FIGURE 8.18. TOMOGRAPHIE DES VITESSES DES ONDES DE CISAILEMENT, ENTRE PM-1 ET PM-9 LE LONG DES LIGNES A) MMASW-2 ET L'EMPLACEMENT DU FORAGE F-05, B) MMASW-1 ET L'EMPLACEMENT DU FORAGE F-01, AINSI QUE LE CROISEMENT DES LIGNES MMASW AVEC LES RELEVÉS PERPENDICULAIRES QUADRILLÉS EN POINTILLÉ ROUGE.....	147
FIGURE 8.19. A) TOMOGRAPHIE DES VITESSES DE GROUPE CALCULÉES À 25 Hz À L'AIDE DE LA GST OBTENU LES RELEVÉS PERPENDICULAIRES, A-20, DIRECTION OUEST, PONCEAU 6548-0, ET LES TRACÉS DES LIGNES MMASW-1 ET 2, AINSI QUE L'EMPLACEMENT DES FORAGES F-05 ET F-02. ÉNERGIE ET COURBES DE DISPERSIONS (FRÉQUENCES-VITESSE DE GROUPE) DES MODES R0, R1 ET R2 CALCULÉES AVEC LA GST À PARTIR DE L'ACCÉLÉRATION VERTICALE DU SOL MESURÉE PAR LES CAPTEURS LOCALISÉS SUR LA TOMOGRAPHIE, C) POINT C : C6-L4, D) POINT F : C6-L11, B) AINSI QUE LA DISPERSION DES VITESSES DE GROUPE DU MODE R0 DES POINTS A, B, D ET E LOCALISÉS SUR A).....	148
FIGURE 8.20. A) LOCALISATION DES RELEVÉS PERPENDICULAIRES, A-50, PONCEAU RTS 0050-01-070, ÉCHELLE : 17:1. B) RELEVÉS PERPENDICULAIRES, AUTOROUTE 50, DIRECTION EST.	150
FIGURE 8.21. TOMOGRAPHIES DES VITESSES DE GROUPE OBTENUES À L'AIDE DE LA GST DES RELEVÉS PERPENDICULAIRES, A-50, DIRECTION EST, PONCEAU RTS 0050-01-070, CALCULÉES À : A) 30 Hz, B) 40 Hz, C) 60 Hz, AINSI QUE LA DISTRIBUTION D'ÉNERGIE ET COURBES DE DISPERSIONS (FRÉQUENCES-VITESSE DE GROUPE) DES MODES R0, R1 ET R2 CALCULÉES AVEC LA GST À PARTIR DE L'ACCÉLÉRATION VERTICALE DU SOL MESURÉE PAR LES CAPTEURS LOCALISÉS SUR LA TOMOGRAPHIE AUX : A) POINT A, C3-L3 ET B) POINT B, C3-L12.....	151
FIGURE 9.1. LOCALISATION DES RELEVÉS PERPENDICULAIRES, CHEMIN DE LA RÉSERVE FAUNIQUE, SAINT RENÉ DE MATANE, PONCEAU REF 15479, ÉCHELLE : 17:1.	154
FIGURE 9.2. A) VUE GLOBALE DU SITE EXPÉRIMENTAL DE SAINT-RENÉ-DE-MATANE. B) EMBLACEMENT DES RELEVÉS PAR RAPPORT AUX FISSURES VISIBLES DANS LE PAVÉ. NOTEZ QUE LES 14 CAPTEURS SE TROUVENT LE LONG DE LA LIGNE 9. C) ENTAILLE DU PONCEAU PROVOQUÉE PAR LE GLISSEMENT DE LA VOIE INSPECTÉ, ET À TRAVERS LAQUELLE LA CAVITÉ A ÉTÉ CRÉÉE, D) DÉCHIREMENT DU GÉOTEXTILE, ET CRÉATION DE LA CAVITÉ PAR PRÉLÈVEMENT DU SOL.....	155
FIGURE 9.3. ÉNERGIES ET COURBES DE DISPERSIONS (FRÉQUENCES-VITESSE DE GROUPE) DES MODES R0, R1 CALCULÉES AVEC LA GST À PARTIR DES ACCÉLÉRATIONS VERTICALES DU SOL MESURÉES AU CAPTEUR C11-L8 SUR L'EMPLACEMENT DE LA CAVITÉ, A) AVANT LA CRÉATION DE LA CAVITÉ, B) APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ, ET C) COMPARAISON ENTRE LES COURBES DE DISPERSION R0 ET R1 AVANT ET APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ.	157
FIGURE 9.4. TOMOGRAPHIES DES VITESSES DE GROUPE CALCULÉES À L'AIDE DE LA GST OBTENUES AVEC RELEVÉS PERPENDICULAIRES EFFECTUÉS SUR LE SITE EXPÉRIMENTAL DE SAINT-RENÉ-DE-MATANE AVANT LA CRÉATION DE LA CAVITÉ À : A) 30 Hz, B) 40 Hz, C) 50 Hz, D) 60 Hz ET E) 70 Hz, OÙ LES TRAITS EN POINTILLÉ VERTICAL ROUGE CORRESPONDENT À DIFFÉRENTS ÉVENTUELS PLANS DE DISLOCATION INTERCEPTÉS À DIFFÉRENTES PROFONDEURS (DONC DIFFÉRENTS LONGUEURS D'ONDE, DONC DIFFÉRENTS FRÉQUENCES, ET APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ À : F) 30 Hz, G) 40Hz, H) 50 Hz, I) 60 Hz ET J) 70 Hz, OÙ L'EMPLACEMENT DE LA CAVITÉ EST MARQUÉ PAR LE CERCLE EN POINTILLÉ ROUGE.	159
FIGURE 9.5. SCHÉMA APPROXIMATIF D'UNE COUPE À TRAVERS LA ROUTE SUIVANT L'AXE DU PONCEAU MONTRANT LA POSITION POSSIBLE DU PLAN DE RUPTURE EN PROFONDEUR ET DES ÉVENTUELS PLANS DE DISLOCATION. LA POSITION DES LIGNES EST VISIBLE PAR RAPPORT AUX FISSURES SUR LA FIGURE 9.2.	160
FIGURE 10.1. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL DE L'OUTIL DE DIAGNOSTIC RAPIDE DES PONCEAUX PROPOSÉ AU MTQ À L'ISSUE DE CETTE ÉTUDE.	165

LISTE DES TABLEAUX :

TABLEAU 6.1. PROPRIÉTÉS DES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX DES MODÈLES ILLUSTRÉS PAR LA FIGURE 6.1.....	80
TABLEAU 6.2. RÉSUMÉ DE LA CONFIGURATION DES 2 MODÈLES EXPÉRIMENTAUX ÉTUDIÉS.	87
TABLEAU 6.3. RÉSUMÉ DE LA CONFIGURATION DES 7 MODÈLES NUMÉRIQUES.	89
TABLEAU 6.4. PROPRIÉTÉS ÉLASTIQUES DES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX.	92
TABLEAU 6.5. RÉSUMÉ DE LA CONFIGURATION DES 6 MODÈLES NUMÉRIQUES (LES DIMENSIONS H1, H2 ET H3 SONT DÉFINIES À LA FIGURE 6.13).	98
TABLEAU 7.1. PROPRIÉTÉ DES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX DES MODÈLES NUMÉRIQUES (FLAC3D).....	116
TABLEAU 8.1. RÉSUMÉ DES ÉTUDES DE CAS RÉALISÉS DANS LE CADRE DE CE PROJET.	125
TABLEAU 10.1. COMPARAISON ENTRE LA MÉTHODE MMASW ET LA NOUVELLE MÉTHODE PROPOSÉE À L'ISSUE DE CE PROJET	164

LISTE DES SYMBOLES :

G	Module de cisaillement.
V_s	Vitesse des ondes de cisaillement.
ρ	Masse volumique du sol.
V_{sl}	Vitesse des ondes de cisaillement normalisée.
k	Facteur de compressibilité.
ν	Coefficient de Poisson.
$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = (u_x, u_y, u_z)$	Vecteur des déplacements.
∇	$= (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})$.
$\varphi = \nabla \cdot \mathbf{u}$	Changement de volume/Dilatation.
$\boldsymbol{\psi} = \nabla \times \mathbf{u}$	Vecteur de rotation.
ω	Fréquence angulaire (rad/s).
f	Fréquence (Hz).
λ	Longueur d'onde (m).
κ	Nombre d'ondes.
$\Delta_R(\omega, \kappa)$	Fonction d'inversion.
V_{ph}	Vitesse de phase (m/s).
V_g	Vitesse de groupe (m/s).
S_r	Degré de saturation.
e	Indice des vides.
k_z	Rapport entre la profondeur et la longueur d'onde.
k_r	Rapport entre V_s et V_{ph} .
$f_{\min}$	Fréquence minimale.
$f_{\max}$	Fréquence maximale.
Δf	Résolution fréquentielle.
T	Période.
∂	Dérivée partielle.
$x(t)$	Signal dans le domaine temporel.
$X(f)$	Spectre d'un signal.
$\arg[X(f)]$	Argument du spectre.
$h(t)$	Fenêtre de lissage.
$y(t)$	Signal dans le domaine temporel.
$*$	Conjugué complexe.
Q	Rapport entre la fréquence et la largeur de bande.

γ	Paramètre qui permet de faire varier la résolution TF de la ST.
M	Matrice de masse.
K	Matrice de rigidité.
ξ	Amortissement.
ξ_{min}	Amortissement minimum.
ω_{min}	Fréquence angulaire minimale (rad/s).
C	Matrice d'amortissement.
σ'	Contrainte effective.
R_0	Mode fondamental des ondes de Rayleigh.
f_{airy}	Airy phase.
R_n	$N^{ième}$ mode des ondes de Rayleigh.
λ_{airy}	Longueur d'onde correspondante à f_{airy} .

LISTE DES ACRONYMES :

MTQ	Ministère des Transports
MMAWS	Multi-Modal-Analysis-of-Surface-Waves.
SPT	Standard Penetration Test.
CPT	Cone Penetrometer Test.
NDT	NonDestructive Testing.
FLAC3D	Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimesions.
GPR	Ground Penetrating Radar.
MASW	Modal Analysis of Surface Waves
SH	Onde de cisaillement polarisée horizontalement.
Pr	Onde de compression réfléchie.
Pt	Onde de compression transmise.
SVr	Onde de cisaillement polarisée verticalement réfléchie.
SVt	Onde SV réfractée.
SV	Onde de cisaillement polarisée horizontalement.
SHr	Onde de cisaillement polarisée horizontalement réfléchie.
SHt	Onde SH réfractée.
TF	Temps-Fréquence.
TFD	Distribution Temps-Fréquence.
FI	Fréquences instantanées.
DG	Délai de groupe.
STFT	Short Time Fourier Transform.
DL	Distribution linéaire.
WT	Transformations par ondelette.
ST	Transformation de Stockwell.
DQ	Distribution quadratique.
WD	Distributions de Wigner.
WVD	Distributions de Wigner-Ville.
AF	Fonction d'ambiguïté.
RSPWVD	Reallocated Smooted Pseudo Wigner Ville Distribution.
SPWVD	Smooted Pseudo Wigner Ville Distribution.
GST	Transformation de Stockwell Modifié.
2D	Deux Dimensions.
3D	Trois Dimensions
PVC	PolyChlorure de Vinyle.
UdeS	Université de Sherbrooke.
IND	Investigation non destructive

AVANT-PROPOS

Ce document constitue le rapport final dans le cadre du projet de recherche « AMÉLIORATION DE L'IDENTIFICATION DES CAVITÉS SOUS LES ROUTES ET DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE DIAGNOSTIC RAPIDE POUR L'USAGE DU MTQ », selon le contrat intervenu entre le Ministère des Transports, Mobilité Durable et Électrification des Transports (Projet R770.1) et l'Université de Sherbrooke.

Ce rapport a été réalisé à l'Université de Sherbrooke par Ahmed Mhenni ; étudiant au doctorat ; Simon Pierre Tremblay ; stagiaire postdoctoral et Mourad Karray ; professeur au département de génie civil. Le responsable du projet au Ministère des Transports du Québec est Monsieur Bruno Paquet-Bouchard, ingénieur au Service géotechnique et géologie.

Ce rapport fait état des travaux effectués dans le cadre de cette étude :

1. Synthèse de la littérature sur les ondes élastiques et les méthodes non intrusives pour la caractérisation des sols et la détection d'anomalies sous les pavés routiers.
2. Revue de la théorie des ondes et des caractéristiques des ondes de Rayleigh qui permettent de les utiliser dans le diagnostic des remblais routiers
3. Une analyse poussée des méthodes modernes de traitement des signaux afin de sélectionner celles qui s'adaptent le mieux aux problèmes de propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu présentant des contrastes importants (revêtement rigide, sol, ponceau, anomalie).
4. Les étapes qui ont mené au développement d'un modèle physique réduit. Ce modèle imposant a déjà été construit à l'Université de Sherbrooke et de nombreux essais ont déjà été réalisés pour tester différents aspects du problème.
5. Développement des modèles numériques en 3 dimensions pour étudier différentes configurations et valider l'efficacité des méthodes d'essais et d'analyses proposées.
6. La synthèse des études numériques et expérimentales montrant la signature des différentes composantes d'un remblai routier sur les ondes mesurées en surface.
7. Évaluation de l'efficacité d'une nouvelle configuration à l'aide de simulations numériques en 3D et d'essais réalisés sur différents ponceaux du MTQ.
8. Comparaison de l'efficacité de la méthode proposée par rapport à la méthode MMASW à travers des études de cas.
9. Étude de la signature d'une cavité avec un site expérimental à échelle réelle.

Dans l'ensemble, les objectifs définis pour cette phase ont été atteints puisque les résultats obtenus avec la méthode d'inspection proposée à la suite de l'inspection d'un nombre limité de ponceaux (5) ont pu être validés par les résultats obtenus avec la méthode MMASW et des forages. La robustesse de la méthode d'inspection proposée devra maintenant être validée en réalisant d'avantages d'inspections. L'accès à davantage de sites expérimentaux réels permettrait également de valider la robustesse des hypothèses établies. Ceci est d'ailleurs recommandé afin de permettre une évaluation précise de l'effet de différents types d'anomalies sur la propagation des ondes élastiques dans les remblais routiers du MTQ.

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

L'apparition des cavités souterraines est un phénomène indésirable qui surgit d'une manière aléatoire et qui peut être causé soit par des écoulements sous-terrain, des changements physico-chimiques (sols organiques), et par des phénomènes d'érosion. Le problème des cavités sous les chaussées routières du MTQ peut se traduire par le développement d'une cheminée qui peut provoquer un affaissement jusqu'à la surface, créant ainsi des fissures ou une dépression dans le pavé routier. L'apparition soudaine de dépressions dans le pavé constitue un danger pour les usagers, en particulier dans le cas des routes et autoroutes achalandées. Depuis plusieurs années, le MTQ utilise la méthode MMASW (Multi-Modal-Analysis-of-Surface-Waves) dans le but de détecter la présence d'anomalies ou de cavités en dessous des revêtements routiers (pavé d'asphalte). La réalisation d'essais MMASW sur une ligne permet d'obtenir une tomographie en 2D du milieu sous-jacent (en termes de vitesse de phase ou de vitesse des ondes de cisaillement). Ce genre de résultat permet, par exemple, la détection et la localisation des zones de faibles vitesses.

Cependant, ces résultats ne permettent pas d'identifier de façon évidente s'il s'agit d'une cavité ou d'une zone de décompression à cause de l'effet de moyenne qui se produit entre les vitesses de cette zone et le milieu adjacent (perpendiculaire à la ligne). La quantification de la zone d'influence en surface en fonction de la profondeur (ou de la longueur d'onde) permettrait une meilleure identification de l'ampleur d'une cavité et de son emplacement dans l'espace (chapitre 6). Actuellement, il n'existe pas ou peu de données dans la littérature qui permettent d'évaluer cette influence. D'un autre côté, la méthode MMASW a été développée pour la caractérisation des dépôts de sol en termes de module de cisaillement ($G=\rho V_s^2$). Il s'agit donc d'une méthode quantitative (globale) et relativement lourde dans le cas où l'on est intéressé par la détection des cavités seulement. Cette méthode nécessite également une connaissance élevée du traitement des signaux et des phénomènes régissant la propagation des ondes la rendant difficilement automatisable.

Malgré la globalité de la méthode MMASW qui la rend plus lente pour la détection d'anomalies, le faible coût et la possibilité de l'appliquer sur un site à configuration complexe (construction, milieu urbain, trafic dense, inaccessibilité, pente, présence d'obstacles, etc.), lui permet de se présenter comme une méthode non intrusive attrayante pour la détection des anomalies sous les routes et en milieu urbain. De nos jours, il existe de plus en plus de méthodes géophysiques qui essaient de détecter la présence d'anomalies souterraines. Ces méthodes sont par contre souvent basées sur des hypothèses simplificatrices, et en l'absence de standard, davantage de recherche et de développement seront nécessaires afin d'en arriver à valider leur efficacité. Ces recherches doivent être orientées pour mieux comprendre les phénomènes de propagation d'ondes dans les milieux stratifiés en présence d'anomalies ou de vides dans une configuration géométrique complexe (remblai avec pente abrupte dans certains cas) et en présence d'un ponton. Il est aussi nécessaire de simplifier et d'automatiser les procédures de traitement pour les rendre plus accessibles à un plus large éventail d'utilisateurs. La multiplication des utilisateurs de ces méthodes permettrait de les rendre plus fiables et plus robustes pour la détection des anomalies et des vides souterrains. Il est important de noter qu'il est essentiel de mieux connaître les propriétés mécaniques des remblais routiers sur tout le territoire québécois. Ceci peut être fait par l'établissement de valeurs typiques (banque de données)

des propriétés mécaniques des sols rencontrés au cours des investigations géotechniques ultérieures. L'établissement d'une banque de données permettrait de développer un système expert qui peut mieux reconnaître la présence d'un sol de nature différente d'une anomalie en progression ou d'un vide.

Du fait qu'elles sont basées sur la propagation des ondes sismiques, donc directement liée aux propriétés mécaniques des sols, les méthodes géophysiques basées sur la propagation des ondes élastiques (ou sismiques) semblent les mieux adaptées pour la caractérisation non intrusive des remblais routiers et donc pour la détection d'anomalies ou de vides. Ces méthodes possèdent l'avantage de caractériser globalement un site, contrairement aux méthodes destructives conventionnelles (SPT et CPT) qui sont plutôt localisées au niveau du trou de forage et de son voisinage. L'évolution significative des méthodes non intrusives est surtout reliée à l'amélioration importante des systèmes d'acquisition des données, de la disponibilité d'équipement (accéléromètres, systèmes d'acquisition, ordinateurs) de plus en plus précis et rapide.

Les objectifs du projet étaient de :

1. Améliorer notre compréhension de la propagation des ondes de surface dans un milieu superposé d'un revêtement rigide avec et sans présence de cavité afin d'optimiser la configuration des essais et voir même le développement de nouvelles dispositions qui permettent de mieux localiser les anomalies dans l'espace (3D).
2. Développer une méthode d'analyse pouvant être utilisée les techniciens du MTQ. Cette méthode doit au moins être capable de statuer sur l'absence d'anomalie dans la fondation de la route examinée. En cas de doute, la méthode MMASW dans sa configuration actuelle ou mieux adaptée peut être utilisée pour délimiter la zone d'anomalie. Cette méthode qualitative sera automatisée dans le cadre de ce projet.
3. Mieux établir les limites des méthodes basées sur la propagation des ondes de surface à l'aide de simulations numériques en 3D et à l'aide d'un modèle physique réduit qui sera décrit au chapitre 5.

4. Déterminer, individuellement et en présence d'autres composantes, la signature de chaque composante d'un remblai routier sur l'énergie et les vitesses de propagation des ondes de Rayleigh.
5. Développer un ou des algorithmes qui permettent à partir des données recueillies et analysées de mieux cerner les dimensions et la position d'une anomalie présente dans un remblai routier. Cette phase du projet doit inclure des simulations numériques en 3D et aussi des essais de validation des algorithmes développés sur des modèles réduits ou en vraie grandeur.
6. Vérifier l'efficacité de la méthode d'inspection développée sur un nombre limité de ponts du MTQ (dépendamment de la disponibilité des sites).
7. Procéder à des essais sur un site expérimental pour valider l'approche proposée, les hypothèses retenues (dépendamment de la disponibilité des sites).

Ce rapport final sera organisé comme suite :

Le chapitre 2 traitera des principales techniques existantes pour la détection des anomalies dans les dépôts de sol. Le chapitre 3 mettra l'accent sur les méthodes d'inspections basées sur la propagation d'ondes élastiques. Les différents types d'ondes et modes de propagation seront exposés, ainsi que la dispersion, l'atténuation, la radiation et l'amortissement des ondes de Rayleigh. Le choix des ondes de Rayleigh sera justifié en se basant sur les avantages de ce type d'ondes. Le chapitre 4 portera sur les différentes techniques de traitement de signal, un outil indispensable pour les méthodes non intrusives. Ce chapitre montrera, aussi, l'importance de considérer le domaine temporel ainsi que le domaine fréquentiel lors de l'analyse des signaux. Les techniques de traitement de signaux linéaires et quadratiques seront détaillées. Leurs avantages viendront justifier le choix de certaines techniques par rapport à d'autres dans le cadre de ce projet. La procédure expérimentale adoptée pour la collecte des signaux sur le terrain sera aussi montrée. Le chapitre 5 présentera les modèles numériques en 3D et le modèle expérimental de l'UdeS. Le modèle physique réduit élaboré pour simuler une cavité aux alentours d'un pont sera détaillé et les différents essais qui y ont été effectués seront exposés. Les notions de stabilité, convergence, conditions aux limites, les bases du code de calcul utilisé par FLAC3D ainsi

que le principe de différences finies seront introduits. Le chapitre 6 sera consacré à l'étude expérimentale et numérique de la signature de chaque composante d'un remblai routier (pavage, ponceau, cavité) sur les ondes élastiques. Cette étude a mené à une meilleure compréhension de la réponse de ces différentes composantes permettant ainsi l'établissement des hypothèses qui ont été considérées pour le développement de la nouvelle procédure d'inspection des structures de remblais situées aux voisinages des ponceaux. Le chapitre 7 montrera les résultats de simulations numériques en 3D réalisées sur différents modèles numériques de grandes tailles qui ont permis de montrer comment la méthode d'inspection proposée au chapitre 4 permet la détection d'anomalies souterraines. Le chapitre 8 permettra de comparer l'efficacité de la méthode d'inspection proposée par rapport à la méthode MMASW à l'aide d'essais réalisés sur cinq différents ponceaux du MTQ. Le chapitre 9 présentera les résultats d'une inspection réalisée sur un site expérimental, un ponceau du MTQ, où il a été possible d'effectuer des essais avant et après la création d'une cavité à la surface d'un ponceau. Une conclusion et des recommandations concernant les travaux futurs qu'ils seraient pertinents de réaliser seront présentées au chapitre 10.

CHAPITRE 2 : MÉTHODES D'INSPECTIONS

2.1 Revue de littérature

Pour de nombreuses applications en génie civil, l'utilisation de techniques d'investigation non destructives (IND) peut s'avérer avantageuse et même nécessaire dans certains cas. En effet, ce type de technique est parfaitement adapté pour la détection ou la caractérisation de structures ou d'objets se trouvant dans un milieu difficile d'accès. Le chapitre 2 consiste en un survol de divers IND géophysiques qui peuvent être utilisées pour la détection d'objets souterrains et plus particulièrement la détection de cavités ou d'anomalies souterraines. L'intérêt envers les techniques géophysiques pour la détection d'anomalies souterraines n'est pas un phénomène nouveau et il existe dans la littérature de nombreuses études visant à analyser leurs performances (Butler, 1980; Tomash et Roth, 1999; Hutchinson et coll., 2002). Généralement, la conclusion de telles études est que la fiabilité des méthodes géophysiques pour la détection d'une anomalie dans le sol varie grandement en fonction des conditions du sol ainsi que des caractéristiques de l'anomalie.

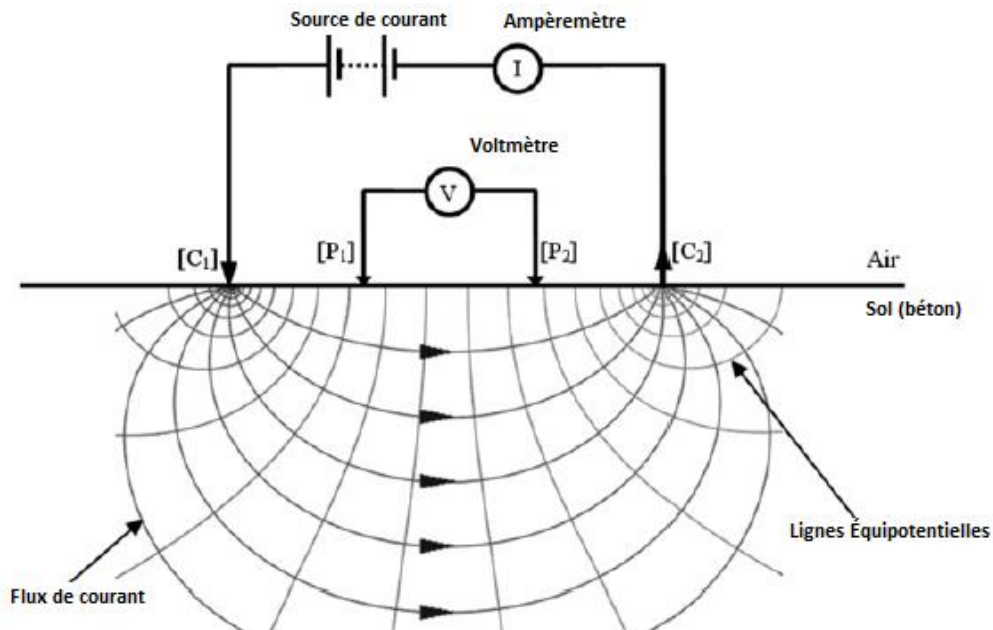


Figure 2.1. Mesure de la conductivité électrique selon la configuration de Schlumberger et de Wenner.

Ce chapitre décrit donc brièvement certaines des techniques géophysiques les plus souvent utilisées pour la détection d'anomalies souterraines ainsi que les avantages, les inconvénients et les limitations liés à leur utilisation.

2.1.1 Méthodes de résistivités

Les méthodes d'inspection utilisant la résistivité électrique consistent à mesurer les différences de résistivités (voltage) entre les sources d'émission du courant et différentes électrodes. La figure 2.1 illustre le principe avec lequel le courant est introduit dans le sol (électrodes C_1 et C_2) et ensuite mesuré à différentes électrodes (P_1 et P_2). Il existe de nombreuses configurations possibles de sources et d'électrodes permettant d'ajuster la résolution de l'investigation (Loke, 2001; Loke et coll., 2013). Les avantages et inconvénients de chacune de ces configurations sont abordés dans plusieurs études (Saydam et Duchworth, 1978; Dahlin et Zhou, 2004; Szarka, 2008). Jusqu'à la fin des années 1980, la configuration montrée dans la figure 2.1 qui est composée de 4 électrodes était la seule utilisée lors d'essais sur le terrain.

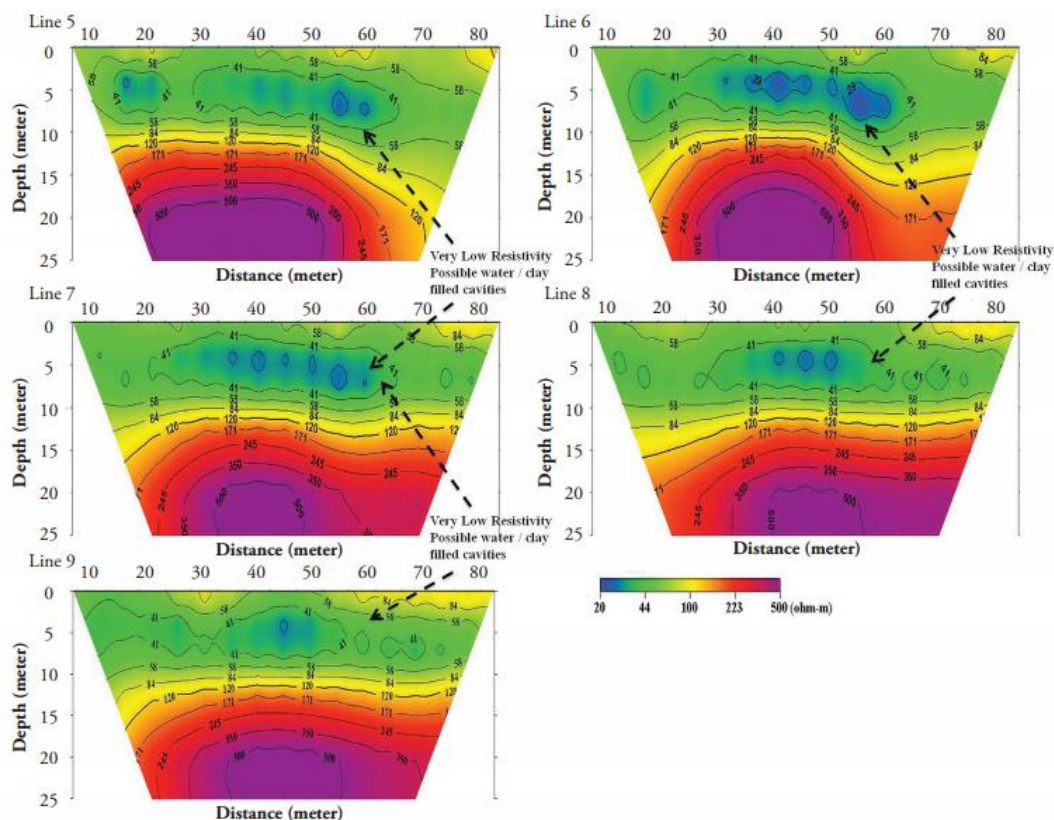


Figure 2.2. Tomographie de résistivité électrique calculée à la suite de l'inversion des données recueillies le long de 5 lignes différentes. Source : Farooq et coll., 2012.

Cependant, des configurations multiélectrodes permettant de couvrir de plus grandes distances en moins de temps que la configuration standard ont fait leur apparition au début des années 1990 (Griffiths et coll., 1990). L'interprétation des données collectées lors des investigations réalisées à l'aide des méthodes de résistivités nécessite l'utilisation d'algorithmes permettant de réaliser un processus d'inversion. Bien que le procédé d'inversion ait grandement évolué au cours des 20 dernières années, ce processus peut être long et nécessiter de nombreuses hypothèses quant aux propriétés du milieu investigué (Loke et coll., 2013). Le processus d'inversion permet l'obtention d'une tomographie du sol en 2 ou 3 dimensions permettant de montrer la variation de la résistivité du sol en fonction de la profondeur du sol (fig. 2.2). Les méthodes de résistivités électriques sont basées sur le fait qu'il existe des différences dans les propriétés électriques des différents matériaux contenus dans le milieu investigué. Dans le cas d'un dépôt de sol, ces différences

peuvent être dues par exemple au degré de saturation du sol, à la présence de certains types de sol ou minéraux ainsi qu'à la porosité du sol (Loke, 2001). La popularité des méthodes de résistivités électriques pour la détection de cavités souterraines est principalement due au fait qu'il devrait théoriquement y exister une grande différence de résistivités entre le sol entourant une cavité et la cavité elle-même (Roth et coll., 2002). La littérature renferme donc un nombre impressionnant d'études numériques et in situ portant sur la détection de cavités à l'aide de cette méthode (Gautman et coll., 2000; Van Schoor, 2002; Zhou et coll., 2002; Roth et Nyquist, 2003; Gibson et coll., 2004; Nyquist et coll., 2007; Farooq et coll., 2012; Zhu et coll., 2012). Ces études et bien d'autres ont permis de démontrer qu'il est possible de détecter la présence de plusieurs types d'anomalies souterraines à l'aide des méthodes de résistivités (Loke et coll., 2013). Cependant, l'application de ce type de méthode pour la détection d'anomalies situées près des ponceaux du MTQ rencontrerait certaines difficultés. Premièrement, contrairement aux méthodes sismiques, les méthodes de résistivités ne permettent que l'acquisition d'informations ne concernant qu'indirectement la lithologie du sol. Cette limitation est importante puisque la résistivité du sol est fortement affectée par plusieurs paramètres concomitants qui seront indissociables lors de l'analyse. Cela fait donc en sorte que les différences de résistivités retrouvées dans les tomographies comme celles montrées par la figure 2.2 peuvent être causées par de nombreux facteurs autres qu'une anomalie dans le sol. Deuxièmement, lors des essais sur le terrain, il est important qu'il existe un bon couplage électrique entre les électrodes et le sol (Loke et coll., 2013). La présence d'un pavé à la surface du sol peut donc compliquer la collecte et l'analyse des résultats obtenus lors d'essais in situ bien que certaines études tendent à démontrer que l'utilisation d'un type spécifique d'électrodes permet de mitiger ou même éliminer le problème (Loke, 2001; Yamashita et coll., 2004). Troisièmement, la présence du ponceau dans le sol aura un effet important sur la résistivité mesurée à la surface du sol et il est possible que cet effet masque la présence d'une anomalie dans le sol. Quatrièmement, le processus d'inversion des résistivités mesurées ne permet pas d'en arriver à une solution unique ce qui peut avoir pour effet de grandement réduire la résolution de l'investigation. Finalement, principalement à cause ces contraintes,

les méthodes de résistivités électriques sont souvent utilisées conjointement avec d'autres techniques d'inspection (Loke et coll., 2013).

2.1.2 Méthodes GPR

Le GPR ou *Ground Penetrating Radar* est une méthode d'inspection couramment utilisée pour de nombreuses applications d'ingénieries (Yelf, 2007). Lors des investigations à l'aide de la méthode GPR, selon la configuration utilisée, une ou plusieurs antennes peuvent être utilisées afin d'émettre et de recevoir une onde électromagnétique. La Figure 2.3 montre différentes configurations qui peuvent être utilisées lors d'essais in situ. Un des avantages du GPR est sa rapidité d'exécution puisque la même antenne peut être utilisée afin de générer et de capter le signal.

Traditionnellement, le système GPR génère un signal de courte durée et de fréquence variant entre 10-2000 MHz qui est transmis dans le sol. L'énergie de cette onde électromagnétique se propage dans le sol jusqu'à ce qu'une partie de celle-ci soit réfléchiée lorsqu'elle entre en contact avec des discontinuités électriques tandis que le reste de cette énergie continue de voyager plus profondément dans le sol (Metje et coll. 2007). Comme pour les méthodes de résistivités électriques, le GPR ne permet pas la mesure d'information directement reliée à la lithographie du sol. Le GPR permet plutôt de détecter des contrastes électromagnétiques. Les propriétés électromagnétiques d'un sol varient principalement en fonction de sa granulométrie, sa porosité, sa teneur en eau ainsi que des propriétés électriques des grains qui le composent (Davis et Annan 1989). En fonction de la configuration utilisée lors des essais in situ, la technique GPR permet de créer une représentation d'un profil souterrain en 2 ou 3 dimensions pouvant permettre l'identification d'anomalies dans le sol comme le montre la figure. 2.4 (Daniels, 2004; Anchuela et coll., 2009).

Cependant, afin d'obtenir une image de haute résolution, il est préférable d'utiliser des ondes de hautes fréquences. Toutefois, ces ondes de hautes fréquences pénétreront moins profondément dans le sol que des ondes de plus basses fréquences.

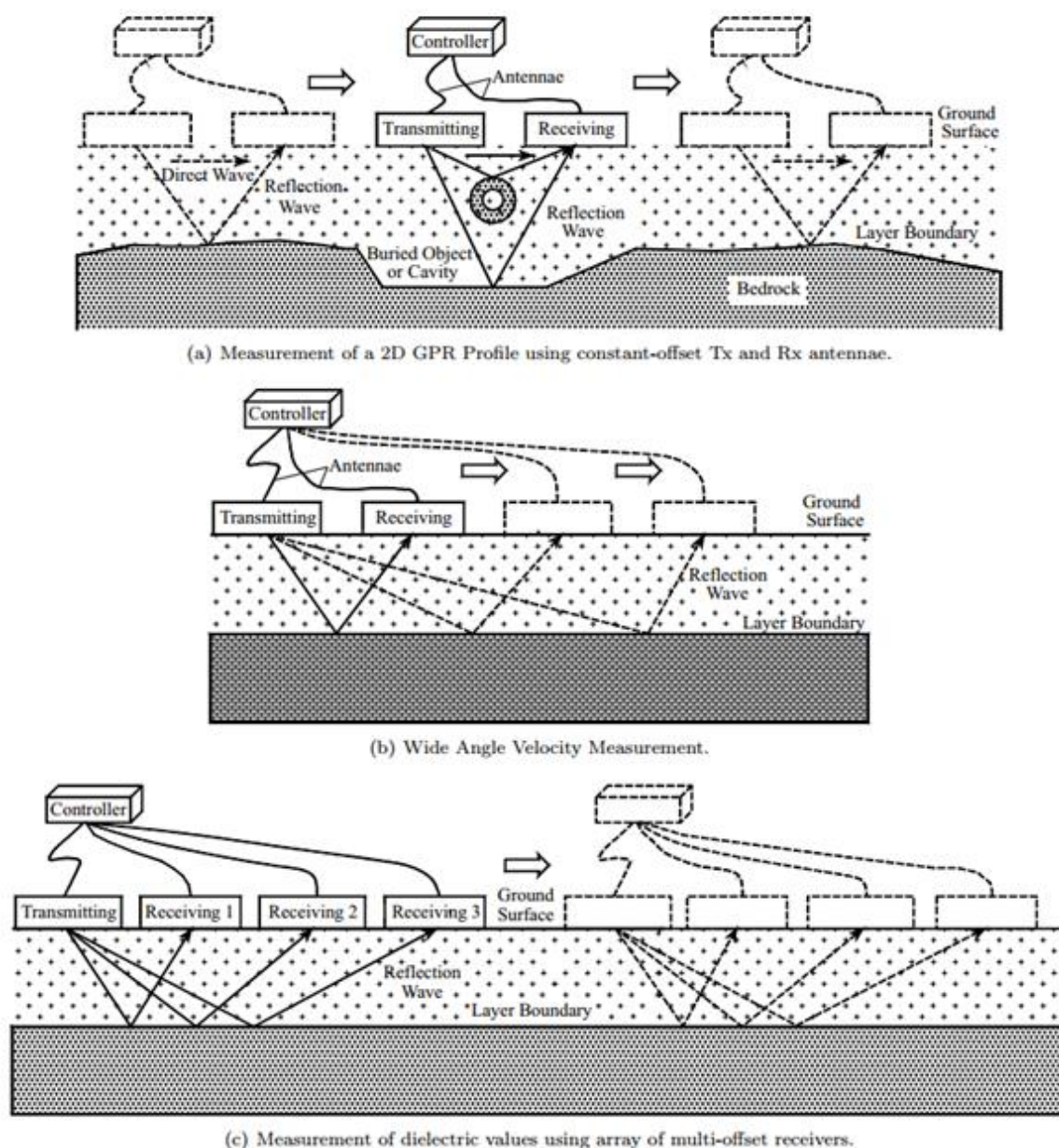


Figure 2.3. Différentes configurations pouvant être utilisées lors d'investigations réalisées à l'aide du GPR. Source : Yelf (2007).

Il y a donc un compromis à faire entre la profondeur qui peut être atteinte et la résolution maximale des données recueillies.

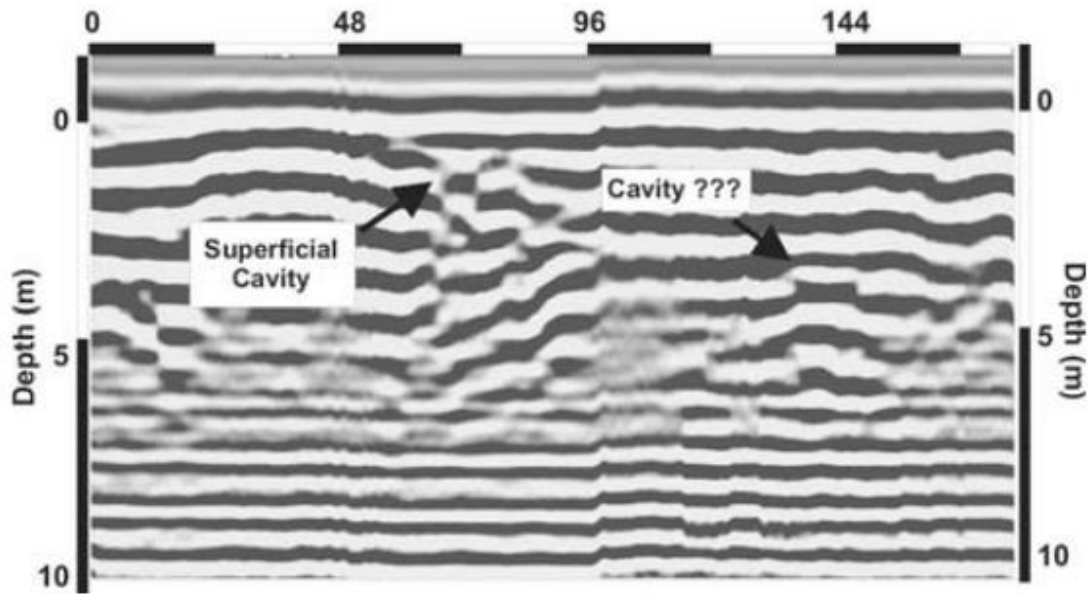


Figure 2.4. Détection de cavité à l'aide de la technique GPR. Source : Anchuela et coll. (2009).

L'efficacité du GPR varie fortement en fonction de la nature du sol investigué ainsi que de la fréquence de l'onde transmise dans le sol par l'antenne. En effet, dans des conditions de sol favorables et lorsque l'antenne permet de générer de basses fréquences (moins de 400 MHz), le GPR peut permettre l'investigation de profils de sol sur une profondeur allant jusqu'à 10 m. Cependant, puisque la propagation du signal transmis par l'antenne dans le sol dépend de ses propriétés électriques, la performance de ce type de radar est limitée par l'atténuation du signal pouvant survenir lorsqu'il entre en contact avec un sol humide particulièrement ceux étant composés d'argile ou d'eau salée (Roger et coll. 2007). Dans ces conditions, la profondeur de pénétration des ondes est grandement réduite rendant ainsi possible l'investigation du sol sur une profondeur allant jusqu'à environ 1-3 m (Daniels, 2004; S.B. Costello et coll. 2007; Yelf, 2007).

Finalement, l'utilisation du GPR afin de détecter la présence d'anomalies dans le sol nécessite de connaître une certaine quantité d'information concernant la nature du sol entourant ces anomalies (Roth et coll., 2002; Roger et coll., 2007). En effet, les propriétés du sol ayant une grande importance sur la vitesse des ondes électromagnétiques ainsi que sur leur atténuation, il est normal que certains sites ne soient pas adéquats à l'utilisation du GPR. Cependant, comme mentionné par Roger et coll. (2007), la nature du sol est souvent

inconnue sur la plupart des sites d'inspections et l'utilisation d'autres méthodes (comme le forage) seraient donc nécessaire afin d'en connaître la nature. Comme pour la méthode électrique, la présence d'un ponceau et de matériaux humide autour de ce dernier amène des degrés de difficulté importants pour la méthode GPR pouvant la rendre inefficace pour ce type d'application.

2.1.3 Méthodes sismiques

Les méthodes géophysiques sismiques sont couramment utilisées en géophysique et en ingénierie pour de nombreuses applications (Karray 1999; Garotta, 2000; Hack, 2000; Keydar et coll., 2010; Krawczyk et coll., 2012; Foti et coll., 2014). Une des raisons de la popularité des méthodes sismiques est que les données obtenues lors des tests dépendent directement des propriétés mécaniques des matériaux que les ondes sismiques rencontrent (Hack, 2000). Cette propriété est importante puisqu'elle permet à plusieurs techniques basées sur la propagation des ondes sismiques de caractériser le profil de sol investigué en ayant recours à moins d'hypothèses lors de l'inversion que les méthodes de résistivités électriques. Les méthodes sismiques mesurent généralement le temps d'arrivée des ondes élastiques voyageant à travers le sol. Le temps d'arrivée de ces ondes, émises depuis une source située à un endroit précis, est mesuré à l'aide de plusieurs récepteurs (géophones ou accéléromètres) placés en ligne droite le long du profil à être examiné.

Bien que les méthodes sismiques (particulièrement celle utilisant les ondes de compressions) ont été utilisées avec succès pour diverses applications tel que la détermination de la profondeur du roc, la localisation de fissures dans le roc et l'identification et la localisation de minerais et de pétrole sous la surface du sol, l'utilisation de ce type de méthodes sismiques sur un site où la présence de bruit est importante (comme sur les routes) n'est pas recommandable puisque la présence du bruit est susceptible de nuire à l'interprétation des signaux (Hack, 2000; Krawczyk, 2012). En ce qui a trait à la détection de cavités ou d'anomalies dans le sol, l'utilisation des méthodes sismiques a depuis longtemps été étudiée (Butler, 1980). Cependant, ce n'est que depuis un peu plus de 10 ans que ce type de méthodes a permis d'en arriver à des résultats intéressants (Karray,

1999, Karray et Lefebvre, 2008, Grandjean et Leparoux, 2004; Nasser-Moghaddam, 2006; Xia et coll., 2007; Luke et Calderon, 2008; Chai et coll., 2012; Chai et coll., 2013).

Pour les méthodes sismiques, la détection d'une anomalie sous la surface du sol repose sur l'hypothèse qu'il y existe un contraste de rigidité entre le sol entourant l'anomalie et l'anomalie elle-même. De nombreuses techniques basées sur la vitesse et l'énergie de propagation des ondes sismiques élastiques (ondes de surfaces et de volumes) ont donc été élaborées à partir de cette hypothèse (Gucunski et coll., 1996; Grandjean et Leparoux, 2004; Nasser-Moghaddam, 2006; Xia et coll., 2007). L'efficacité et la robustesse de ces techniques pour la détection de divers types d'anomalies dans le sol demeurent toutefois à être démontrées. L'utilisation de la propagation des ondes élastiques pour la caractérisation ou la détection d'anomalie sera examinée en détail dans la suite de ce rapport.

2.1.4 Méthode MMASW

La méthode MMASW développée au Département de génie civil de l'Université de Sherbrooke (Lefebvre et Karray, 1998; Karray, 1999) était, jusqu'en 2012, désignée par l'acronyme MASW pour « Modal Analysis of Surface Waves ». L'acronyme MMASW pour « Multi-Modal Analysis of Surface Waves » est maintenant utilisé pour désigner la même méthode afin d'éviter toute confusion avec une autre méthode désignée aussi par l'acronyme MASW, mais pour « Multichannel Analysis of Surface Waves » développée à l'institut géophysique du Kansas (Park, Miller et Xia, 1999). Dans la méthode MMASW utilisée pour l'investigation des sols sous-jacents à des pavés jusqu'à des profondeurs relativement faibles, les ondes de surface sont générées au moyen d'un marteau de 15 kg couissant sur une tige verticale permettant une hauteur de chute constante de 1,2 m. La source d'énergie est généralement placée à l'extérieur du pavé (fig. 2.5), dû à la difficulté d'exciter les sols sous-jacents à un pavé par un impact sur ce dernier. L'excitation à la surface du remblai à l'extérieur du pavé génère une onde de Rayleigh qui voyage dans le remblai ou mort terrain et non dans le pavé. Bien que son passage soit détecté par les senseurs disposés à la surface du pavé, ce dernier n'est pas caractérisé par les signaux enregistrés. Les capteurs, de type PCB d'une fréquence de résonance de 5 kHz, sont disposés sur le pavé à tous les 0,2 m.

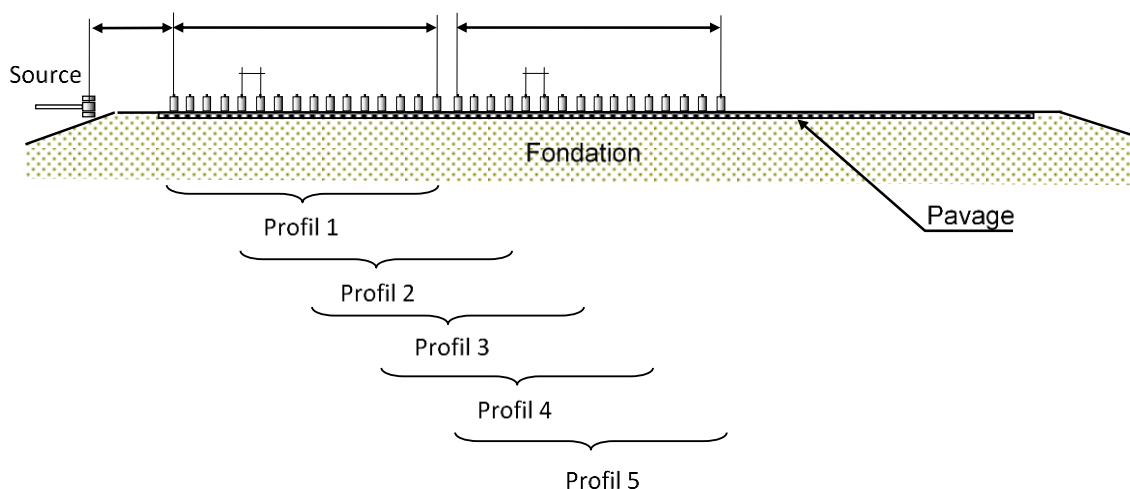


Figure 2.5. Configuration des essais MMASW.

Les seize signaux utilisés dans un essai MMASW couvrent, pour cette configuration, une distance de 3,0 m et permettent de déterminer un profil V_s situé au centre de cette distance. Au moment de l'analyse, les signaux sont combinés de façon à caractériser les matériaux à tous les 0,4 m. Les profils de V_s sont déterminés à partir des ondes de Rayleigh, générées par un impact et qui se propagent à la surface du terrain. La méthode MMASW se distingue par le traitement simultané de seize signaux, permettant de définir les courbes de dispersion (vitesse de phase de l'onde de Rayleigh en fonction de la longueur d'onde) pour chacun des modes de l'onde de Rayleigh. Ces courbes de dispersion sont ensuite transformées, par un processus d'inversion, en un profil de V_s situé au centre de ces seize signaux.

Ces signaux peuvent être enregistrés par un nombre de capteurs inférieur à 16 pourvu que ces derniers soient ensuite combinés par séries de 16 aux fins d'interprétation. La réalisation d'essais MMASW les uns à la suite des autres permet plusieurs combinaisons de seize signaux (figure 2.1) et la détermination de profils V_s suffisamment rapprochés les uns des autres pour présenter les résultats sous forme tomographique, ce qui se prête bien à la détection d'anomalies dans un remblai.

Lorsqu'utilisées pour la détection des cavités, les courbes de dispersion du premier mode de l'onde de Rayleigh sont d'abord utilisées pour présenter la vitesse de phase sous forme

de contours de vitesse de phase en fonction de la distance et de la longueur d'onde utilisant les résultats obtenus à tous les 0,4 m afin de détecter la présence éventuelle d'anomalies. Quelques profils types sont ensuite inversés (V_{s1} en fonction de la profondeur) pour mieux caractériser ces anomalies. Dans ces profils, la vitesse des ondes de cisaillement est normalisée pour une contrainte effective de 100 kPa afin d'annuler l'effet de la profondeur. La vitesse normalisée (V_{s1}) ne dépend alors essentiellement que de l'indice des vides ou de la compacité.

CHAPITRE 3 : PROPAGATION DES ONDES ÉLASTIQUE DANS UN MILIEU HÉTÉROGÈNE

3.1 Introduction

En dynamique des corps rigides, lorsqu'un point du corps est soumis à une force il en résulte un mouvement instantané dans tous les points du corps (figure 3.1). Cette force produit un mouvement du corps avec une accélération angulaire autour de son centre de gravité telle qu'il est énoncé par la loi du mouvement de Newton. À faible déformation, en appliquant la théorie de l'élasticité, le corps est censé être dans un état d'équilibre statique et des déformations élastiques se produisent dans tout le corps. Une combinaison de ces deux approches conduit à la théorie de la propagation des ondes élastiques (Tolstoy, 1973; Kolsky, 1963). Cette méthode d'analyse doit être utilisée lorsque la force appliquée est transitoire ou change rapidement pendant le temps d'observation par rapport aux fréquences de vibrations naturelles du corps.

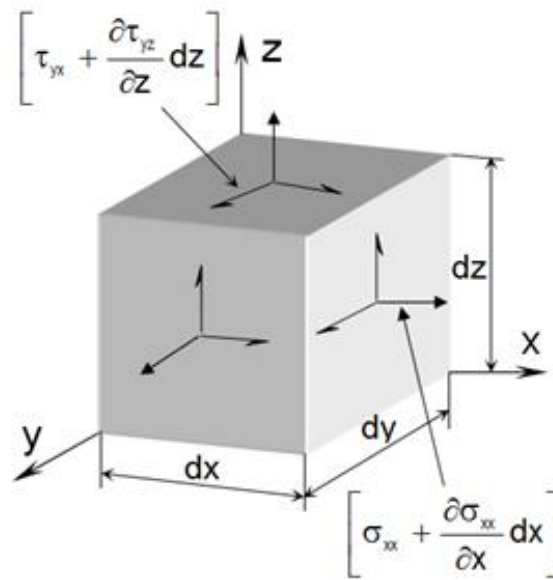


Figure 3.1. Perturbation d'un élément de sol (Karray, 1999).

En général, lorsqu'un corps solide est perturbé, on produit des ondes de volumes sous la forme d'ondes de compressions (ondes P) et d'ondes de cisaillement (ondes s). La vitesse de propagation des ondes de cisaillement est directement reliée au module de cisaillement G ($G=\rho.V_s^2$) et représente donc une propriété mécanique fondamentale qu'on peut mesurer in situ et au laboratoire. De là l'importance de ce paramètre.

À l'intérieur d'un milieu élastique et isotrope, une onde peut se propager selon deux vitesses différentes (c_1 et c_2). L'onde qui correspond à une variation de la dilatation voyage dans le milieu à une vitesse c_1 , alors que celle qui correspond à une ou plusieurs composantes de la rotation se propage à une vitesse c_2 . Le premier type d'onde est connu sous le nom d'onde de compression, de dilatation, longitudinale, irrotationnelle ou onde P. Le second type, est nommé onde de cisaillement, rotationnelle, transversale ou onde S (figure 3.2).

La vitesse de l'onde de cisaillement (S) dépend du module de cisaillement (G) et de la masse volumique ($G=\rho.V_s^2$). Cependant, la vitesse des ondes de compression dépend non seulement du facteur de compressibilité (k), mais aussi du module de cisaillement (G).

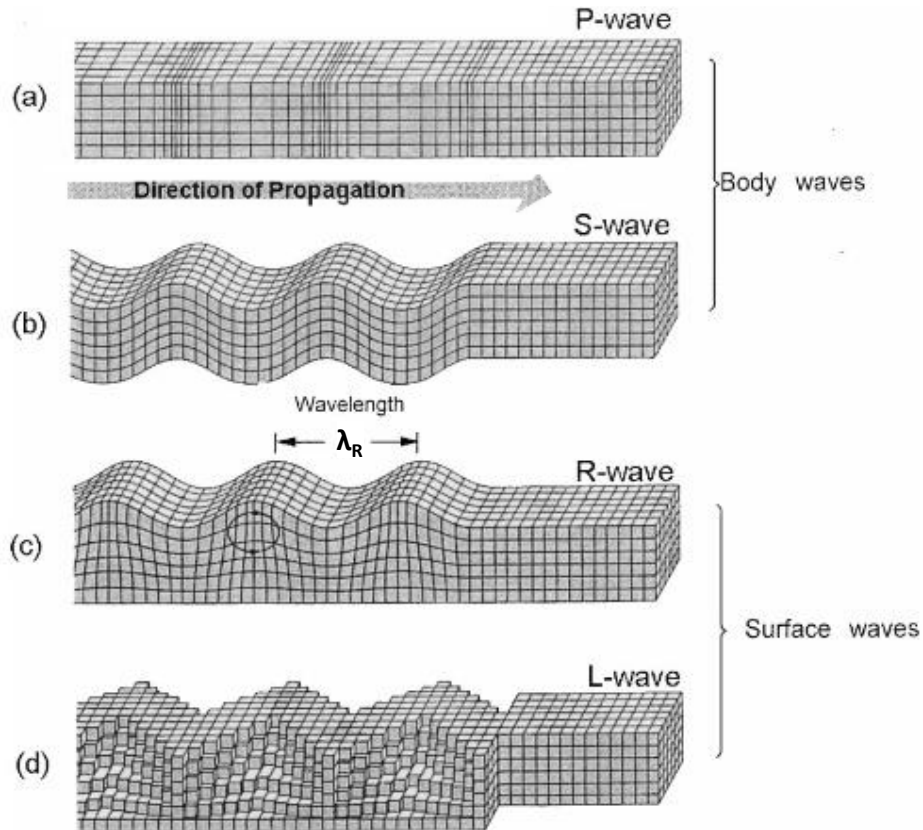


Figure 3.2. Schématisation des ondes de volume a) ondes de compression P et b) ondes de cisaillement S et des ondes de surface c) ondes de Rayleigh R et d) ondes de Love L (Athanasopoulos et al., 2000) .

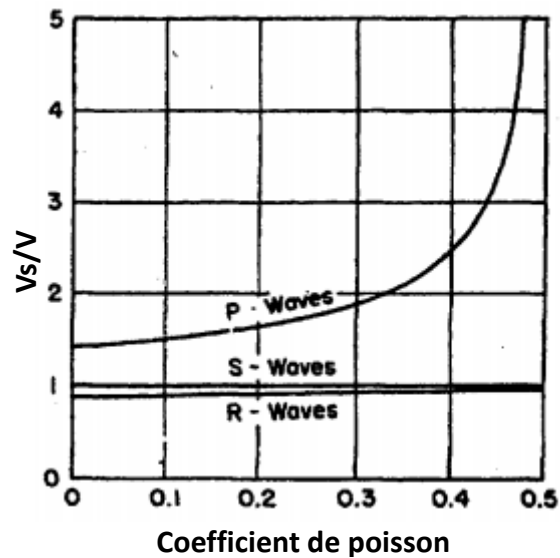


Figure 3.3. Rapport de vitesses des ondes élastiques en fonction du coefficient de Poisson (Richart, 1962).

Donc, au cours de la propagation de l'onde P, le milieu n'est pas soumis à une simple compression, mais à une combinaison de compression et de cisaillement. Le cas de cisaillement pur peut exister.

L'onde de compression voyage plus rapidement que l'onde de cisaillement et le rapport de vitesse dépend uniquement du coefficient de Poisson ν (figure 3.3) :

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{1-\nu}{1/2-\nu}} \quad (3.1)$$

L'onde de cisaillement est presque inexistante dans un milieu où ν est de $\approx 0,5$ comme l'eau par exemple. La vitesse des ondes de compression est dans ce cas de l'ordre de 1500 m/s (sheriff et Geldart, 1982; Hardin, 1961; Ballard et Casagrande, 1966 et 1967).

Il existe seulement deux types d'ondes dans un milieu infini élastique et isotrope (S et P). Dans un milieu semi-infini, les conditions aux limites du problème sont différentes et il existe d'autres solutions aux équations d'ondes. Ces solutions correspondent aux ondes réfléchies au contact de la surface séparant le milieu solide et le vide et à la propagation d'un autre type d'onde dont le mouvement est confiné dans une zone proche de la surface soit une onde connue sous le nom d'onde de Rayleigh (Richard et coll., 1970).

3.2 Ondes de Rayleigh

L'onde de Rayleigh « dite onde de surface » permet de relier les propriétés mécaniques du milieu (V_s et V_p) à l'espace (longueur d'onde). Cette onde est appelée onde de surface parce qu'il est possible de la mesurer à partir de la surface. Pour déterminer les caractéristiques des ondes de Rayleigh, il faut résoudre les équations de propagation d'ondes en imposant les conditions aux limites appropriées du problème. Ces conditions sont telles que les contraintes normales et tangentielles sont nulles à la surface du milieu semi-infini. Pour simplifier le problème, on considère le cas d'une onde plane se propageant dans la direction x . On considère également que le plan xy correspond à la surface libre et que l'axe z est orienté positivement à l'intérieur du milieu solide. Puisque le mouvement est indépendant

de y , les déplacements u et w , suivant les directions x et z respectivement, peuvent être exprimés à l'aide des fonctions potentielles ϕ (dilatation) et ψ (rotation) :

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad \text{et} \quad w = \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (3.2)$$

La résolution des équations d'onde doit être faite pour ϕ et ψ respectivement. Cependant, si on considère une onde sinusoïdale de fréquence $\omega/2\pi$ se propageant dans la direction x avec une vitesse c et une longueur d'onde $2\pi/k$, les solutions des équations d'ondes sont (Richard et coll., 1970):

$$\phi = F(z) \exp\{i(\omega t - kx)\} \quad \text{et} \quad \psi = G(z) \exp\{i(\omega t - kx)\} \quad (3.3)$$

F et G sont des fonctions définissant les changements d'amplitude suivant l'axe z . La substitution de l'équation 3.3 dans les équations d'ondes et la résolution de ces équations permet de déterminer les solutions générales ($F(z)$ et $G(z)$) :

$$F(z) = A \exp(-qz) + A' \exp(qz) \quad \text{avec} \quad q^2 = (\omega/c)^2 - (\omega/c_1)^2 \quad (3.4a)$$

$$G(z) = B \exp(-sz) + B' \exp(sz) \quad \text{avec} \quad s^2 = (\omega/c)^2 - (\omega/c_2)^2 \quad (3.4b)$$

Le second terme de ces équations correspond au changement d'amplitude dans la direction de z négative qui est ici le vide et donc A' et B' sont nuls. On peut insérer ces expressions dans les conditions aux limites du problème ($\sigma_{zz} = 0$, $\tau_{zy} = \tau_{zz} = 0$ pour $z=0$).

Ces équations admettent trois solutions différentes de c_1 et c_2 , ce qui démontre l'existence d'autres types d'ondes. Cependant, pour deux de ces solutions, l'onde ne s'atténue pas avec la profondeur (p et/ou s sont des nombres complexes). Celles-ci correspondent à des ondes réfléchies. Seule la solution qui permet d'avoir des nombres réels de s et de q (impliquant une atténuation de l'onde en fonction de la profondeur, équation 3.4a et b) correspond à une onde de Rayleigh.

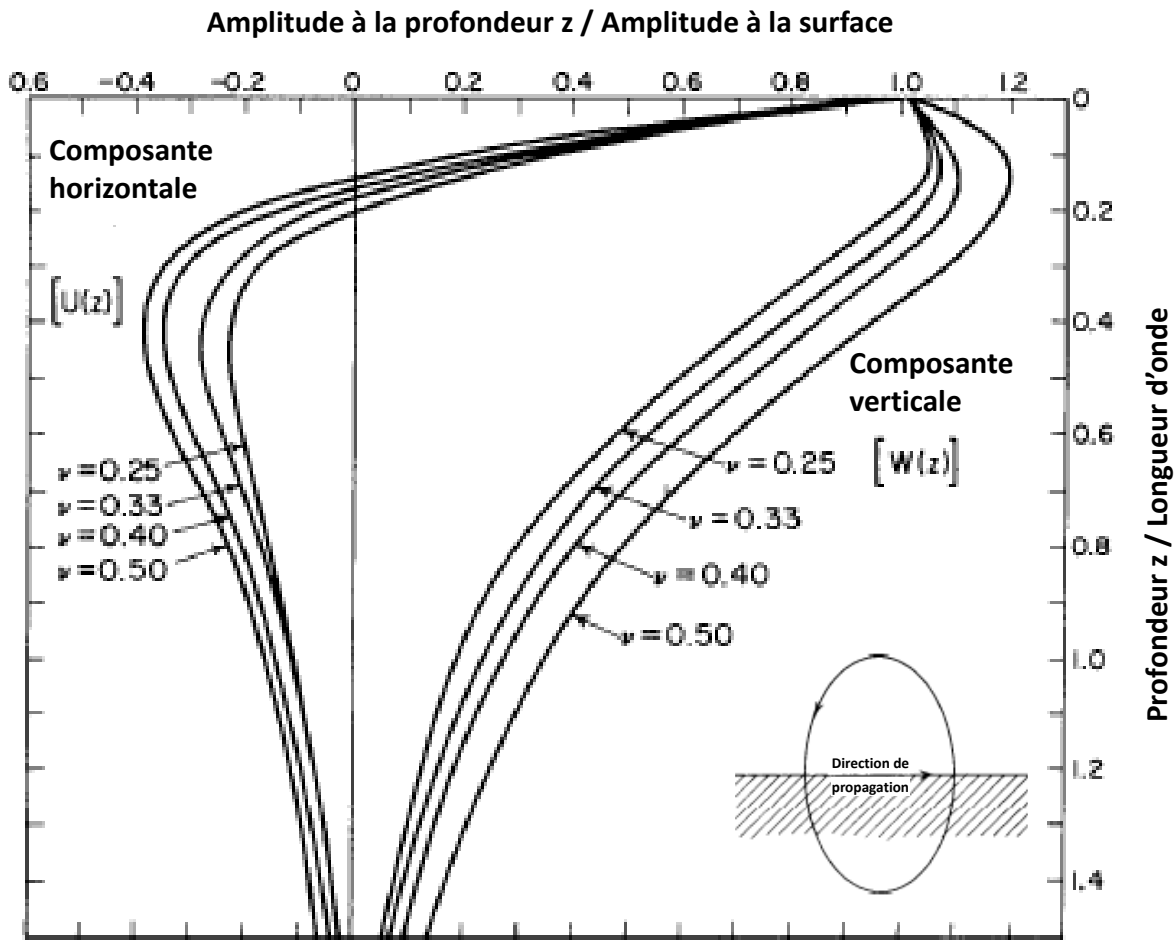


Figure 3.4. Propriétés des ondes de Rayleigh dans un milieu semi-infini homogène et isotrope (d'après Richart et al., 1970).

Considérant le cas où le coefficient de Poisson ν , est égal à 0,25 ($c_2/c_1=(1/3)^{1/2}$), la solution de l'équation d'onde est donnée, dans ce cas, par (c/c_2) égale à 2, 1,776 et 0,919. On constate que pour les deux premières solutions (s et q des nombres complexes), la vitesse, c , est supérieure à la vitesse des ondes de cisaillement (c_2). La troisième solution, correspondant à une onde de Rayleigh, indique cependant une vitesse (c) légèrement inférieure à la vitesse des ondes de cisaillement et permet de calculer les fonctions $U(z)$ et $W(z)$ correspondant à la variation des déplacements u et w de l'onde de Rayleigh (figure 3.4).

La résolution des équations d'onde permet de constater que les ondes de Rayleigh se propagent avec une vitesse légèrement inférieure à celle des ondes de cisaillement. Cette vitesse varie en fonction du coefficient de Poisson (figure 3.3) et elle est indépendante de la fréquence dans un milieu homogène élastique et isotrope (sans masse). Dans ce cas, l'onde est dite non dispersive. D'un autre côté, les équations d'ondes permettent de constater que :

- une particule à la surface du milieu décrit une ellipse de grand axe vertical dont l'arc supérieur est parcouru dans le sens rétrograde (fig. 3.4).
- les ondes de Rayleigh s'atténuent exponentiellement avec la profondeur (cette atténuation est plus importante pour la composante horizontale de l'onde).
- la décroissance des amplitudes avec la profondeur est d'autant plus rapide que la fréquence est élevée (ou la longueur d'onde est petite).
- la composante verticale est plus importante que la composante horizontale comme le montre la figure 3.4.

Ces propriétés sont importantes pour le développement des méthodes basées sur la propagation des ondes de Rayleigh. Ceci dit, dans un milieu naturel, les propriétés mécaniques changent en fonction de la contrainte d'une part et de la nature des matériaux. Pour cette raison, les ondes de Rayleigh deviennent dispersives, autrement dit leurs vitesses changent en fonction de la fréquence. Il existe aussi d'autres phénomènes qui interviennent dans la propagation des ondes qui seront traités dans la section suivante.

3.3 Propagation d'onde dans un milieu semi-infini stratifié

La considération d'un milieu infini ou semi-infini, homogène, élastique et isotrope a permis d'étudier, dans un premier temps, les différents types d'ondes. Dans la réalité, ces milieux idéaux n'existent pas et il faut redéfinir les phénomènes de propagation des ondes. La considération d'un modèle composé de plusieurs couches est une approximation plus réaliste.

3.3.1 Réflexion des ondes de compression

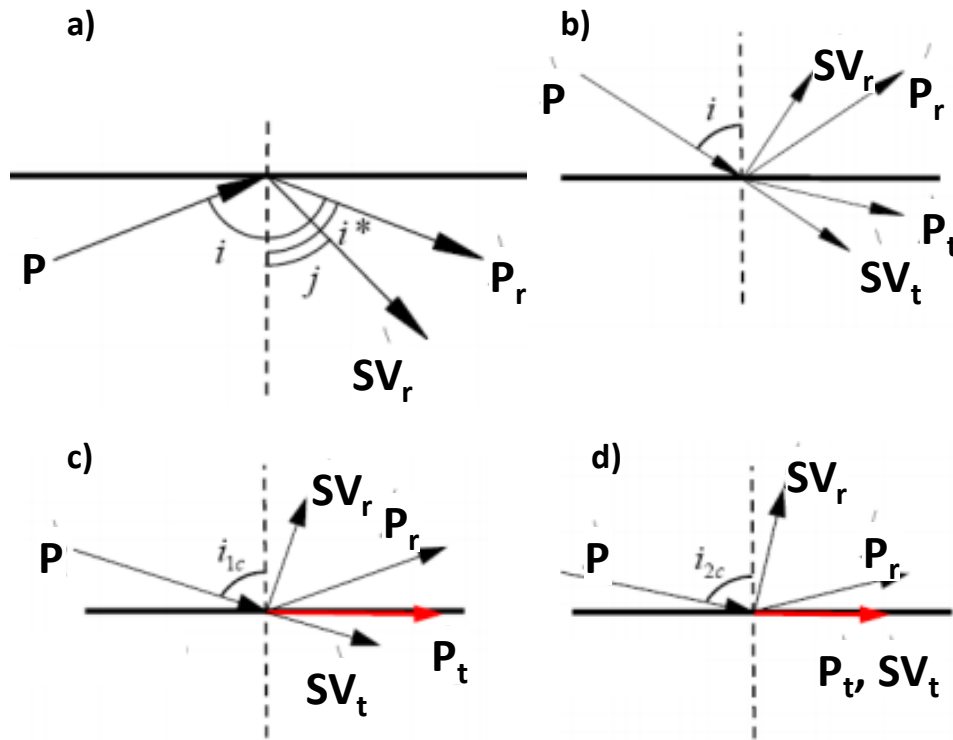


Figure 3.5. Réflexion et réfraction des ondes de compression a) à une surface libre, b) à l'interface de deux couches, c) à l'interface de deux couches avec un angle d'incidence critique i_{1c} et d) à l'interface de deux couches avec un angle d'incidence critique i_{2c} .

En présence d'une surface libre, une onde de compression est réfléchiée en une onde de compression et de cisaillement polarisée verticalement, tel qu'il est illustré à la figure 3.5a. Alors que, si l'onde de compression atteint une surface séparant deux couches de propriétés élastiques différentes, une partie de son énergie est réfléchiée dans le milieu où se propage l'onde et le reste est transmis au deuxième milieu. Cette onde (incidente) donne naissance non seulement à une onde réfléchiée et une onde réfractée du même type, mais aussi à une onde réfléchiée et une onde réfractée de natures différentes (fig. 3.5b). Une onde de compression (P) se transforme en quatre ondes (figure 3.5b) : une onde P réfléchiée (P_r), une onde P réfractée ou transmise (P_t), une onde de cisaillement polarisée verticalement réfléchiée (SV_r) et une onde SV réfractée (SV_t).

Il existe des angles d'incidence à partir desquels l'onde réfractée se propage à un angle de 90° (fig. 3.5b et c). Ces angles d'incidence sont appelés des angles critiques (i_c) et ils sont supérieurs à $\sin^{-1}(V_{p1}/V_{p2})$.

3.3.2 Réflexion des ondes de cisaillement

Dans le cas de l'onde de cisaillement (S), les composantes, verticale et horizontale, doivent être traitées séparément. L'onde de cisaillement polarisée verticalement donne naissance à quatre ondes (fig. 3.6c). Cependant, l'onde de cisaillement polarisée horizontalement se transforme en deux ondes seulement (figure 3.6b) : une onde SH réfléchie (SH_r) et une onde SH réfractée (SH_t). Ces diverses ondes obéissent à des lois de réflexion et de réfraction bien définies. L'angle avec lequel une onde résultante quitte l'interface dépend de l'angle d'incidence et du rapport de vitesses entre les couches. Ces angles peuvent être évalués à l'aide de la relation suivante (Ewing et coll., 1957):

$$\frac{\sin i_1}{V_{p_1}} = \frac{\sin j_1}{V_{s_1}} = \frac{\sin i_2}{V_{p_2}} = \frac{\sin j_2}{V_{s_2}}, \quad (3.5)$$

i_1, j_1, i_2 et j_2 sont les angles formés par les fronts d'ondes résultantes et l'axe perpendiculaire à la surface de contact. V_{p1}, V_{p2}, V_{s1} , et V_{s2} sont les vitesses des ondes de compression et de cisaillement de la première et de la deuxième couche respectivement. L'amplitude ou l'énergie de chaque onde résultante dépend du rapport des densités des deux couches, du rapport de vitesses des ondes élastiques et de l'angle d'incidence.

De même que pour les ondes de compression, au-delà d'un angle d'incidence critique i_c égale à $\sin^{-1}(V_{p1}/V_{p2})$, l'onde réfractée se propage à un angle de 90°, tel qu'il est illustré à la figure 3.6d pour une onde S incidente polarisée horizontalement. Il est à noter, aussi, qu'en présence d'une surface libre, une onde S polarisée verticalement sera réfléchi en une onde S polarisée verticalement et en une onde de compression (fig. 3.6a), alors qu'une onde une onde S polarisée horizontalement sera réfléchi, seulement, en une onde S polarisée horizontalement.

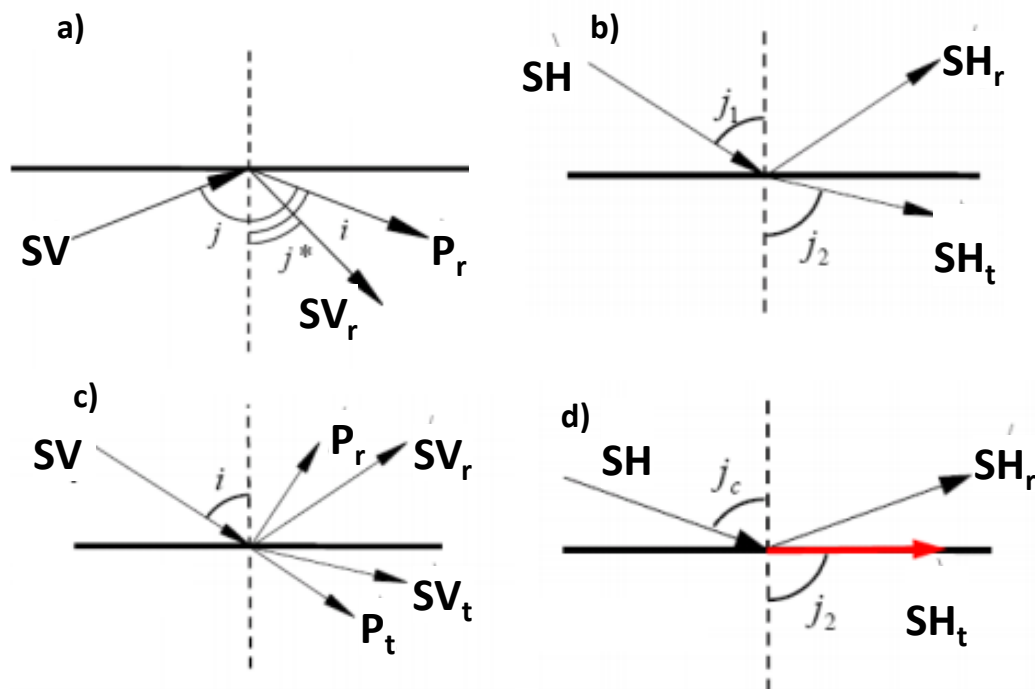


Figure 3.6. Réflexion et réfraction des ondes de cisaillement a) polarisée verticalement (SV) à une surface libre, b) polarisée horizontalement (SH) à l'interface de deux couches, c) polarisée verticalement (SV) à l'interface de deux couches et d) polarisée horizontalement (SH) à l'interface de deux couches avec un angle d'incidence critique.

3.3.3 Réflexion des ondes de Rayleigh

La réflexion des ondes de Rayleigh est un aspect important dans le cadre de cette étude à cause de la présence de pente dans le cas des remblais routiers. Les ondes de Rayleigh étant des ondes de surface, le problème de leur réflexion et de leur réfraction se pose quand on a deux milieux différents en contact le long d'une interface verticale ou inclinée (pente). À son arrivée à l'interface, l'onde incidente de Rayleigh se décompose, d'après Richart et coll. (1970), en : (1) onde de Rayleigh réfléchie, (2) onde de Rayleigh transmise (réfractée), (3) une onde de surface se propageant à la surface de contact des deux milieux, (4) une onde de volume réfléchie et (5) une onde de volume réfractée. Si le deuxième milieu est l'air libre (exemple d'une digue ou d'un talus), l'onde incidente est décomposée uniquement en

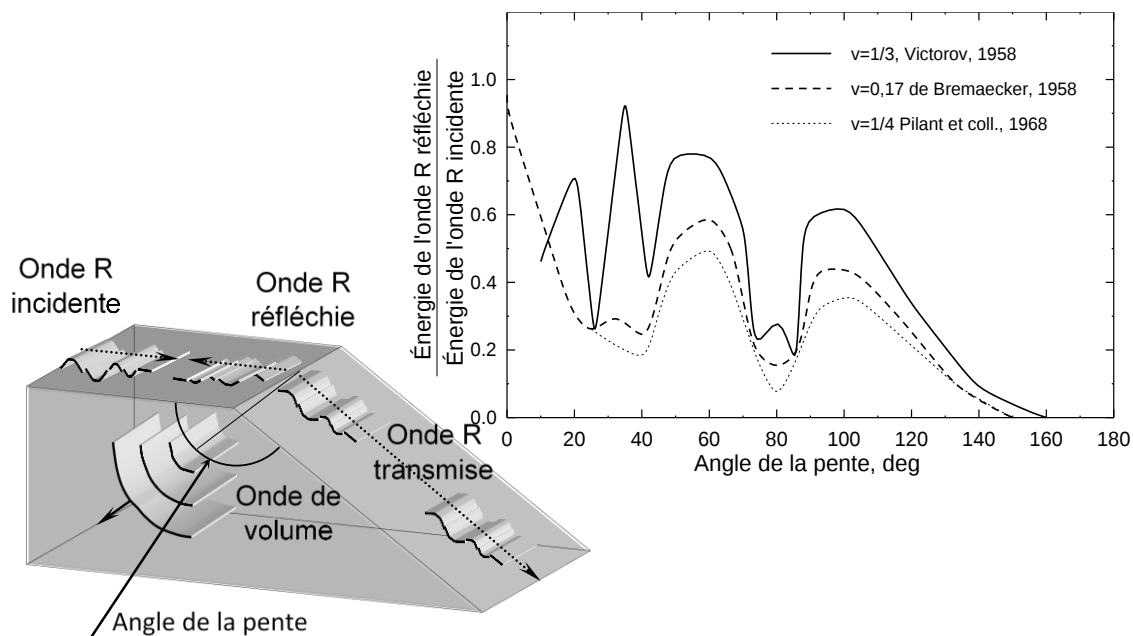


Figure 3.7. Illustration du problème de réflexion de l'onde de Rayleigh au contact d'une pente et rapport des énergies réfléchie et incidente de l'onde R (Karray, 1999).

une onde de Rayleigh réfléchie, onde de Rayleigh transmise et une onde de volume réfléchie (figure 3.7).

Il est important de noter que les ondes de Rayleigh incidente, réfléchie et transmise ont les mêmes caractéristiques. Cela dit, quel que soit le deuxième milieu, c'est l'onde de Rayleigh réfléchie qui pose un problème pour les méthodes basées sur la propagation de ce type d'onde.

Pilant et coll. (1964), DeBremaecker (1958) et Victoroc (1958) ont étudié théoriquement le problème de réflexion des ondes de Rayleigh sur l'interface crête-pente (figure 3.7). Ces derniers ont constaté que l'énergie de l'onde réfléchie dépend du coefficient de Poisson et de l'inclinaison de la pente (figure 3.7). L'angle de la pente est défini comme étant celui formé par la surface de la crête et celle de la pente. Il est intéressant de voir que lorsque l'angle de la pente est supérieur à 160° , les ondes de Rayleigh ne sont pas réfléchies au contact crête-pente.

3.3.4 Phénomène de dispersion

Dans un milieu semi-infini homogène, élastique et isotrope (sans masse), une onde du type P, S ou R se propage avec la même vitesse quelle que soit sa longueur d'onde. Dans ce cas, l'onde est dite non dispersive puisqu'elle ne varie pas en fonction de la fréquence (ou la longueur d'onde). Considérons le cas d'un milieu composé de deux couches de propriétés élastiques différentes. La figure 3.8 présente le mouvement de particule à deux fréquences (ou longueurs d'onde) différentes. Une onde de Rayleigh d'une longueur (λ_1) inférieure à la hauteur de la première couche (figure 3.8a) se propage avec une vitesse différente d'une onde ayant une longueur (λ_2) supérieure à la hauteur de cette même couche (figure 3.8b et c). On sait d'après la section 3.1 que l'énergie d'une onde de Rayleigh est confinée dans une zone d'une épaisseur égale approximativement à une longueur d'onde. Donc, la vitesse de la première onde (λ_1) est fonction des propriétés élastiques de la première couche seulement ($\lambda \leq h_1$). Par contre, la vitesse de la deuxième onde dépend des propriétés des deux couches touchées par l'onde en question.

La variation de la vitesse avec la longueur d'onde est appelée dispersion (figure 3.9). Ce phénomène (dispersion) est associé à la stratification du milieu et à son anisotropie. En effet, les mesures révèlent que les ondes de Rayleigh sont dispersives (Dobrin, 1951). Ce sont des ondes de faibles vitesses et de basses fréquences avec une large gamme de longueurs d'onde. Les ondes de volumes sont cependant peu dispersives et leurs fréquences sont plus élevées que celles des ondes de Rayleigh.

La relation qui relie la vitesse d'une onde à la fréquence angulaire ω ou au nombre d'ondes κ est appelée fonction de dispersion (Stein et coll., 2003), où $\omega = 2\pi/f$ et $\kappa = 2\pi/\lambda$, sachant que f est la fréquence alors que λ est la longueur d'onde. Pour satisfaire l'équation d'équilibre, la fréquence angulaire ω ainsi que le nombre d'ondes κ doivent satisfaire l'équation :

$$\Delta_R(\omega, \kappa) = 0 \quad (3.6)$$

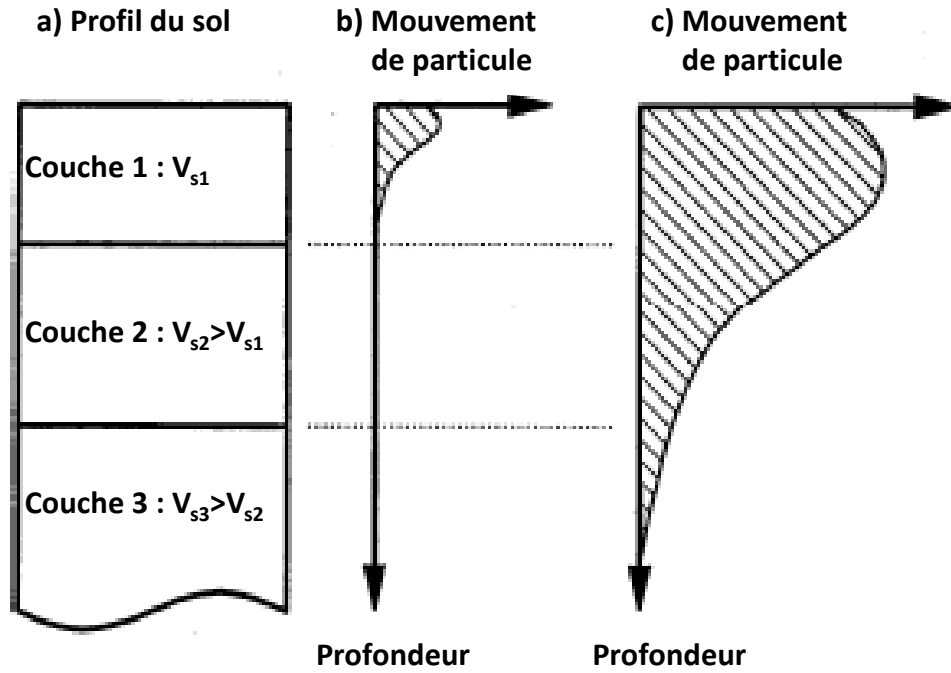


Figure 3.8. Dispersion géométrique des ondes de Rayleigh dans a) un milieu semi-infini homogène stratifié, b) à haute fréquence, courte longueur d'onde et c) à basse fréquence, grande longueur d'onde (d'après Rix 1989).

Pour chaque problème, on appliquant les conditions aux limites, la fonction d'inversion $\Delta_R(\omega, \kappa)$ pourrait admettre plusieurs solutions, donc pour une même fréquence f plusieurs valeurs de λ . Ces différentes courbes de dispersion définissent les modes de l'onde. Ce qui signifie physiquement qu'une fréquence peut se propager avec différente vitesse dépendamment du mode. L'illustration des modes avec les ondes de Rayleigh sera plus détaillée dans les sections suivantes. La vitesse avec laquelle une fréquence se propage dans un milieu est appelée vitesse de phase et définit par :

$$V_{ph} = \frac{\omega}{\kappa} \quad (3.7)$$

Alors que pour une bande de fréquences, le paquet d'énergie se propage avec vitesse dite vitesse de groupe, définit comme suite :

$$V_g = \frac{d\omega}{d\kappa} = V_{ph} + \frac{dV_{ph}}{d\kappa} \quad (3.8)$$

Tel qu'énoncé par Santamarina (2001), la vitesse de groupe constitue la limite de la vitesse de phase. En analysant les deux équations des deux différentes vitesses, on constate que pour un milieu non dispersif la vitesse de phase est indépendante de la fréquence et égale à vitesse de groupe puisque $\frac{dV_{ph}}{d\kappa} = 0$.

Thomson (1950) et Haskell (1953) ont étudié le problème de dispersion des ondes de Rayleigh dans un milieu composé de n couches de propriétés élastiques différentes (fig. 3.8). Ces auteurs ont établi les formules nécessaires pour évaluer la vitesse des ondes de Rayleigh à la surface libre d'un milieu stratifié. Ces équations sont utilisées pour la détermination d'un profil de vitesse des ondes de cisaillement à partir des vitesses des ondes de Rayleigh (Inversion).

3.3.5 Modes des ondes de Rayleigh

Jusqu'ici, l'onde de Rayleigh a été définie comme étant une onde de surface dont le mouvement est confiné dans une zone proche de la surface du milieu et dont l'amplitude s'atténue exponentiellement avec la profondeur. Cette définition a été établie en résolvant les équations d'ondes pour un milieu semi-infini homogène, élastique et isotrope et demeure donc valable lorsque l'onde en question appartient au mode fondamental des ondes de Rayleigh. Dans un milieu stratifié, l'onde de Rayleigh peut se propager selon un nombre ou une combinaison de modes. Le problème de propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu stratifié peut être formulé à l'aide de l'équation suivante (Aki et Richards, 1980) :

$$(\omega^2 A_1 - k^2 A_2 - k A_3 - A_4) c = 0 \quad (3.9)$$

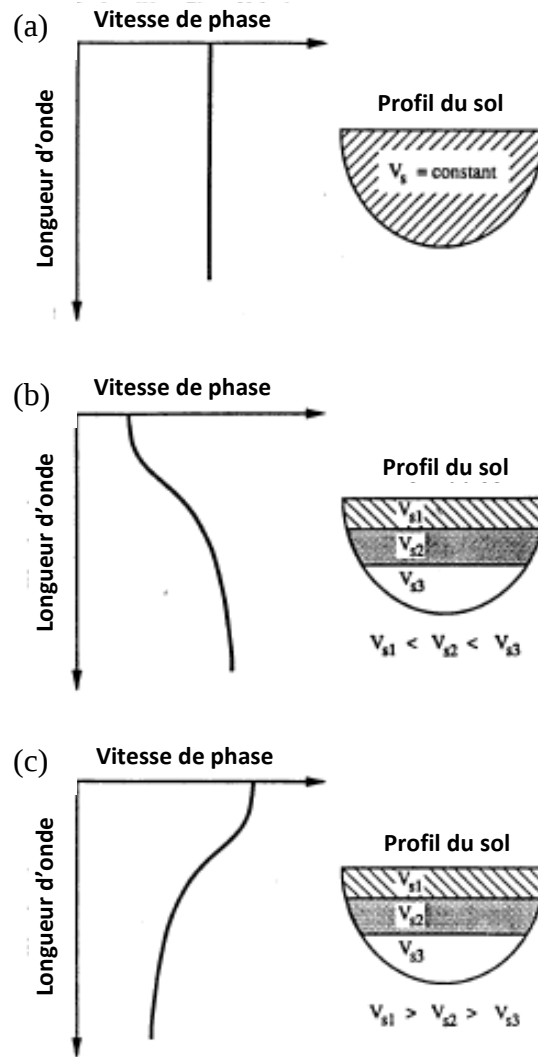


Figure 3.9. Exemples de courbe de dispersion dans un demi-espace homogène a) non dispersif, b) normalement dispersif et c) inversement dispersif (d'après Rix, 1988).

A_1 , A_2 , A_3 et A_4 sont les matrices de propriétés mécaniques et élastiques du milieu, ω est la fréquence angulaire, c est la vitesse de propagation d'une onde élastique donnée (solution de l'équation 3.9) et k est le nombre d'ondes ($k=\omega/c$). k étant une fonction de la vitesse (c), l'équation 3.10 définit un problème combiné de valeur propre (ω_i) et de vecteur propre (c_i) pour cette vitesse. La solution non triviale de c ne peut exister que seulement si k est un vecteur propre qui satisfait l'équation suivante :

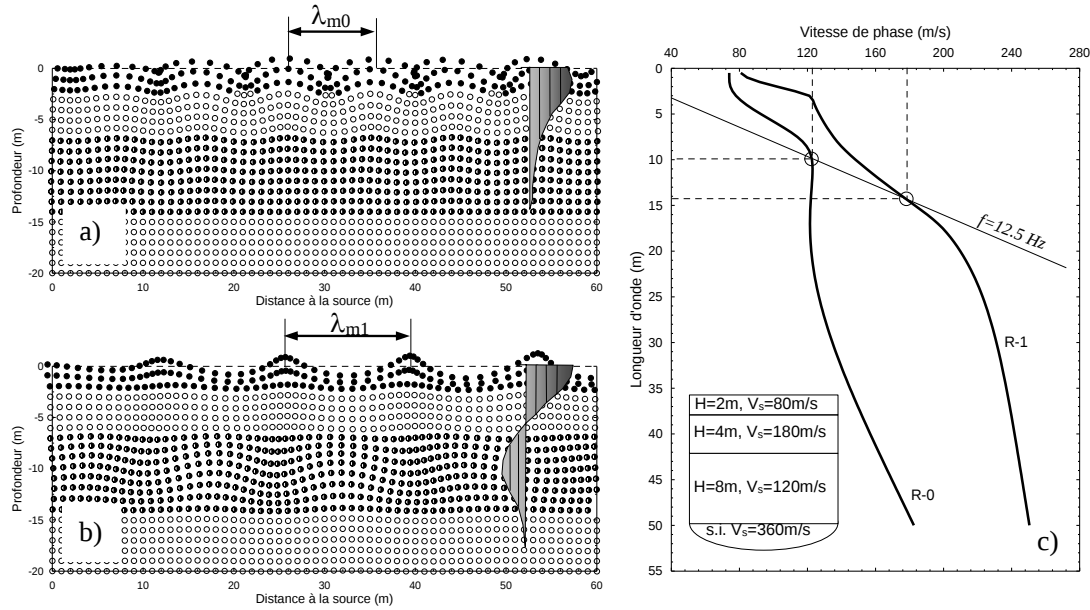


Figure 3.10. a) Propagation d'une onde de Rayleigh appartenant au mode fondamental ; b) premier mode; c) courbes de dispersion des deux premiers modes de Rayleigh (d'après Karray, 1999).

$$\Delta_R(c, \omega) = \left| \omega^2 A_1 - k^2 A_2 - A_3 k - A_4 \right| = 0 \quad (3.10)$$

$\Delta_R(c, \omega)$ est la fonction d'inversion et elle peut admettre pour une même fréquence ou pour une même longueur d'onde plusieurs valeurs de c . Il existe donc pour un profil de vitesse des ondes de cisaillement donné (p_f) un certain nombre de courbes de dispersion (c vs ω) qui peuvent annuler sa fonction d'inversion $\Delta_R(c, \omega)$. Ces courbes définissent les modes des ondes de Rayleigh. Le mode fondamental est défini par les vitesses de Rayleigh les plus faibles. La figure 3.10c présente les deux premiers modes des ondes de Rayleigh d'un système constitué de quatre couches de propriétés élastiques différentes. Les modes de propagation du mode fondamental et du premier mode des ondes de Rayleigh à une fréquence de 12,5 Hz sont présentés aux figures 3.10a et b. Ces résultats ont été obtenus à l'aide de simulations (FLAC). Il est possible de voir que contrairement au mode fondamental, l'amplitude du premier mode des ondes de Rayleigh ne s'atténue pas de manière exponentielle avec la profondeur. Ainsi, le premier mode des ondes de Rayleigh

permet de voir des déplacements importants à de grandes profondeurs et pénètre plus profondément que le mode fondamental.

3.3.6 Utilisation des ondes de surface pour la caractérisation des structures de chaussées.

L'utilisation des ondes de Rayleigh pour la caractérisation et la détermination des propriétés mécaniques des sols et des structures de chaussées a été initiée avant les années 1950 par la *German Society of Soil Mechanics*. Les études ont permis de développer la méthode connue sous le nom « Steady State » qui consiste à générer une onde de surface (Rayleigh) à l'aide d'une source de vibration constante et de mesurer le déphasage entre deux capteurs placés à des distances connues. Le test est peut être répété pour différentes fréquences afin de définir une courbe de dispersion expérimentale qui exprime la vitesse de phase (c ou V_{ph}) en fonction de la fréquence ou de la longueur d'onde (λ).

Cette courbe est ensuite transformée (de façon approximative) en un profil de vitesse des ondes de cisaillement (inversion) à l'aide de relations linéaires simples ($V_s = k_r V_{ph}$ et $z = k_z \lambda$, V_s est la vitesse des ondes de cisaillement et z est la profondeur). Plusieurs études théoriques et expérimentales réalisées dans les années 1950 et 1960 (Heukelom et Foster 1960; Jones 1962; Ballard 1964) ont montré des divergences dans le processus d'inversion, notamment en ce qui concerne le rapport entre la profondeur et la longueur d'onde (k_z) qui variait selon les auteurs de 0,33 à 0,5 (Heukelom et Foster 1960) et même jusqu'à des valeurs proches de 1,0 (Ballard 1964).

Au début des années 1980, les chercheurs se sont intéressés de nouveau aux méthodes de caractérisation basées sur la propagation des ondes de Rayleigh, et ce, grâce au développement à l'Université du Texas (Heisey 1982; Nazarian 1984; Nazarian et Stokoe 1985) de la méthode « spectral analysis of surface waves (SASW) ». Cette méthode se distinguait de la méthode « Steady State » par une plus grande rapidité d'exécution, puisque l'essai est réalisé en utilisant une source d'impact, ce qui permet de générer une large gamme de fréquences, et aussi par un processus d'inversion plus objective.

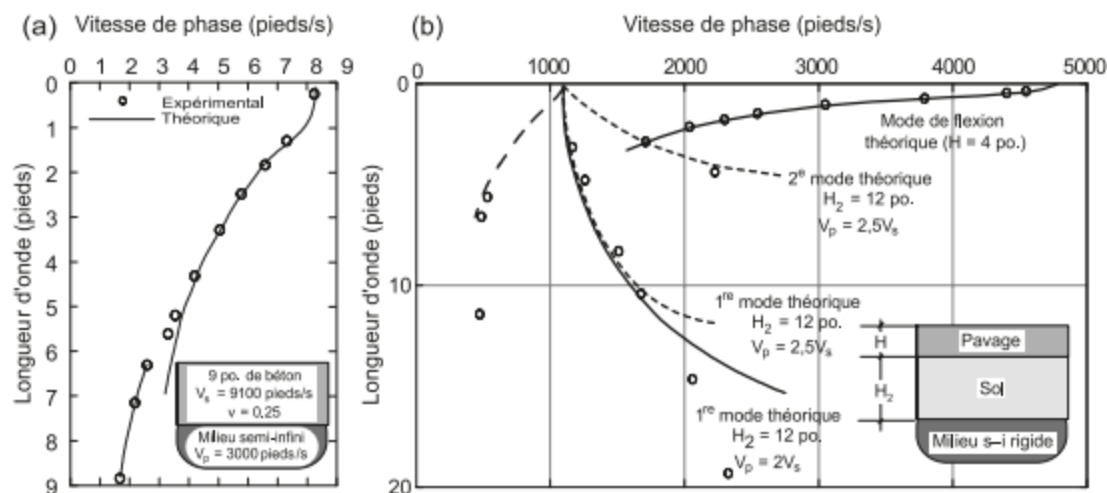


Figure 3.11. Mode de propagation des ondes de Rayleigh dans les structures de chaussées (basé sur Jones 1962). (a) Les différents modes de vibration des ondes de Rayleigh dans le cas d'un pavage en béton de 23 cm d'épaisseur et d'une vitesse de cisaillement V_s de 2750 m/s surmontant un milieu semi-infini d'une vitesse de compression V_p de 900 m/s. (b) Un cas encore plus complexe de la propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu constitué d'une couche de faible vitesse comprise entre deux couches rigides. (1 po. = 25,4 mm; 1 pied = 304,8 mm - Karray et al., 2009).

L'utilisation des ondes de surface dans les routes a été cependant très limitée. En effet, Jones (1962) a démontré théoriquement et expérimentalement que la propagation des ondes de Rayleigh en présence d'un pavé ou d'une couche en surface à vitesse plus élevée est différente de celui d'un dépôt de sol qui ne présente pas de contraste important de vitesse des ondes de cisaillement.

La figure 3.11a présente les différents modes de vibration des ondes de Rayleigh (Jones 1962) dans le cas d'un pavé en béton de 23 cm d'épaisseur et d'une vitesse de cisaillement V_s de 2750 m/s surmontant un milieu semi-infini d'une vitesse de compression V_p de 900 m/s. On remarque sur cette figure la présence de deux modes de vibration indépendants, soit celui de la couche rigide (mode de flexion) et celui du milieu semi-infini (branche ou mode inférieur). La figure 3.11b présente un cas encore plus complexe de la propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu constitué d'une couche de faible vitesse comprise entre deux couches rigides. Cette situation peut correspondre au cas d'un sol pris en sandwich entre un pavé et un ponceau. Dans ce genre de configuration, on se trouve selon

Jones (1962), en plus du mode de flexion et du mode inférieur, en présence d'autres modes de vibration intermédiaires.

Il est important de noter que ces modes sont générés lorsque l'excitation est produite au-dessus de la couche rigide (pavé). Au début des années 2000, Karray et Lefebvre (2009a) ont réussi à trouver une méthode qui permet de caractériser le sol en dessous d'un pavé par la génération des ondes de surface à l'aide d'une source placée à l'extérieur du pavé. Les capteurs sont cependant placés à la surface du pavé. Les études autant numériques qu'expérimentales ont permis d'ouvrir la voie à l'utilisation des méthodes basées sur les ondes de surface pour la détection d'anomalie en dessous des routes et autoroutes.

CHAPITRE 4 : ANALYSE ET COLLECTES DES SIGNAUX

4.1 Approche MMASW et approche proposée

L'analyse des signaux recueillis lors des investigations géotechniques réalisées à l'aide des ondes de surface nécessite l'utilisation d'algorithmes permettant d'en extraire l'information pertinente. En géophysique et plus particulièrement en génie civil, il est commun d'utiliser une approche multicauteurs (MASW) (ici le terme MASW désigne toute approche multicauteurs et ne désigne pas une méthode en particulier) afin d'enregistrer la variation de la vitesse ou de l'accélération le long de la surface d'un profil donné comme le montre la figure 4.1. Différentes méthodes (algorithmes) peuvent ensuite être utilisées afin d'analyser les variations de la vitesse ou de l'accélération à différentes positions. Parmi ces méthodes, l'approche utilisée dans la méthode MMASW ainsi que dans la méthode proposée par Kulesh et coll. (2005) consistent à faire glisser une fenêtre à différente vitesse le long des différents signaux.

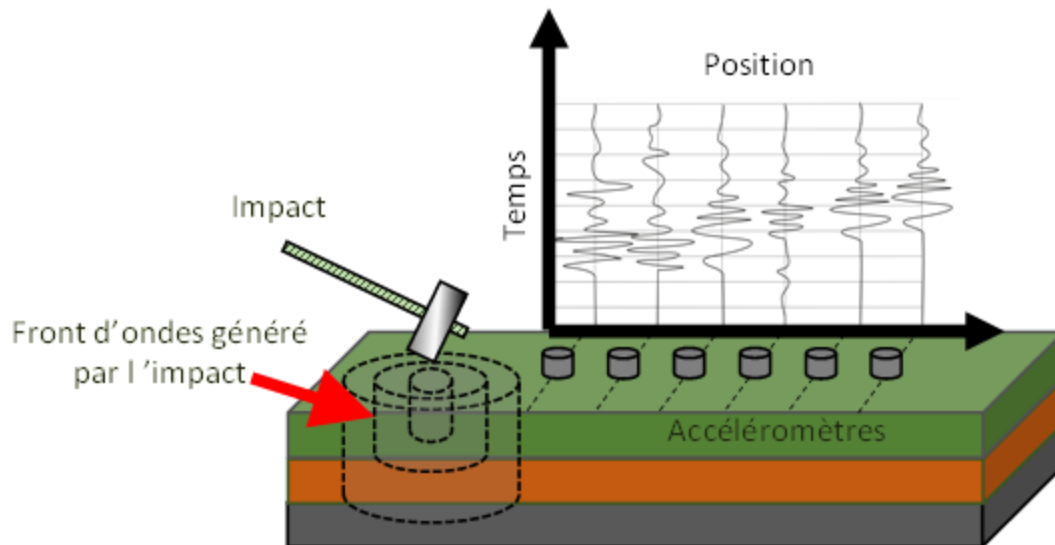


Figure 4.1. Schéma illustrant la configuration utilisée lors des essais MMASW.

Ce type de transformation est donc différent de la transformation *slant stack* parfois utilisée en géophysique lorsque plusieurs signaux sont analysés simultanément (McMechan et Yedlin, 1981). Pour ces méthodes, l'information contenue dans plusieurs signaux est simultanément utilisée afin de calculer les courbes de dispersions en vitesse de phase des différents modes de propagations des ondes de Rayleigh présent dans les signaux analysés. Une fois calculées, ces courbes de dispersions sont utilisées dans le processus d'inversion qui permet de connaître les propriétés dynamiques des différentes couches de sols contenues dans un dépôt. Le processus d'inversion est cependant difficile à automatiser, requière souvent un temps de calcul important en plus de nécessiter une certaine expérience afin d'en arriver à une solution optimale. Afin de remédier à ces problèmes, un des objectifs principaux de ce projet de recherche est donc de montrer qu'il est possible de détecter et de caractériser des anomalies dans un profil de sol en utilisant une approche qui ne nécessite pas d'avoir recours au processus d'inversion. Les travaux réalisés par Karray et Lefebvre (2009) ont cependant déjà permis d'établir que la variation de la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh en fonction de la longueur d'onde peut s'avérer un outil utile pour la détection d'anomalies dans le sol.

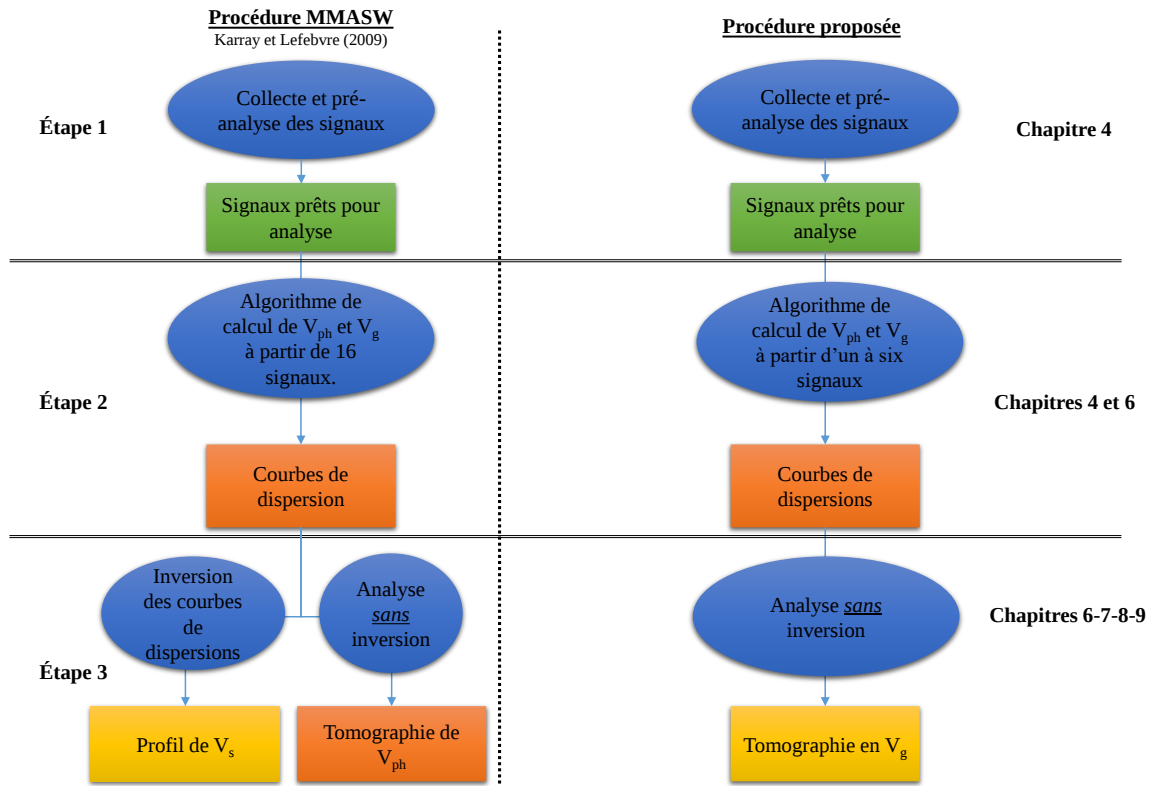


Figure 4.2. Schémas illustrant la procédure utilisée lors des essais MMASW (gauche) et celle qui sera développée à l'aide de nouvelles recherches (droite). Les rectangles indiquent des résultats obtenus à l'aide d'opérations décrites dans les ellipses.

Or, la méthode d'analyse utilisée dans ces travaux requiert l'analyse simultanée de 16 différents signaux afin d'en arriver à distinguer et à séparer de façon non ambiguë les différents modes de propagation présents dans ces signaux. Bien que cette méthode ait prouvé son efficacité pour diverses applications (Karray, 1999; Karray et Lefebvre 2009a; Karray et coll., 2010), l'utilisation simultanée de nombreux signaux lors de l'analyse peut faire en sorte qu'une anomalie de taille restreinte par rapport à la distance couverte par les 16 capteurs ne soit pas détectable. C'est pourquoi la méthode d'analyse des signaux qui sera développée au cours de ce projet de recherche visera à n'utiliser qu'un nombre minimum de capteurs pour le calcul de la vitesse des ondes de Rayleigh. Bien qu'il soit probable que la méthode développée ne permette pas d'identifier et de séparer les différents modes avec autant de précision que la méthode MMASW, les signaux enregistrés au-dessus d'un pont représentent un cas spécial où le mode fondamental des ondes de

Rayleigh tend à dominer les signaux enregistrés dans la plage de fréquences qui sera utilisée pour la détection d'anomalies (chapitres 6-7-8). Ainsi, il est possible d'émettre l'hypothèse que la perte de résolution en termes d'identification et de séparation des modes engendrée par l'utilisation d'un nombre moindre de capteurs sera compensée par la possible augmentation de la précision de la localisation des anomalies. Un autre objectif de ce projet de recherche sera d'arriver à développer une méthode d'inspection permettant la détection rapide d'anomalie, c'est en dire qui permet de minimiser le temps requis pour l'acquisition des données ainsi que pour leur analyse. Cela sera accompli en modifiant la procédure de collecte des signaux (chapitre 4, section 4.6) ainsi que la procédure d'analyse des signaux (chapitre 4, section 4.4 et 4.5). La figure 4.2 illustre les différentes étapes du processus utilisé pour la détection de cavités lors des essais MMASW ainsi que celui que nous visons à développer lors de ce projet de recherche.

Comme le montre la figure 4.2, le protocole d'inspection actuellement utilisé lors des essais MMASW ainsi que celui que nous visons à développer peut-être divisé en 3 étapes. La première étape consiste à réaliser la collecte des signaux sur le terrain (section 2.4.1, chapitre 2) ainsi qu'à les préparer pour l'analyse temps-fréquence (section 4.2). En ce qui concerne la première étape, les deux méthodes sont similaires bien que l'efficacité d'une nouvelle procédure de collecte des signaux sera évaluée lors des travaux futurs (chapitre 7). L'objectif de la deuxième étape de l'analyse est le même pour les 2 méthodes, c'est-à-dire le calcul des courbes de dispersions des ondes de Rayleigh. Cependant, la méthode proposée a pour objectif d'utiliser un nombre limité de capteurs pour le calcul de ces courbes. Pour la troisième étape de l'analyse, la méthode proposée a pour objectif de ne pas avoir recours au processus d'inversion afin d'en arriver à faire la détection d'une anomalie dans le sol. Cette méthode sera donc basée sur les variations des vitesses de propagations des ondes de Rayleigh qui seront présentées sous différents formats (chapitres 6-7).

Les travaux de recherches réalisés par le groupe de recherche en géotechnique de l'Université de Sherbrooke (UdeS) ont déjà permis de démontrer qu'une approche similaire à celle illustrée à droite de la figure 3.2 peut être utilisée afin de détecter des anomalies à la surface d'une structure de béton enfouie dans le sol (Tremblay et Karray, 2014;

Tremblay et coll., 2017; Tremblay, 2017). Cependant, la problématique soulevée pour la détection d'anomalies dans le remblai recouvrant les ponceaux est différente de celle soulevée pour la détection d'anomalie à la surface d'une structure de béton souterraine. En effet, les structures de bétons investiguées dans Tremblay (2017) sont rectangulaires et sont enfouies sous une couche de sol homogène. À l'instar de ces structures, les ponceaux du MTQ peuvent avoir différentes géométries et être situés sous un sol composé de différentes couches. Aussi, le type d'anomalie présent à la surface des structures de béton souterraines diffère probablement du type d'anomalie retrouvé autour des ponceaux. Ces différences font en sorte que les algorithmes utilisés pour l'investigation de structures de béton souterraines devront être modifiés afin de prendre en considération ces différences.

Une partie importante des travaux déjà effectués ont visé à améliorer l'approche permettant d'analyser les signaux de façon à séparer adéquatement les différentes composantes du signal présentes dans le plan temps-fréquence (TF). Bien qu'il existe une multitude de techniques permettant d'obtenir une représentation dans le domaine TF d'un signal échantillonné dans le domaine temporel, chaque technique possède des propriétés physiques et mathématiques la rendant plus ou moins adaptée pour certaines applications. La section 4.4 de ce document n'a pas pour but de faire une révision exhaustive des multiples techniques de traitement des signaux disponibles, mais de présenter les techniques qui ont jusqu'à maintenant été utilisées dans cette étude ainsi que celles qui pourraient être utilisées dans le futur en référant le lecteur vers la littérature pour de plus amples informations.

4.2 Préparation des signaux avant analyse dans le plan temps fréquence

Avant de commencer l'analyse d'un signal correctement échantillonné, il peut s'avérer important d'y apporter certaines modifications qui permettront une meilleure analyse de ce signal :

- 1- Enlever les tendances 'artificielles' : la présence d'une tendance de type At^n $n \geq 1$ dans un signal analysé peut sérieusement en affecter son contenu fréquentiel et il est souvent bénéfique de les enlever avant l'analyse.

- 2- Filtrer le signal : lors de l'analyse, nous ne sommes généralement intéressés que par une gamme restreinte de fréquences $[f_{\min}, f_{\max}]$. Cependant, les fréquences se trouvant en dehors de la gamme de fréquences utile peuvent affecter la résolution dans le plan TF des fréquences se trouvant à l'intérieur de cette gamme.
- 3- Choix du pas fréquentiel : Bien qu'en théorie la résolution fréquentielle d'une distribution temps-fréquence (TFD) dépende de la fenêtre/ondelette utilisée, la discrétisation fréquentielle des signaux fait en sorte qu'une incertitude numérique peut s'introduire dans la TFD. Δf doit donc être choisi de façon à être un peu plus petit que la limite théorique imposée par la fenêtre/ondelette utilisée afin d'obtenir la TFD.
- 4- Choix du remplissage (*padding*) : la période d'enregistrement T du signal analysé peut faire en sorte d'introduire des distorsions dans le plan temporel de la TFD près des frontières (près de $t = 0$ et près de $t = T$). Afin d'éviter ces distorsions, il est possible d'appliquer différentes techniques de remplissage au signal.
- 5- Signal analytique : l'utilisation de la version analytique du signal permet généralement d'obtenir une TFD plus précise.

La modification/correction des signaux en fonction des éléments mentionnés dans cette section permettra d'augmenter la qualité des TFD pour la majorité des techniques qui seront présentés dans ce chapitre. Pour plus de détails ainsi que de nombreux exemples illustrant les techniques de prétraitements présentés dans cette section, le lecteur est référé aux sections supplémentaires d'Iatsenko et coll. (2015a).

4.3 Notions importantes : Fréquences instantanées, Délai de groupe

Les concepts de fréquences instantanées (FI) et de délai de groupe (DG) sont fondamentaux dans le domaine du traitement de signal (Cohen, 1995; Huang et coll. 1998; Huang et coll. 2009). Cependant, la définition ainsi que la validité de ces concepts ne font pas l'unanimité à travers la communauté scientifique (Boashash, 1992a, b, c; Huang et coll, 2009). Dans ce document, nous assumerons néanmoins la validité de ces concepts sans en débattre davantage. La FI d'un signal analytique monochromatique $z(t)$ à un temps t peut être calculée de la manière suivante (Ville, 1948; Papoulis 1974):

$$FI_z(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \arg[z(t)] \quad (4.1)$$

Tandis que le GD à une fréquence (f) se calcule de la manière suivante :

$$DG_z(f) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial f} \arg[Z(f)] \quad (4.2)$$

Où $\arg[Z(f)]$ est le spectre de phase. Les équations 4.1 et 4.2 ne permettent cependant le calcul de la FI et du DG que pour un signal n'ayant pas plus d'une fréquence à la fois à un temps donné ou lorsqu'une fréquence ne se trouve qu'autour d'un seul temps. Ces restrictions font donc en sorte que l'utilisation de ces concepts dans ce projet de recherche doit se faire de manière différente comme nous le montrerons dans la section 4.4.

4.4 Distributions Temps-Fréquences

Parmi les techniques pouvant être utilisées pour l'analyse des signaux dans le plan TF, notons celles dites paramétriques et celles dites non paramétriques (aucune hypothèse sur la structure du signal avant l'analyse). L'utilisation des techniques paramétriques en génie civil et en géophysique est cependant moins répandue notamment à cause de leur complexité, de leur plus long temps de calcul et puisque leur efficacité pour l'analyse de signaux sismiques par rapport aux méthodes non paramétriques reste à démontrer (Tary et coll. 2014a,b). Ces méthodes sont cependant susceptibles de diminuer l'étalement de chacune des composantes d'un signal présentes dans le plan TF puisque la résolution temporelle de ces transformations n'est pas directement liée à la résolution spectrale (Marple, 1982; Quirk et Liu, 1983). La méthode des filtres de Kalman est un exemple de méthodes paramétriques. Pour une revue plus détaillée des méthodes paramétriques pour l'analyse de signaux sismiques, le lecteur est référé aux travaux de Tary et coll. (2014a,b). Les techniques non paramétriques peuvent être (grossièrement) divisées en 2 catégories. Ceux linéaires et ceux non linéaires. La section 4.4.1 viendra présenter certaines méthodes de traitement des signaux linéaires tandis que la section 4.4.2 viendra présenter certaines techniques de traitement des signaux non linéaires. La section 4.4.3 viendra par la suite aborder certaines techniques pouvant être utilisées afin de s'assurer d'obtenir une

distribution optimale de chacune des composantes du signal dans le plan TF. La figure 4.3a montre la représentation temporelle d'un signal dont l'équation est la suivante :

$$x(t) = \sin(2\pi f_1 t + \theta_1) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\tau_1)^2}{2\sigma^2}} + \sin(2\pi f_2 t + \theta_2) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\tau_2)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.3)$$

L'équation 4.3 montre que le signal $x(t)$ est formé de deux composantes similaires. La première composante est formée d'une sinusoïde ayant une fréquence d'oscillation de f_1 étant restreinte dans le temps par une fenêtre gaussienne centrée au temps τ_1 tandis que la deuxième composante est formée d'une sinusoïde ayant une fréquence d'oscillation de f_2 étant restreinte dans le temps par une fenêtre gaussienne centrée au temps τ_2 . L'analyse du signal dans le domaine TF permet de bien reconnaître chacune des deux composantes du signal $x(t)$ (Fig. 4.3b).

Ainsi, à l'aide de la figure 4.3b, on remarque que le DG et la FI de chaque composante correspond respectivement aux temps τ_1 et τ_2 et aux fréquences f_1 et f_2 de chacune des composantes du signal $x(t)$.

Dans le cadre de ce projet de recherche, le DG est important puisqu'il permet le calcul de la vitesse de groupe qui est un paramètre fondamental dans l'analyse de la propagation des ondes élastiques. En effet, lors de leur propagation dans un milieu dispersif tel qu'un dépôt de sol, les ondes élastiques peuvent être définies en termes de 2 vitesses différentes : la vitesse de phase (V_{ph}) et la vitesse de groupe (V_g).

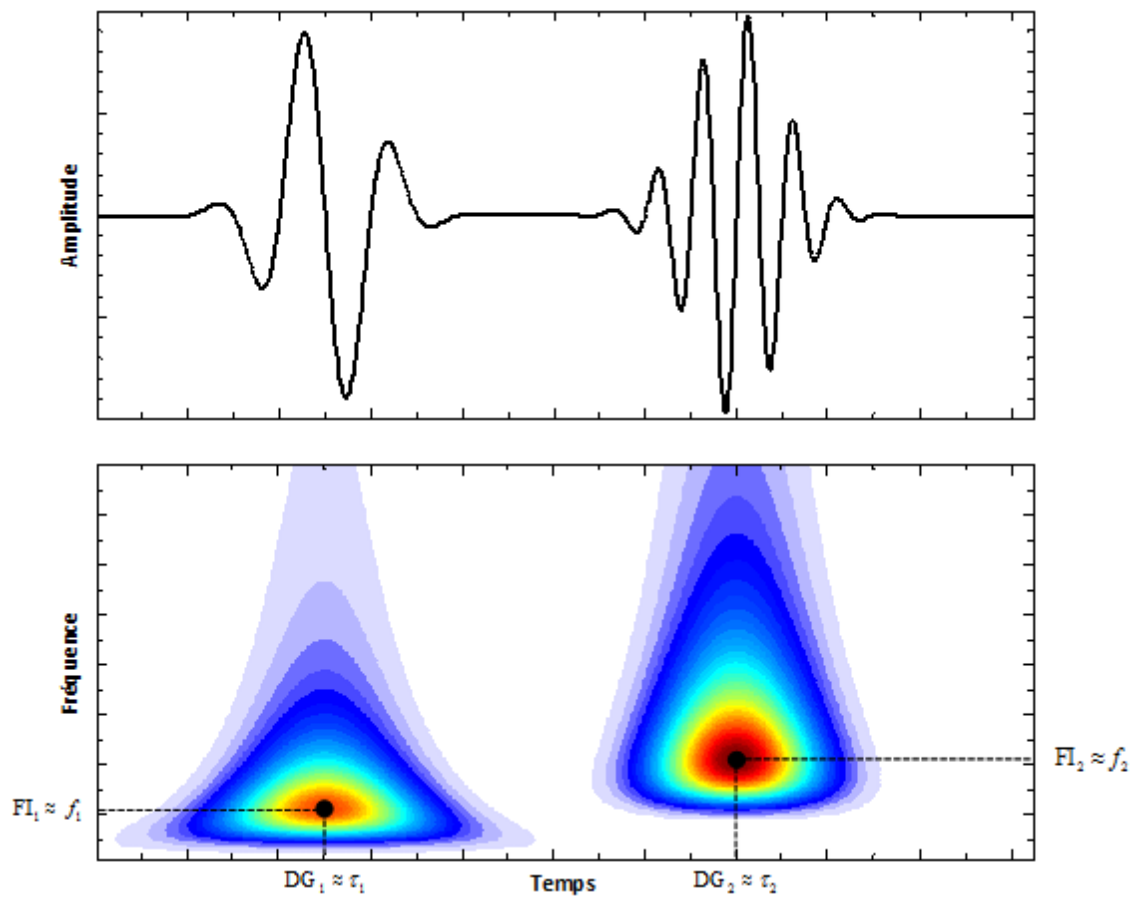


Figure 4.3. (a) Représentation temporelle d'un signal composé de deux composantes. (b) Représentation dans le plan temps-fréquence du même signal. Cette représentation permet de connaître le délai de groupe (DG) et la fréquence instantanée (FI) de chacune des deux composantes.

La vitesse de groupe peut également être appelée de propagation de l'énergie et ce concept est essentiel lors de l'analyse de plusieurs types de phénomènes (Tolstoy, 1973). Dans le but d'illustrer les concepts de V_g et de V_{ph} , imaginons que le signal $x(t)$ (fig. 4.4a) correspond à la propagation de deux groupes d'ondes distincts mesurés à une distance x_1 de sa source d'émission tandis que le signal $y(t)$ (fig. 4.4b) correspond à la propagation des mêmes groupes d'ondes, mais mesurés à une plus grande distance de la source soit à une distance de $x_1 + \Delta x$. Le signal $y(t)$ peut être formulé de la manière suivante :

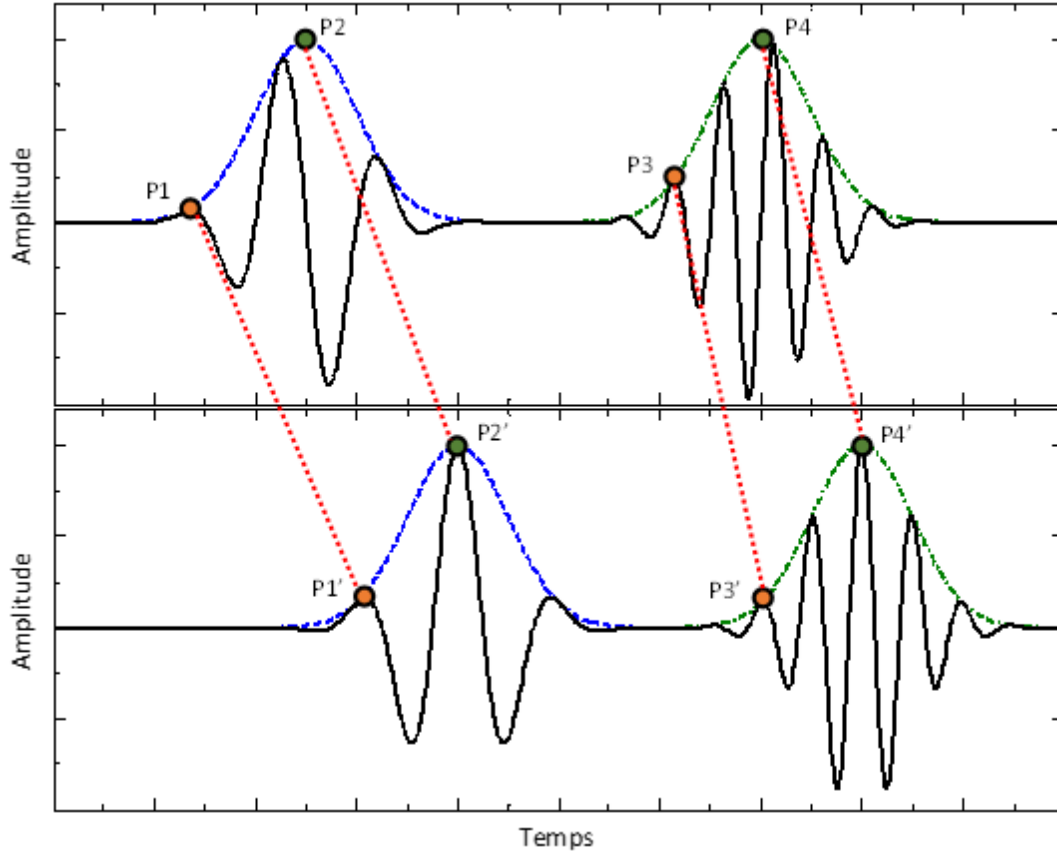


Figure 4.4. Représentation de deux signaux étant chacun formé des deux mêmes composantes. (a) Signal et (b) signal. La ligne pointillée bleue et la ligne pointillée verte représentent les enveloppes des différentes composantes des signaux se propageant selon la vitesse de groupe.

$$y(t) = \sin(2\pi f_1 t + \theta_1 + \Delta\theta_1) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{-(t-\tau_1-\Delta\tau_1)^2}{2\sigma^2}} + \sin(2\pi f_2 t + \theta_2 + \Delta\theta_2) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{-(t-\tau_2-\Delta\tau_2)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.4)$$

À l'aide des équations 4.3 et 4.4, l'on remarque que les composantes du signal $y(t)$ sont les mêmes hormis les valeurs $\Delta\theta_{1,2}$ et $\Delta\tau_{1,2}$. et ce sont ces valeurs qui permettent le calcul de V_{ph} et V_g :

$$V_{ph}(f_{1,2}) = \frac{\Delta x \times f_{1,2}}{\Delta\theta_{1,2}} \quad (4.5)$$

$$V_g(f_{1,2}) = \frac{\Delta x}{\Delta\tau_{1,2}} \quad (4.6)$$

Visuellement, la figure 4.4 montre comment V_{ph} et V_g représentent des vitesses différentes. L'enveloppe de chacune des composantes des signaux. Les points verts (P2-P2' et P4-P4') représentent le temps où le maximum de chaque enveloppe est détecté tandis que les points orange (P1-P1' et P3-P3') correspondent à la phase détectée de chaque composante. La vitesse de groupe se calcule à l'aide de la différence de temps entre les points P2-P2' et les points P4-P4' tandis que la vitesse de phase se calcule à l'aide de la différence de temps entre les points P1-P1' et les points P3-P3'.

Les points P2-P4 de la figure 4.4 correspondent respectivement aux points DG₁ et DG₂ de la figure 4.3 et c'est pourquoi les représentations TF permettent le calcul de V_g . Le calcul de V_{ph} est cependant différent et requière l'évaluation de la phase des différentes composantes du signal. Cette information n'est cependant disponible que lorsque certaines techniques d'analyse des signaux sont utilisées afin d'obtenir la DTF.

4.4.1 Distributions linéaires

L'équation 4.7 désigne qu'un signal $x(t)$ peut être décomposé en une somme de composantes oscillatoires dans le temps $x_n(t)$ auquel peut s'ajouter du bruit et des erreurs de mesure $e(t)$ (Thakur et coll. 2013) :

$$x(t) = \sum_{n=1}^N x_n(t) + e(t) \text{ avec } x_n(t) = A_n(t) \cos(2\pi\phi_n(t)) \quad (4.7)$$

Prenons par exemple le cas de la transformée de Fourier. Une hypothèse utilisée lors de la transformation de Fourier (FT) est qu'un signal peut être décomposé en une série de termes oscillatoires de fréquences et d'amplitudes constantes (ou cosinus) étant orthogonaux entre eux. Cette représentation suggère que chacune des composantes possède une amplitude fixe qui perdure dans le temps. Bien que mathématiquement valide, physiquement, cette représentation peut cependant n'avoir que peu de valeur. Afin d'ajouter une dimension 'locale' à la FT, il est possible de réaliser une convolution temporelle entre le signal analysé et une fenêtre ayant une durée temporelle (et fréquentielle) fixe plus courte que le signal.

Ce type de transformation est appelé transformé de Fourier courte (STFT) (Hlawatsch et Boudreaux-Bartels, 1992):

$$\text{STFT}_x^h(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h^*(\tau - t) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \times e^{i2\pi f t/2} \quad (4.8)$$

Où $\text{STFT}_x^h(t, f)$ sont les coefficients au temps t et à la fréquence f du signal $x(\tau)$ analysé par une fenêtre $h(t)$ et le $*$ dénote le conjugué complexe. Puisque la fenêtre $h(\tau - t)$ a un support temporel limité autour de t , la STFT est dite ‘locale’ puisque l’amplitude du signal localisée loin de t est affaiblie par rapport à celle située près de t . L’équation 4.8 permet ainsi d’obtenir une distribution linéaire (DL). Cependant, l’information contenue dans la STFT est souvent analysée dans le domaine TF à l’aide d’une distribution énergétique appelée spectrogramme. Pour les DL comme la STFT, la fenêtre $h(t)$ (équation. 4.8) utilisée lors de l’analyse d’un signal $x(t)$ agit sur ce signal comme un instrument de mesure permettant de connaître certaines des caractéristiques importantes de ce signal. Cette fenêtre se doit donc d’être bien adaptée au signal analysé afin d’en permettre une analyse optimale en termes de résolution temporelle et fréquentielle. Parmi les fenêtres souvent utilisées afin de réaliser le STFT, la fenêtre gaussienne est certainement digne de mentions dues à ses propriétés lui permettant de maximiser conjointement la résolution temps-fréquence d’une STFT dont la résolution fréquentielle et temporelle est contrôlée par le paramètre σ dans l’équation 4.9 (Grochenig, 2001; Mallat, 2008) :

$$h(t, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.9)$$

Un des inconvénients majeurs de la STFT provient du principe d’incertitude (Heisenberg/Gabor) voulant qu’une fenêtre ne puisse avoir un support arbitrairement court dans le temps tout en conservant un support arbitrairement court dans le domaine fréquentiel (Papoulis, 1974).

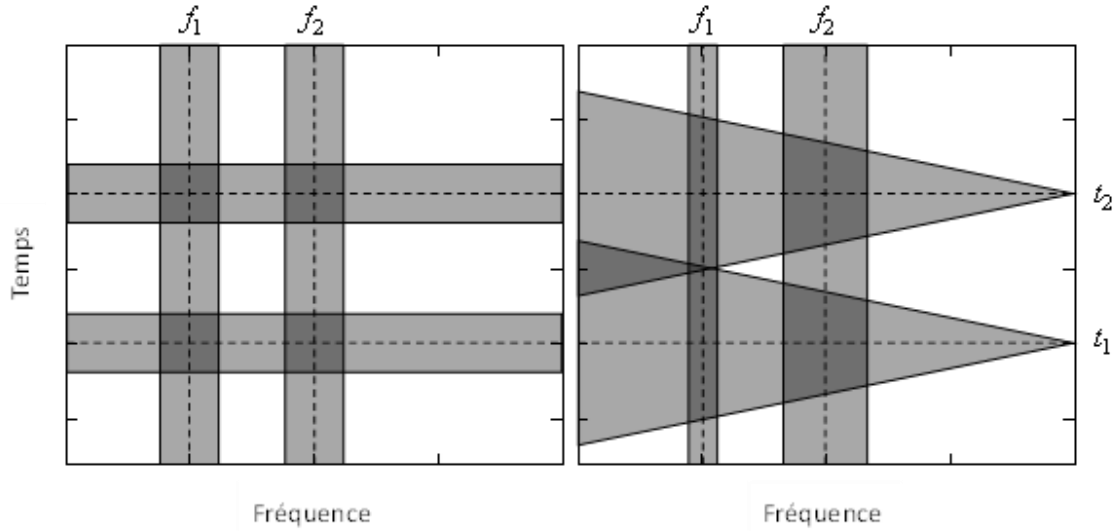


Figure 4.5. Croquis schématique de la résolution TF de la (a) STFT et de la (b) WT pour le signal: $x(t) = \delta(t - t_1) + \delta(t - t_2) + \sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t)$ La résolution TF de la STFT est indépendante de la fréquence (f) tandis que la résolution temporelle de la WT est meilleure à basse fréquence. D'après: Hlawatsch and Boudreaux-Bartels, 1992.

La fenêtre gaussienne (équation. 4.9) est cependant le seul type de fenêtre pour laquelle la relation d'incertitude d'Heisenberg/Gabor est minimale ($\Delta t \Delta f = 1/(4\pi)$) (Boahash, 2015). Bien que le principe d'incertitude ne s'applique pas uniquement à la STFT, ce principe peut s'avérer considérablement restrictif étant donné le type de fenêtre de résolution fixe utilisée pour la STFT.

Les transformations par ondelette (WT) permettent de résoudre en parti le problème de résolution temps-fréquence de la STFT. En effet, contrairement à la STFT qui possède un support fixe dans le temps et la fréquence, les fenêtres utilisées lors de la WT permettent d'obtenir un support variable en temps et en fréquence (Fig. 4.5). Bien que la WT ait originalement été conçue comme une distribution temps-échelle (TÉ), il est possible, en assumant que la FT de $h^*(t)$ est essentiellement concentrée autour de la fréquence f_0 , de formuler la WT de la manière suivante :

$$\text{WT}_x^h(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \sqrt{\left| \frac{f}{f_0} \right|} h^*\left(\frac{f}{f_0}(\tau - t)\right) d\tau \quad (4.10)$$

Bien que la WT soit elle aussi soumise au principe d'incertitude, l'utilisation d'une fenêtre passe bande ayant une bande passante proportionnelle à f permet de changer la résolution de la WT dans le plan TF, contrairement à la STFT qui possède une bande passante fixe dans le plan TF. La WT peut aussi être vue comme une transformation ayant un facteur Q (fréquence/largeur de bande) constant et donc indépendant de la fréquence (Mallat, 2008). Pour une révision détaillée des propriétés et applications de la WT, le lecteur est référé aux travaux de Rio (1991) et de Mallat (2008). Tout comme la STFT qui est souvent interprétée sous forme de spectrogramme, la WT est souvent interprétée dans le domaine TF sous forme d'échellogramme, ce qui entraîne là aussi la perte de certaines propriétés désirables de la DL.

La transformation de Stockwell (ST) offre une alternative intéressante à la WT et la STFT. Elle fut introduite par Stockwell et coll. (1996) dans le but d'analyser des signaux provenant de séismogrammes.

$$ST_x^h(t, f, \sigma) = \int_{\tau} x(\tau) h(t - \tau, \sigma) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (4.11)$$

Dans sa formulation originale, la fenêtre $h(t, \sigma)$ de l'équation 4.11 prend la forme d'une gaussienne (équation. 4.9) ayant une résolution variant en fonction de $\sigma = 1/|f|$. La ST est rapidement devenue populaire en géophysique puisqu'elle représente un 'mélange' entre la WT et la STFT. La ST est unique en ce sens où elle permet une résolution variable dans le plan TF (contrairement à la STFT) tout en maintenant un lien direct avec le spectre de Fourier (contrairement à la WT). Cette propriété est particulièrement utile lorsqu'il est par exemple question de déterminer la vitesse de phase de certaines ondes comme c'est le cas dans ce projet de recherche. La résolution variable de la ST est obtenue, un peu comme avec la WT, en multipliant une ondelette mère, définie comme une gaussienne, par un facteur de déphasage. L'ondelette mère de la ST ne respecte cependant pas le critère d'une moyenne de 0 et ne peut donc pas être considérée comme une WT. Puisqu'il existe un lien direct entre la ST et le spectre de Fourier, la ST dans le plan TF est facilement réversible et permet aisément de passer du domaine temporel vers le domaine TF et vice-versa. Il est

aussi possible de modifier l'ondelette mère de la ST de façon à la rendre plus adaptée aux signaux analysés (Assous et Boashash, 2012).

La STFT, la ST et la WT sont des transformations 'facilement' réversibles permettant de passer du plan TF vers le plan temporel, ce qui explique, en partie, leur popularité pour diverses applications (Hlawatsch et Boudreaux-Bartels, 1992). En effet, les DL sont souvent préférés aux DQ puisque l'extraction et la reconstruction des différentes composantes d'un signal peuvent s'avérer difficiles lorsque certaines DQ sont utilisées (Iatsenko et coll, 2015c).

4.4.2 Distributions quadratiques

Lors de l'analyse d'un signal, il est préférable d'utiliser une fenêtre adaptée aux propriétés de ce signal. En ce sens, l'utilisation d'une version inversée dans le temps du signal lui-même comme fenêtre ($h(t) = x(-t)$) est donc optimum puisque, logiquement, aucune fenêtre n'est plus 'semblable' au signal que le signal lui-même (Flandrin et coll., 2003). Cette approche suggère que les distributions de Wigner (WD) et de Wigner Ville (WVD) sont particulièrement bien adaptées à des signaux complexes à ondulation fréquentielle linéaire (LFM). En effet, la WVD possède un grand nombre de propriétés mathématiques la rendant attrayante pour une foule d'applications (Cohen, 1995; Flandrin, 1999). La WVD possède cependant d'importants désavantages notamment ceux de ne pas être positif dans tout le plan TF, de présenter de nombreux termes interférentiels (figure 4.6b), et de représenter une distribution qui n'est pas exacte pour des signaux à ondulation fréquentielle non linéaire (Boashash, 2015). Dans cette section, nous nous attarderons d'avantages sur 2 manières de présenter les distributions quadratiques (DQ) soient dans le domaine 'énergétique' et dans le domaine 'corrélatif'. La WVD et la fonction d'ambiguïté (AF) sont respectivement des exemples d'interprétation 'énergétique' et d'interprétation 'corrélative' d'un signal (Hlawatsch et Boudreaux-Bartels, 1992).

Les DQ de la classe de Cohen peuvent être interprétées comme différentes versions filtrées dans le domaine TF de la WD et peuvent être exprimées de la manière suivante (Flandrin et Gonçalves, 1996) :

$$T_x(t, f) = \int_{t'} \int_{f'} \left(\psi_T(t-t', f-f') \int_{\tau} \left[z(t+\frac{\tau}{2}) z^*(t+\frac{\tau}{2}) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \right] \right) dt' df' \quad (4.12)$$

Chaque membre de la classe de Cohen est associé à une seule et unique fonction $\psi_T(t, f)$ qui est indépendante du signal $x(t)$ ($z(t)$ est sa version analytique). Il apparaît grâce à l'équation 4.12 que la convolution entre $\psi_T(t, f)$ et la WVD causera un lissage de la WVD pouvant permettre de réduire significativement les termes interférentiels introduits par la WVD. L'équation 4.12 montre aussi que pour la WVD, $\psi_T(t-t', f-f') = 1$. Il est également intéressant de noter que le spectrogramme fait partie de la classe de Cohen tandis que l'échellogramme fait plutôt parti de la classe affine (Flandrin et Gonçalves, 1996). La façon dont une fenêtre de lissage 'opère' sur la WVD s'explique plus facilement à l'aide de la fonction d'ambiguïté (AF) (Figure. 5.7). Il existe une dualité entre la WVD et la AF qui peut être exprimée à l'aide de la FT :

$$AF(\tau, \nu) = \int_t \int_f \left(\int_{\tau} \left[z(t+\frac{\tau}{2}) z^*(t+\frac{\tau}{2}) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \right] e^{-i2\pi(\nu t - \tau f)} \right) dt df \quad (4.13)$$

Afin de mieux comprendre comment un signal peut être décrit par sa fonction d'ambiguïté, considérons l'exemple suivant similaire à celui utilisé par Baraniuk et Jones (1993) :

$$x_1(t) = e^{-a(t-T)^2} + e^{-a(t+T)^2} \text{ et } x_2(t) = e^{-a(t+T)^2 + ic(t+T)^2 - i\omega_1(t+T)} + e^{-a(t-T)^2 + ic(t-T)^2 - i\omega_2(t-T)}$$

Où $x_1(t)$ est un signal formé de 2 gaussiennes avec $a=0.25$ et $T=5$ et $x_2(t)$ est un signal formé de deux *chirps* avec $a=0.004$, $c=0.025$, $T=5$, $\omega_1=2$ et $\omega_2=2.5$. La figure 5.7a,b montre la forme des deux signaux dans le domaine temporel tandis que la figure 5.7c,d montre leur AF.

Dans le domaine de la AF, les termes interférentiels apparaissent à une certaine distance de l'origine du plan (τ, ν) tandis que les 'bons' termes, ou termes du signal apparaissent toujours centrés autour de l'origine. Pour les 2 signaux, il apparaît clair à l'aide de la figure

4.7c-d que la fenêtre de lissage optimum n'a pas la même géométrie dans le plan AF. L'étude de la AF dans le plan (τ, ν) permet donc de mieux comprendre pourquoi certaines fonctions $\psi_T(t, f)$ sont plus efficaces que d'autres et il existe une classe importante de méthodes de traitement des signaux étant basée sur la AF (Bashash, Chapitre 5, 2015). Parmi les fonctions de lissages les plus populaires, notons la *Smoothed Pseudo Wigner Ville Distribution* (SPWVD) qui permet un ajustement indépendant du lissage dans le plan fréquentiel et le plan temporel (Hlawatsch et Flandrin, 1992).

Cette propriété lui confère un avantage important par rapport au spectrogramme (et d'une certaine manière face à l'échellogramme) et à bien des transformations quadratiques que ne permettent pas ce type d'ajustement et qui causeront donc un lissage souvent inadéquat du signal dans le domaine TF.

La figure 4.6 montre comment la SPWVD et sa réallocation permettent d'améliorer la WVD d'un signal sismique synthétique calculé à l'aide de la méthode de la matrice de propagation. Bien que le lissage dans les plans TF permette une réduction de l'énergie des termes interférentiels, il entraîne en contrepartie l'étalement de l'énergie de chacune des composantes du signal dans le plan TF. Aussi, comme le montre la figure 4.6, bien qu'un lissage important permet de bien localiser les composantes en dessous de 40 Hz, au-delà de cette fréquence, un lissage moins important est nécessaire afin d'identifier les 2 composantes. L'exemple de la figure 4.6 permet d'illustrer que puisque les signaux analysés dans ce projet de recherche sont composés de multiples composantes (modes) pouvant varier de façon aléatoire dans le plan TF, leur AF aura également une géométrie variable. Cependant, il est primordial de ne pas oublier que la SPWVD, tout comme plusieurs autres méthodes de lissage d'une DQ (*Choi William Distribution*, *Cone Kernel Distribution*, etc.) agissent de la même manière sur l'ensemble du signal ce qui ne permet donc pas nécessairement de tenir compte des variations locales du signal.

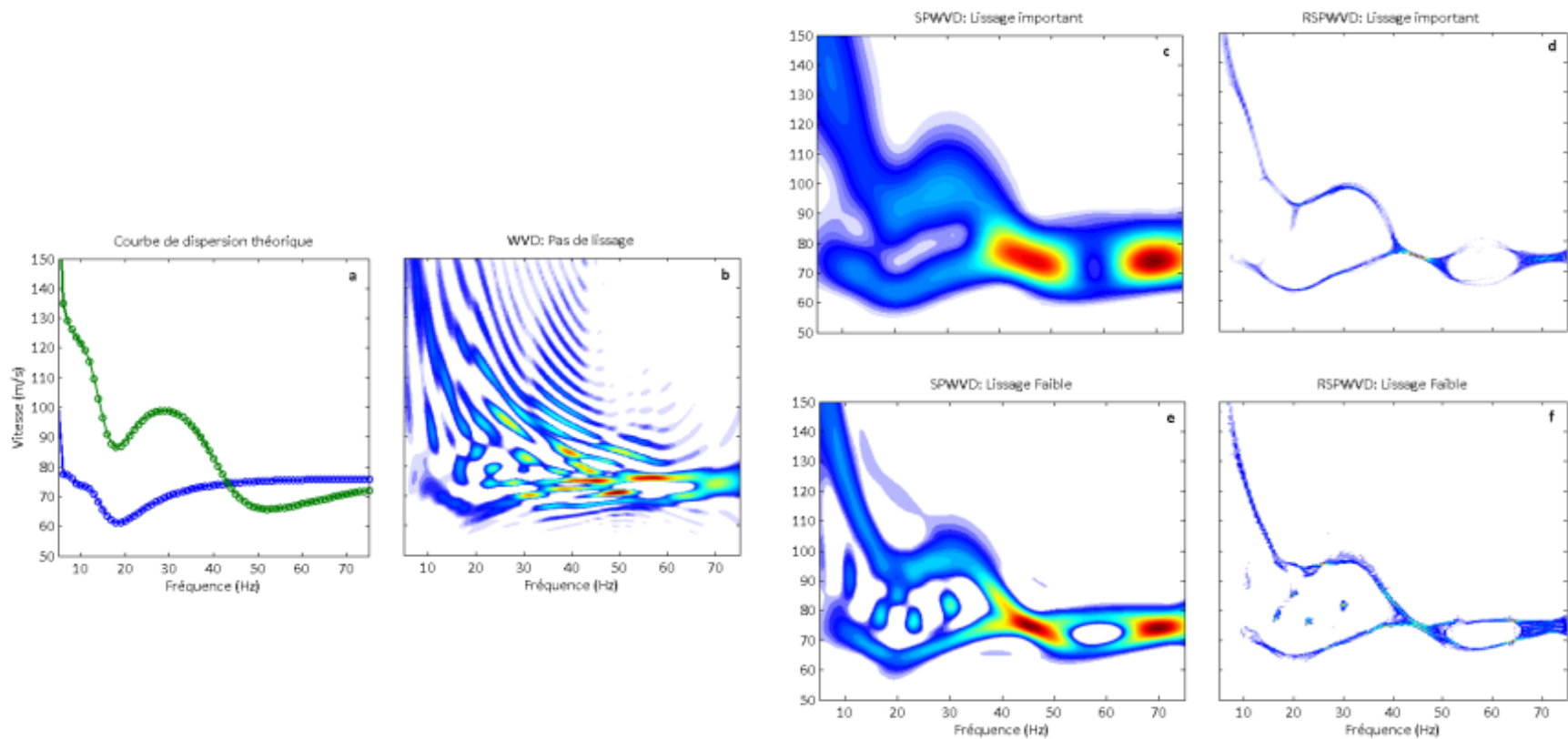


Figure 4.6. Impact de la fonction de lissage $\psi_T(t, f)$ sur l'allure d'une TFD calculée depuis (a) un signal théorique synthétique typique de la réponse dynamique d'un dépôt de sol. Distribution TF obtenue à l'aide de la (b) WVD et (c, e) de ses versions lissées à l'aide de la SPWVD et de leur réallocation (RSPWVD) (d, f). La méthode de réallocation permet d'augmenter la lisibilité d'un signal dans le plan temps-fréquence (Auger et Flandrin, 1995).

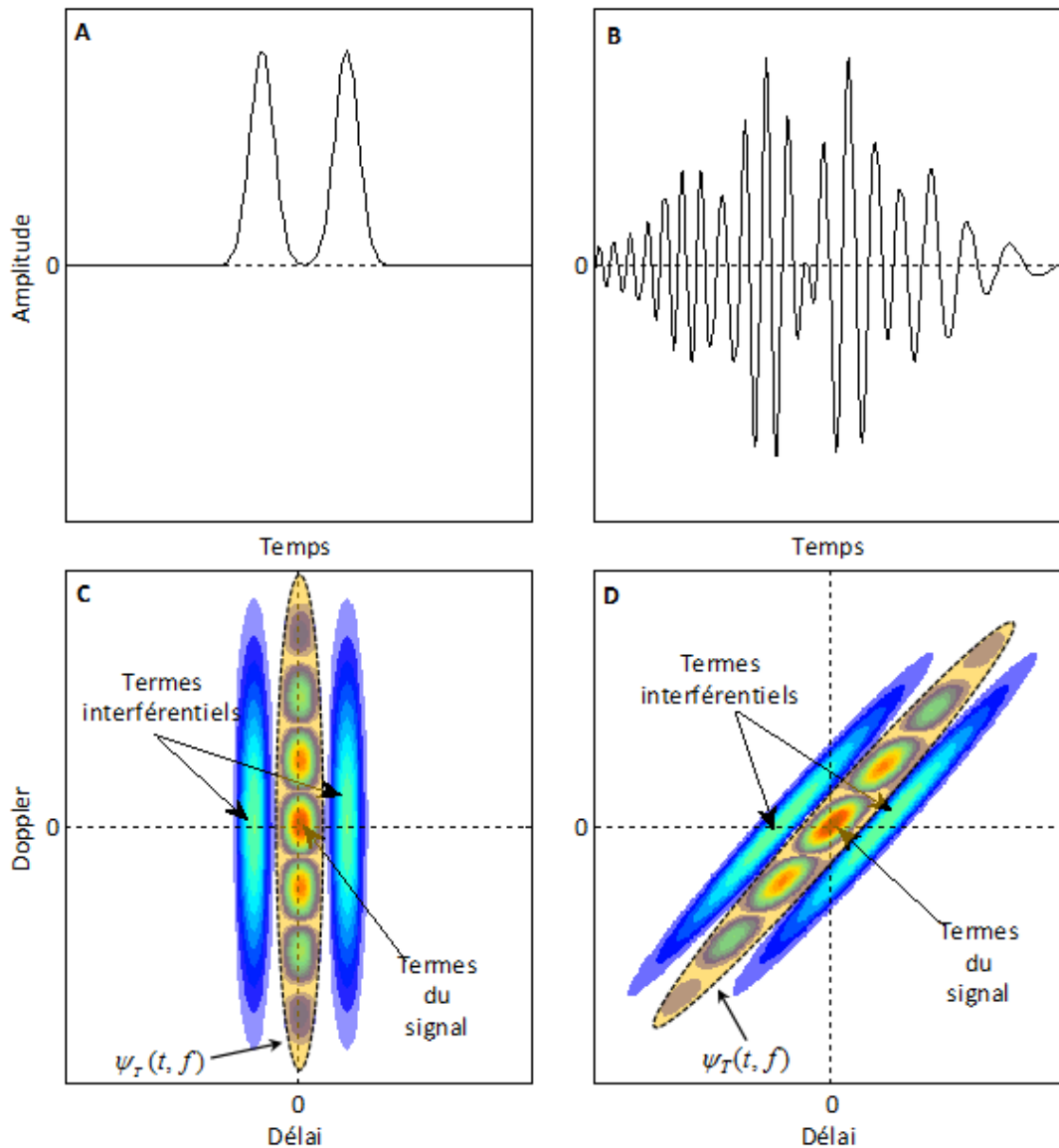


Figure 4.7. (a) : Signal $x_1(t)$ (b) : Signal $x_2(t)$ (c) : Signal $x_1(t)$ dans le domaine (τ, ν) (d) : Signal $x_2(t)$ dans le domaine (τ, ν) . (c-d) L'opération de lissage 'optimum' est définie par la fonction $\psi_T(t, f)$ dans le domaine corrélatif (AF).

4.4.3 Approche suggérée : Design de noyaux adaptatifs et mesure de concentration

Pour les DQ tout comme pour les DL, il existe des méthodes permettant le calcul de noyaux de lissage ou de fenêtres adaptatives permettant de prendre en considération : 1) les variations locales du signal dans le plan TF et 2) les composantes de faibles intensités du signal. Ces méthodes sont le plus souvent basées sur un processus d'optimisation

permettant à la TFD ou la AF de maximiser ou de minimiser certaines propriétés. Pour les DL et les DQ, une approche relativement simple souvent utilisée consiste à minimiser l'étalement des composantes présentes dans le plan TF en minimisant une mesure de concentration (norme l_0 , l_1 , entropie de Rényi) qui permet notamment de tenir compte des composantes du signal ayant peu d'énergie (Stankovic, 2001; Jokanovic et Amin, 2011; Boashash, 2015). Il est aussi possible d'optimiser une DL en imposant un critère de parcimonie sur les bases nécessaires pour représenter le signal. Dans ce cas, le(s) critère(s) utilisé(s) lors de l'optimisation doit permettre d'obtenir une représentation TF la plus parcimonieuse possible tout en demeurant néanmoins une représentation fidèle du signal original (Mallat and Zhang, 1993; Chen et coll., 2001; Vera Rodriguez et coll., 2012). D'une manière un peu différente, cette approche peut tout aussi bien être utilisée pour des DQ comme le montre par exemple les travaux de Baraniuk et Jones (1992a, b), Jones et Baraniuk (1995), Flandrin et Borgnat (2010) et de Amin et coll. (2015). Bien que les méthodes adaptatives nécessitent un temps de calcul généralement plus long que les méthodes 'traditionnelles,' ce désavantage est souvent négligeable comparativement au gain obtenu dans la précision de la TFD. Dans le cadre de ce projet de recherche, puisque de nombreux signaux devront être analysés en temps réel, il s'agira donc de trouver la balance entre précision et temps de calcul. Également, l'utilisation de méthodes adaptatives est particulièrement attrayante puisque la méthode d'inspection proposée devra être utilisée sur le terrain par des utilisateurs n'étant pas nécessairement experts en traitement des signaux. Il est donc important que la méthode utilisée pour le traitement des signaux ne nécessite l'ajustement que d'un nombre minimum de paramètres afin de la rendre facile d'utilisation.

Pour l'analyse des signaux provenant des exemples présentés dans les chapitres 6-7, une approche adaptative basée sur une version modifiée de la ST est employée. Cette approche est utilisée puisqu'elle permet le calcul rapide des vitesses de phase et de groupe tout en s'adaptant aux signaux analysés. Dans cette approche, la distribution temps-fréquence est obtenue en calculant une version modifiée de la ST, la GSTGST :

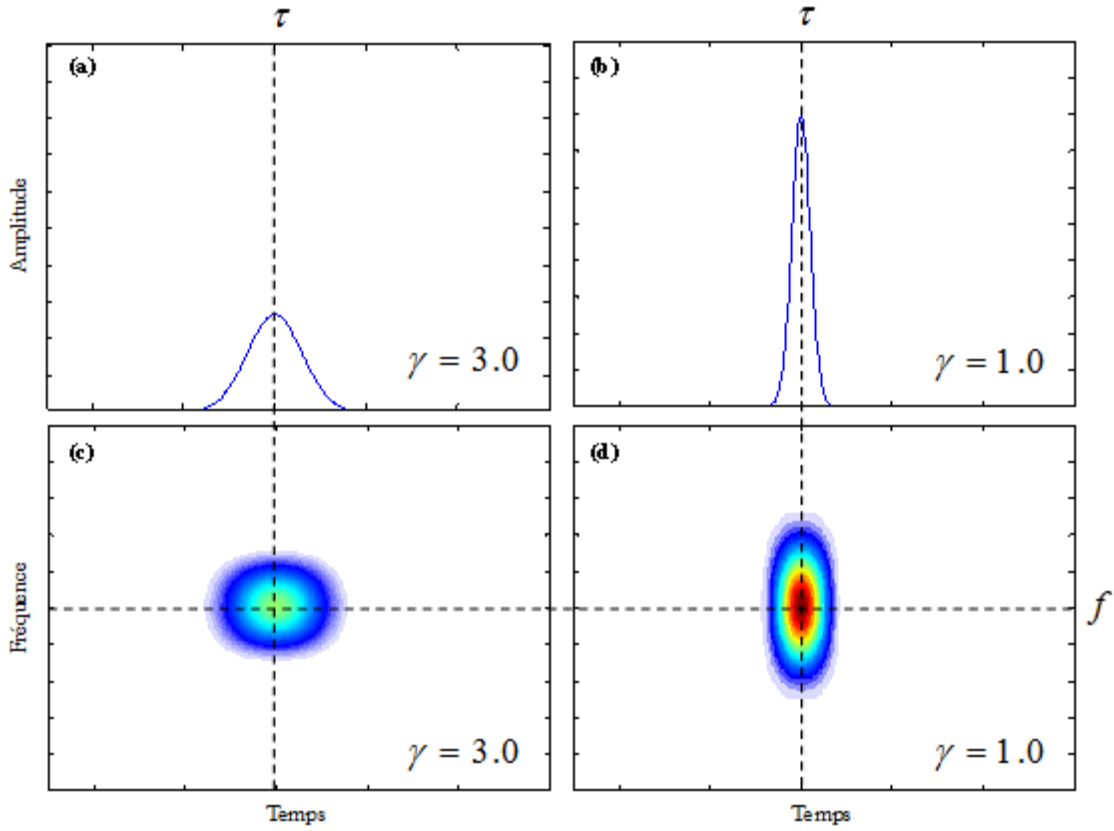


Figure 4.8. Influence du paramètre γ sur la résolution temporelle (a-b) et temps-fréquence (c-d) de la fenêtre gaussienne de la GST utilisée dans le chapitre 6.

$$\text{GST}_x(t, f, \gamma) = \int_{\tau} x(\tau) \frac{|f|}{\gamma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-f^2(t-\tau)^2}{2\gamma^2}} e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (4.14)$$

L'unique différence entre la GGST de l'équation 4.14 et la ST de l'équation 4.11 est la présence du paramètre γ qui permet de faire varier la résolution TF de la ST comme le montre la figure 4.8.

$$\frac{|f|}{\gamma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-f^2(t-\tau)^2}{2\gamma^2}} e^{-j2\pi f\tau} \quad (4.15)$$

Comme le montre la Figure 4.8a-c, l'augmentation du paramètre γ permet réduire la taille de la fenêtre gaussienne dans le domaine fréquentiel tout en l'augmentant dans le domaine temporel.

Dans le chapitre 6, la valeur de γ est déterminée à l'aide d'un processus d'optimisation permettant de minimiser l'étalement de l'énergie des différentes composantes d'un signal présentes dans le domaine TF :

$$\arg \max_{\gamma \in \mathbb{R}} \left(\frac{1}{\sum_1^N \sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} |\overline{ST_x^h(t, f, \gamma)}|} dt df \right) \quad (4.16)$$

Sujet à: $0.5 \leq \gamma \leq 2.0$

Où

$$\overline{ST_x^h(t, f, \gamma)} = \frac{ST_x^h(t, f, \gamma)}{\sqrt{\sum_1^N \sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} |ST_x^h(t, f, \gamma)|^2 dt df}}$$

Et où N est le nombre d'échantillons temporel et $f_{\min} - f_{\max}$ définit l'intervalle fréquentiel dans lequel le processus d'optimisation est appliqué.

Finalement, puisque l'angle de phase calculé à l'aide de la GST est absolument référencé par rapport à $t = 0$ (Stockwell et coll., 1996), la vitesse de phase peut également être calculée à partir des représentations temps-fréquences obtenues à l'aide de la GST. Pour plus de détails qu'en à la procédure d'analyse des signaux utilisés dans ce rapport, le lecteur est référé aux travaux de Tremblay (2017).

4.5 Analyse d'énergie

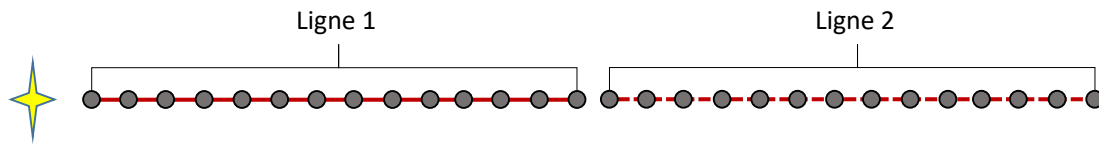
La présence d'une discontinuité dans un milieu où se propagent les ondes élastiques peut entraîner un changement important de la quantité d'énergie de certaines fréquences. En effet, lorsqu'une onde élastique entre en contact avec une anomalie dans le sol, il est probable que la quantité d'énergie avec laquelle cette onde se propage change en fonction des propriétés de l'anomalie. Ce changement d'énergie peut être causé par un amortissement plus grand des ondes se propageant à travers l'anomalie ainsi que par la réflexion de certaines ondes causées par la présence de l'anomalie (Nasseri-Moghaddam,

2006; Chai et coll., 2012). Le changement d'énergie d'une onde dépendra donc de sa fréquence (donc de sa longueur d'onde), de la taille de l'anomalie ainsi que de sa profondeur. Bien que la littérature rapporte de nombreux cas où la présence d'une cavité souterraine a été détectée en analysant la variation de l'énergie des ondes élastiques, plusieurs de ces études présentent des résultats obtenus à l'aide de modèles numériques (Nasser-Moghaddam, 2006; Xia et coll., 2007; Luke et Calderon, 2008; Chai et coll., 2012; Chai et coll., 2013). Cependant, lors d'essais réalisés in situ, la présence de bruit dans les signaux ainsi que de multiples réflecteurs dans le sol (comme le ponceau) peut grandement compliquer l'analyse de l'énergie des ondes. L'analyse de l'énergie des ondes demande donc l'application de certains filtres sur le signal permettant de réduire l'énergie des ondes non affectées par la présence de la cavité tout en rehaussant l'énergie des ondes affectées par la cavité (Xia et coll., 2007; Shao et coll., 2016; Yu et Guo, 2016). L'application de ce type de filtre sur le signal n'est toutefois pas un processus simple et peut souvent ne pas permettre d'en arriver aux résultats espérés. Dans le cadre de la deuxième phase de ce projet de recherche, l'utilisation de ce type de méthode pour la détection de certains types de cavités sera évaluée.

4.6 Collecte des signaux sur le terrain

Lors des essais MMASW, seize accéléromètres sont utilisés afin d'enregistrer la variation de l'accélération verticale du sol. Afin de couvrir la totalité du profil de sol investigué, différentes lignes d'essais sont réalisées tout en gardant la source au même endroit comme le montre la figure 3.9a. Dans ce rapport, cette configuration est appelée la configuration linéaire. L'espacement intercapteur et entre la source et le premier capteur varient en fonction du type de profil investigué. Pour les remblais routiers, un espacement intercapteur de 0.2 m et une distance source capteur de 2 à 3 mètres sont souvent utilisés. Bien que l'efficacité de cette configuration ait été prouvée depuis les premiers essais MMASW effectués au début des années 2000, d'autres configurations de capteurs peuvent être utilisées lors d'essais sismiques. Une de ces configurations consiste à placer les capteurs le long de différentes lignes 'perpendiculaires' à la source par rapport à la configuration linéaire comme le montre la figure 4.9b (Veen et coll., 2001; Vermeer, 2002; Pilecki et coll., 2017).

(a) Configuration linéaire



(b) Configuration perpendiculaire

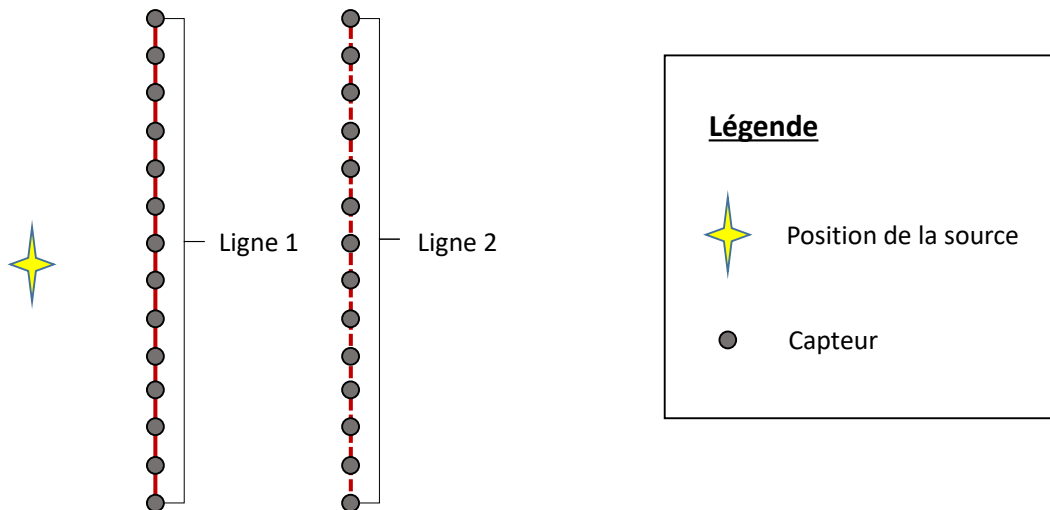


Figure 4.9. Illustration des deux configurations de lignes possibles lors des essais sur le terrain. (a) Configuration linéaire utilisée lors de la méthode MMASW. (b) Configuration perpendiculaire utilisée lors des nouveaux essais.

La configuration perpendiculaire peut s'avérer avantageuse par rapport à la configuration linéaire pour diverses raisons. Par exemple, elle permet de couvrir un plus grand volume de sol avec la même position de source ce qui peut s'avérer avantageux puisque la localisation de la source peut avoir un impact sur l'énergie des différentes ondes présente dans les signaux. Également, lorsqu'utilisée avec les algorithmes présentés dans la section 4.4.3, cette configuration permet d'obtenir des tomographies en 2 et 3D du volume de sol investigué. C'est donc principalement pour ces deux raisons que cette configuration a été proposée et adaptée dans le cadre ce projet.

CHAPITRE 5 : MODÈLE RÉDUIT ET SIMULATIONS NUMÉRIQUES

5.1 Motivation

De par leurs applications à caractériser les dépôts de sols, les techniques basées sur la propagation des ondes de Rayleigh ont été utilisées depuis plus d'une décennie pour détecter les anomalies en dessous des pavés routiers ou pour la détection des objets enfouis. Certains chercheurs ont employé les simulations numériques pour visualiser et apprécier l'effet d'une cavité ou d'un objet enfouis sur les signaux en surface et la manière avec laquelle la présence de telles anomalies peut affecter les ondes élastiques.

Les simulations effectuées par Gucunski et al. 1995 et Ganji et al. 1997 rapportent des fluctuations de la courbe de dispersion des signaux mesurés aux voisinages d'une cavité qui selon les auteurs sont causées par des réflexions sur les interfaces de celle-ci. La présence d'une cavité se manifeste, sur la transformée par ondelettes des signaux produits numériquement pour différentes configurations de cavité (dimensions, profondeur/ et distance de la source), par la présence de pic d'énergie secondaire.

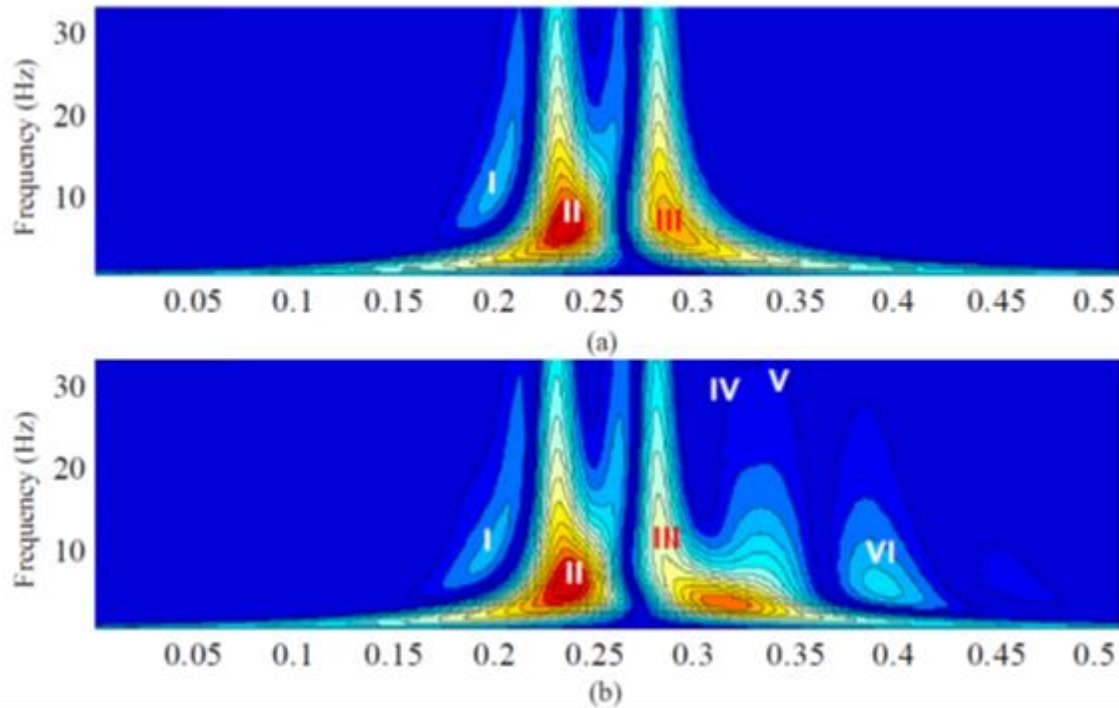


Figure 5.1. La transformé par ondelettes d'un signal produit numériquement à 12.5m de la source (a) en absence de cavité (b) en présence d'une cavité de 1 m de profondeur, 1 m de largeur, 1 m de profondeur et à 14 m de la source.

Ceci est bien illustré aux figures 5.1 où on peut voir la présence de piques d'énergie (IV et V) résultants de la réflexion de l'énergie d'onde incidente sur la face proche de la source (IV) et la face éloignée (V). La figure 5.1a montre le cas sans cavité. Nasseri-Moghaddam (2005.a) s'est basé sur des simulations numériques de cavité de différentes dimensions situées à différentes profondeurs pour constater un changement dans le contenu fréquentiel du train d'ondes mesuré selon la dimension, la profondeur et la distance de mesure par rapport à la position de la cavité.

Dépendamment de ses dimensions et de sa profondeur, la cavité amortie certaines fréquences et déphase d'autre (Nasseri-Moghaddam et coll. 2005.b). Nasseri-Moghaddam (2007), confirme aussi qu'il est impératif de passer au domaine fréquentiel et surtout à la densité spectrale de puissance pour visualiser l'effet de la cavité.

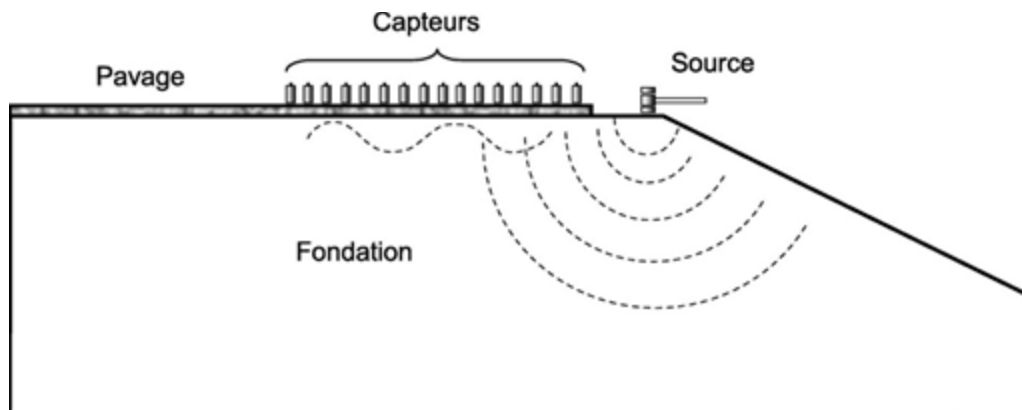


Figure 5.2. Configuration de la méthode MMASW pour caractérisation du sol en dessous d'un pavé avec une source externe au pavé (Karray et Lefebvre, 2009.a).

Toute fois des considérations de proportionnalité entre les dimensions, la profondeur et le contenu fréquentiel de la source devront être pris en compte. Cela dit, le cas des remblais routier se distingue par la présence d'un pavé rigide en surface qui rend la génération des ondes dans le sol difficile. Les simulations numériques menées par Karray et Lefebvre (2009a) ont montré que l'utilisation d'une source d'impact à la surface du pavé induit une contribution importante des modes supérieurs des ondes de Rayleigh ainsi qu'un mode dit de flexion qui se propage dans le pavé et qui vient compliquer l'interprétation des signaux. De plus, l'énergie reste majoritairement emprisonnée dans le pavé ce qui compromet la caractérisation du sol en dessous.

Karray et Lefebvre (2009a) ont réussi à démontrer grâce à des simulations numériques qu'il est possible de placer la source sur le sol adjacent au pavé (fig. 5.2). Cette configuration permet de caractériser le sol sous un pavé même si les capteurs sont placés sur le pavé comme illustrer sur la figure 5.2. Cette configuration a été testée sur plusieurs cas réels et son efficacité a été prouvée sans aucun doute. Cette configuration sera adoptée dans le cadre de cette étude. Seule la configuration des capteurs (façon de placer les capteurs) et l'emplacement de la source par rapport au premier capteur seront examinés.

La détection de cavités à l'aide des ondes élastiques ou sismiques a connu un certain succès au cours des derniers 10-15 ans. En effet, Nasser-Moghaddam, 2006 a utilisé un modèle physique réduit pour montrer que la présence d'une cavité ou d'un objet dans le sol peut

être détectée par l'observation de la variation de l'énergie dans l'espace. De la même façon, Grandjean, G. 2004 et Sloan, S.D. 2015 ont effectué des expériences sur des cas réels et ont montré le potentiel qu'offre les méthodes sismiques basées sur les ondes de surface à détecter des cavités. Karray et Lefebvre (2009a) ont à leur tour effectué une expérience intéressante en créant une cavité au niveau du toit d'un ponceau réel. Ils ont pu ainsi comparer entre les relevés effectués sans et avec la cavité. Une diminution de l'ordre de 20%, en présence de cavité, de la vitesse de phase du mode fondamentale des ondes de Rayleigh a été constatée. Plus la cavité s'élargit plus la diminution est importante. Dans le but d'alléger le coût et simplifier l'analyse, Karray et Lefebvre 2009a ont montré que la variation de la vitesse de phase est suffisante pour apprécier la présence possible d'une anomalie.

La présence d'une telle anomalie se manifeste généralement par une réduction importante de la vitesse de phase. Cependant, il est important d'inverser certaines courbes de dispersion afin de localiser l'anomalie en profondeur. Les travaux de Karray et Lefebvre (2009a) ont constitué une avancée importante dans le domaine d'inspection des routes.

Malgré les avancées importantes, il reste encore plusieurs défis importants à surmonter pour la détection des cavités, d'anomalies ou d'objets enfouis de manière plus précise et fiable (Sloan, 2015.b). En effet, il arrive régulièrement d'avoir des variations dues à la présence de matériaux de nature différente (exemple : argile) qui peuvent produire des confusions au niveau de la prise de décisions. La localisation spatiale des anomalies est également un défi de taille puisque les essais sont souvent effectués sur des lignes qui ne couvrent pas nécessairement toute la surface susceptible de contenir des anomalies. La présence d'un ponceau est également un élément qui mérite d'être examiné davantage à l'aide de simulations et 3D et de modèles réduits.



Figure 5.3. (a) Préparation pour la création d'une cavité (b) Découpage du ponceau en tôle ondulée (c) Intérieur de la cavité (d) Disposition des capteurs pour la réalisation des essais MMASW (Karray et Lefebvre, 2009a).

Dans un contexte d'examen des infrastructures civiles existantes, il y a donc un besoin de développer des outils de détection précise de cavités, de zones décompactées ou de présence d'obstacles, etc. Pour répondre à une partie de ces besoins, il est nécessaire d'abord d'étudier davantage pour mieux comprendre l'effet de ces hétérogénéités locales (cavités ou obstacles) sur la propagation des ondes de surface et sur la précision des méthodes basées sur ces ondes à détecter ces zones. La réalisation d'essais MMASW sur une ligne permet d'obtenir une tomographie en 2D du milieu sous-jacent (en termes de vitesse de phase ou de vitesse des ondes de cisaillement). Ce genre de résultat permet, par exemple, la détection et la localisation des zones de faibles vitesses. Cependant, il ne permet pas d'identifier de façon évidente s'il s'agit d'une cavité ou d'une zone de décompression à cause de l'effet de moyenne qui se produit entre les vitesses de cette zone

et le milieu adjacent (perpendiculaire à la ligne). La quantification de la zone d'influence en fonction de la profondeur (ou de la longueur d'onde) permettrait une meilleure identification de l'ampleur d'une cavité et de son emplacement dans l'espace. Actuellement, il n'existe pas ou peu de données dans la littérature qui permettent d'évaluer cette influence. D'un autre côté, la méthode MMASW a été développée pour la caractérisation des dépôts de sol en terme de module de cisaillement ($G=\rho V_s^2$). Il s'agit donc d'une méthode quantitative (globale) et relativement lourde dans le cas où on est intéressé par la détection des cavités seulement. Cette méthode nécessite une expertise au niveau du traitement des signaux et la propagation des ondes, ce qui la rend difficile d'usage.

5.2 Modèle physique réduit

L'ensemble des éléments discutés jusqu'ici nous a motivés à créer un modèle physique au laboratoire qui va nous permettre d'étudier différents aspects : position de la source et effet de la pente; distance source capteur; effet spatial du ponceau sur les ondes élastiques; création des cavités au centre et sur le côté du ponceau; etc. Ce modèle réduit est également important pour calibrer les modèles numériques en 3D qui seront ensuite généralisés sur des modèles à échelles réelles.

5.2.1 Description du modèle

Le modèle physique reproduit, à échelle réduite, un talus routier composé d'une dalle de béton de 0.05 m d'épaisseur comme illustré sur la figure 5.4b qui repose sur un talus de sable de 6 m de longueur, 1 m de hauteur et 1.8 m de largeur, sous lequel passe un demi-ponceau en PVC de 0.4 m de diamètre (Fig. 5.4c). Ce talus repose sur une dalle de béton et est compris entre les murs latéraux d'un canal en béton de l'UdeS. Au total, 16 tonnes de sable (80um-5mm) ont servi pour la construction de ce modèle. Le remblai a été construit par couches de 0.1 m et compactées une à une à l'aide d'une plaque vibrante (Fig. 5.4.a). Après la mise en place du sable, une dalle de béton a été construite afin de simuler un pavé. Cette dalle peut être facilement enlevée de la surface de la crête du remblai (Fig. 5.4.b) dans le but de pouvoir étudier l'effet du pavé qui possède un contraste important de rigidité avec



Figure 5.4. a) Mise en place et compactage du sol du talus; b) mise en place de la dalle de béton; c) Mise en place du demi-ponceau.

celui du sol. Le ponceau en PVC de 0.4 m de diamètre (Fig. 5.4.c) a été percé sur le dessus et sur le côté pour pouvoir créer des cavités plus tard. Pour cela, des trappes ont été placées là où le ponceau a été percé (fig. 5.5).

Ces trappes peuvent être gardées fermées (fig. 5.5a) pour simuler un remblai routier sans cavités. Ces trappes peuvent ensuite être ouvertes (fig. 5.5b) séparément ou simultanément dans le but de pouvoir créer des cavités de différents volume et emplacement dans le sol compris entre pavé et ponceau. Le ponceau n'a pas été placé avant la construction du remblai dans le but d'effectuer des relevés sans sa présence au départ. Ceci a permis d'étudier son effet après que ce dernier a été introduit en dessous du remblai.

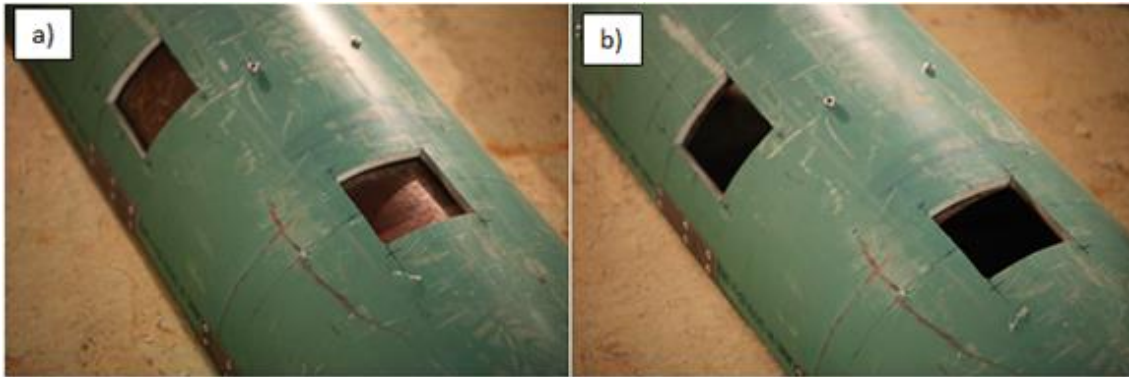


Figure 5.5. Deux ouvertures effectuées sur le ponceau; a) avec trappe fermée; b) ouverte.

Le demi-tube en PVC de diamètre 0.4 m qui fait office de ponceau dans ce modèle réduit, a été muni comme déjà indiqué de deux trappes carrées de 0.1x0.1 m commandées de l'intérieur du ponceau. La première est située sur le toit du tube alors que la deuxième a été placée sur le côté (figure 5.5). Les deux trappes sont espacées de 0.3 m. L'emplacement des trappes, une fois le ponceau mis en place, est de 0.25 m par rapport à une des extrémités du revêtement rigide et de 0.2 m par rapport à l'autre extrémité. Le but de cette configuration est d'étudier :

- 1- L'effet de la présence du ponceau sur la propagation des ondes élastiques.
- 2- L'effet de l'emplacement de la cavité (centre vs côté) par rapport au ponceau sur les ondes élastiques.
- 3- À partir de quel volume une cavité peut être identifiée de façon évidente.
- 4- Étudier la possibilité de reconnaître le volume approximatif de la cavité, et non pas juste détecter sa présence.
- 5- Produire suffisamment de données pour valider les configurations, les méthodes de traitement des signaux et les algorithmes de calcul utilisés dans le cadre de cette étude.
- 6- Calibrer les modèles numériques en reproduisant le modèle physique dans le but de généraliser les modèles numériques à des cas à dimensions réelles. Étudier ensuite l'effet de certains autres paramètres : forme et matériau du ponceau, présence de zone lâche ou décompactée et présence de couche d'argile (section 5.3).

5.2.2 Relevés réalisés sur le modèle réduit

À ce stade d'étude, l'ensemble des relevés de référence ont déjà été effectué. En effet, pour pouvoir examiner correctement l'effet du pavé, celui du ponceau et celui de la géométrie du remblai, il a été nécessaire de réaliser des relevés avant d'entamer l'étape d'insertion du ponceau et la création de cavités de différentes tailles. Il est à noter qu'à cause de l'échelle réduite, le choix du type de source, des capteurs et de leurs emplacements et des fréquences d'échantillonnages constituent des défis importants qui devaient être surmontés par essai et erreur au début du processus. Un des objectifs de ces essais était aussi de collecter suffisamment de données pour caractériser le sol du talus et pour examiner l'effet de la dalle de béton avant la mise en place du ponceau. Les premiers relevés consistaient à varier la distance entre la source et le premier capteur, et par la suite varier la position de la source dans la pente pour voir l'effet de différence de niveau entre la source et les capteurs. Des lignes de relevés, où les capteurs étaient alignés avec la source tout au long du talus ont aussi été effectuées avec et sans pavé (fig. 5.6). Plusieurs sources d'énergie (marteau en acier et en polymère) avec des plaques de différents matériaux (grande et petite, acier et bois) ont été considérées et examinées (fig 5.6b).

Dans la suite de la phase expérimentale sur le modèle réduit, des relevés ont été effectués en utilisant une nouvelle configuration de capteurs. Cette configuration sera illustrée plus en détail au chapitre 6 où les premiers résultats et analyses d'une partie de relevés effectués jusqu'à maintenant seront exposés. L'étape de l'étude de l'effet d'une cavité a également été entamée. Des résultats des essais réalisés après la création de cavités de différentes dimensions seront présentés au chapitre 6.

5.3 Modélisation numérique en 3D

5.3.1 Introduction

Karray et Lefebvre (2009a) ont utilisé les simulations numériques pour ouvrir la voie à l'utilisation des ondes de Rayleigh dans la détection des cavités sous les routes. Ces simulations ont cependant été effectuées en 2D et ne permettaient pas de résoudre certains problèmes comme ceux reliés à l'effet du ponceau et à la variation latérale des propriétés



Figure 5.6. Relevés sismiques effectués (a) sans pavé (b) avec pavé. (c) différents types de source considérés.

de la cavité. Pour pouvoir déterminer la réponse d'un milieu (dépôt de sol, pavé, ponceau et/ou cavité) suite à un impact en surface, il faut impérativement résoudre les équations de propagation d'onde dans un milieu à géométrie complexe. Les méthodes analytiques ne permettent pas de résoudre ce genre de configuration complexe et il est nécessaire d'avoir recours aux méthodes numériques.

De nombreuses méthodes numériques ont été utilisées pour résoudre les problèmes de propagation des ondes dans un milieu continu élastique (Burridge et coll., 1976). Parmi ces méthodes, on recense notamment la méthode des éléments finis et la méthode des différences finies. Le choix d'une méthode numérique par rapport à une autre dépend des caractéristiques et de la configuration du problème à résoudre. La convergence et le temps de calcul sont parmi les principaux critères à prendre en considération. La méthode des différences finies est une méthode populaire puisqu'elle permet de simuler avec exactitude les phénomènes de propagation d'ondes sismiques avec un faible coût de calcul (Moczo et coll., 2007; Fitchner, 2011). Cette méthode sera retenue dans le cadre de ces études. Le programme « Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions (FLAC3D) » développé par ITASCA Consulting Group Inc., et défini comme étant un programme de « différences finies » basé sur « l'analyse Lagrangienne », sera utilisé le long de cette étude.

5.3.2 Modélisation du modèle physique réduit

Dans le but de pouvoir interpréter et de mieux comprendre les relevés effectués sur le modèle physique (réduit) et l'effet de chaque partie de la structure (revêtement / sol / ponceau / cavité), un modèle numérique représentant le modèle physique a été élaboré à l'aide de FLAC3D comme illustré à la figure 5.7. Il est à noter que les déformations engendrées lors de la propagation des ondes élastiques sont inférieures à 10^{-3} %, donc l'hypothèse que les matériaux composant la structure étudiée sont élastiques est valable. Pour réussir la modélisation de la propagation des ondes élastiques, il faut d'abord définir : (a) les forces externes et les conditions aux limites (b) l'amortissement mécanique des matériaux utilisés et (c) la transmission des ondes à travers le modèle (d) le type de source sismique (Karray et coll., 2009).

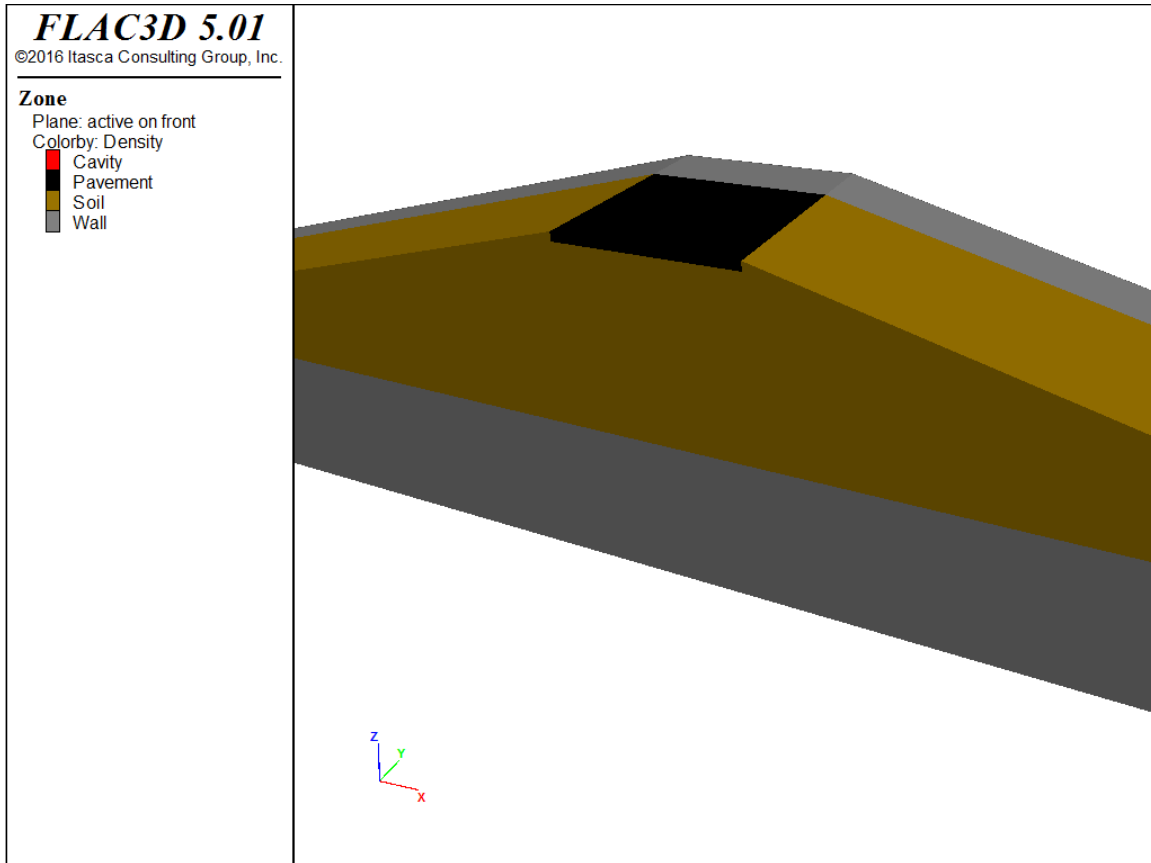


Figure 5.7. Modélisation du modèle physique sous FLAC3D (vue latérale d'une coupe à travers le plan X-Z).

a) Frontière du modèle

Afin de modéliser le plus fidèlement possible le comportement dynamique réel du modèle physique, des zones d'une grande rigidité par rapport au sol ont été inclus dans les modèles numériques afin de reproduire la présence des murs latéraux et de la dalle de béton sur laquelle repose le modèle réel. Cette approche, quoique coûteuse en terme de temps de calcul, s'est avérée être capable d'estimer des vitesses de groupe similaires aux vitesses calculées expérimentalement. Afin de réduire le temps de calcul, il est également possible de remplacer les murs et la dalle de béton par des frontières parfaitement rigide. Cependant, cette approche a tendance à surestimer les vitesses de groupe calculées à de faibles fréquences. L'approche utilisée dans ce projet est également plus réaliste puisque l'interface sol-béton n'est pas parfaitement rigide et laisse passer une certaine quantité d'énergie.

b) Amortissement

Outre la perte d'énergie causée par l'atténuation géométrique, tout système dynamique amortit l'énergie qui lui est injectée. Comme il était mentionné plus haut, lors de la propagation des ondes élastiques, les déformations induites sont faibles ($<10^{-3} \%$) et il est possible de considérer le problème comme parfaitement élastique. En analyse dynamique, l'amortissement dit de Rayleigh est souvent utilisé. Cet amortissement est composé de deux éléments visqueux proportionnels à la masse et à la rigidité (Karray et Lefebvre, 2009a) :

$$C = \xi_{min}\omega_{min}M + \xi_{min}/\omega_{min}K \quad (5.1)$$

Où : M est la matrice de masse; K est la matrice de rigidité et ξ_{min} est le taux d'amortissement minimum défini à la fréquence ω_{min} .

Pour un sol granulaire et pour des faibles déformations, l'amortissement est compris entre 2% et 5%. Hardin (1961) et Seed et Idriss (1970) proposent de nombreuses relations reliant l'amortissement ξ à la déformation γ . Pour un sol situé au voisinage d'un ponceau, qu'est généralement un sable fin à moyen un amortissement de 2% pour des fréquences variant entre 150 et 200 rad/s sera considéré.

c) Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques du modèle (sol, pavé et ponceau) ont été choisies en utilisant des valeurs typiques de ces différents matériaux. Pour le sol, une vitesse des ondes de cisaillement normalisée de 275 m/s, un coefficient de Poisson de 0.33 et une masse volumique totale 1900 kg/m³ sont utilisés. Pour la dalle de béton, une vitesse de 1500 m/s, un coefficient de Poisson de 0.3 et une masse volumique de 2350 kg/m³ sont employés. Le ponceau a été modélisé par une vitesse de 1000 m/s, un coefficient de Poisson de 0.33 et une masse volumique de 1200 kg/m³. Ces paramètres seront ajustés dans la suite du projet s'il s'avère nécessaire.

La dimension des éléments constituant le modèle est un paramètre important dans la modélisation du problème de propagation des ondes élastiques. Kuhlemeyer et Lysmer (1973) indiquent que la dimension des éléments (Δl) doit être approximativement 1/8 fois

plus petite que la longueur d'onde associée à la fréquence d'oscillation la plus élevée. Cependant, la taille et le nombre d'éléments utilisés ont un impact important sur le temps de calcul des méthodes numériques. Pour cela et pour les convenances du problème, une valeur de $\Delta l = 0,025$ m a été considérée dans cette étude (figure 5.7). Cette valeur ($\Delta l = 0,025$ m) est suffisante pour permettre de simuler des essais de propagation d'onde valides à des longueurs d'onde supérieures à 0.25 m.

d) Modélisation de la source

La source est modélisée par l'application d'une force d'une durée limitée. Cette force est modélisée par un demi-sinus d'une amplitude égale à 1000 N. L'amplitude n'a aucune importance dans notre cas puisque le problème de propagation d'onde est considéré linéaire. La durée de l'impact est cependant importante puisqu'elle va décider des fréquences qui seront développées dans le modèle. Généralement, un impact d'une durée de 0.001 sec va permettre de générer une large bande de fréquence variant entre 0 et 1000 Hz. Cette durée a été adoptée dans cette étude. Elle a toutefois été variée dans certaines situations pour pouvoir reproduire l'impact réel obtenu durant les essais. La durée de l'impact réel est mesurable durant l'expérience en plaçant un capteur proche de la source.

Différentes formulations peuvent être utilisées afin de générer numériquement une source sismique. Les équations 5.2a-b présentes deux formulations pouvant être utilisées lors des simulations numériques :

$$s(t) = A \sin(\omega t - \phi) \text{ pour } t < 1/(2f) \quad (5.2a)$$

Où : A = amplitude de l'onde
 $\omega = 2\pi f$ = fréquence angulaire (rad/s)
 t = temps (s)
 f = fréquence (Hz)
 ϕ = phase (rad)

$$s(t) = A e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}} \text{ pour } t \leq t_{\max} \quad (5.2b)$$

Où: t_0 = localisation temporelle du centre de l'impact (s)
 $t_{\max}$ = temps de la fin de l'impact (s)
 σ = Paramètre permettant de régler la taille de l'impact.

L'équation 5.2a décrit un demi-sinus qui commence au temps 0 tandis que l'équation 5.2b décrit plutôt une gaussienne centrée au temps t_0 . Bien que ces deux équations correspondent à des impulsions de courtes durées, l'équation 5.2b possède certains avantages par rapport à l'équation 5.2a. La figure C1 montre les impulsions dans les domaines temporel et fréquentiel générées par les équations 5.2a-b.

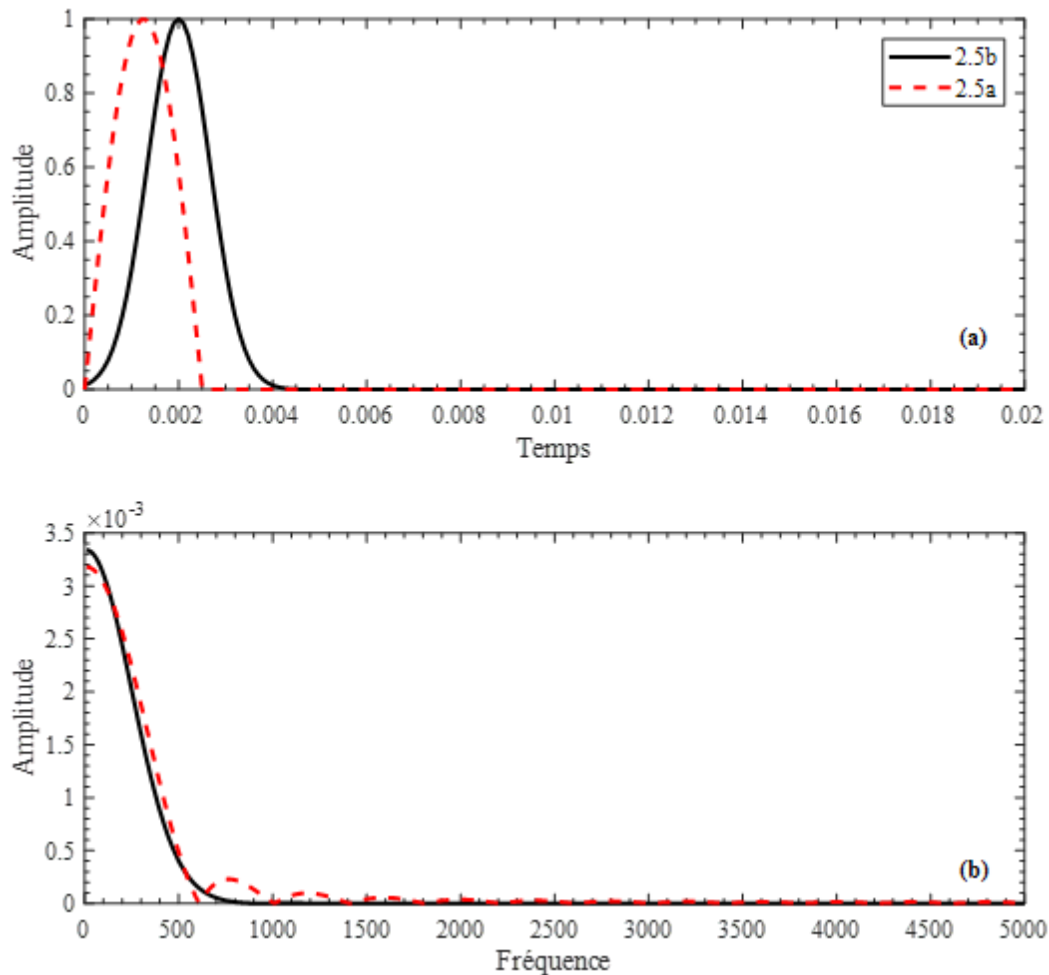


Figure 5.8. (a) Représentations temporelles et (b) fréquentielles des impulsions créées par les équations 5.2a et 5.2b.

Pour l'équation 5.2a, une fréquence f de 200 Hz, une amplitude A de 1 et une phase ϕ de 0 sont utilisées tandis que pour l'équation 2.5b, un t_0 de 0.002, un $t_{\max}$ de 0.006 et un σ de 0.001 sont utilisés. Dans le domaine temporel (figure 5.8a), l'équation 5.2a a comme avantage de produire une impulsion atteignant son amplitude maximum et s'atténuant plus

rapidement que celle produite par l'équation 5.2b. Cependant, dans le domaine fréquentiel, l'équation 5.2b permet d'éviter la fuite spectrale (présence de multiples Lobes dans le domaine fréquentiel) se produisant lorsque l'équation 5.2a est utilisée. Également, numériquement, il peut s'avérer avantageux d'utiliser une source dont l'amplitude varie graduellement dans le temps par rapport au pas de calcul des simulations.

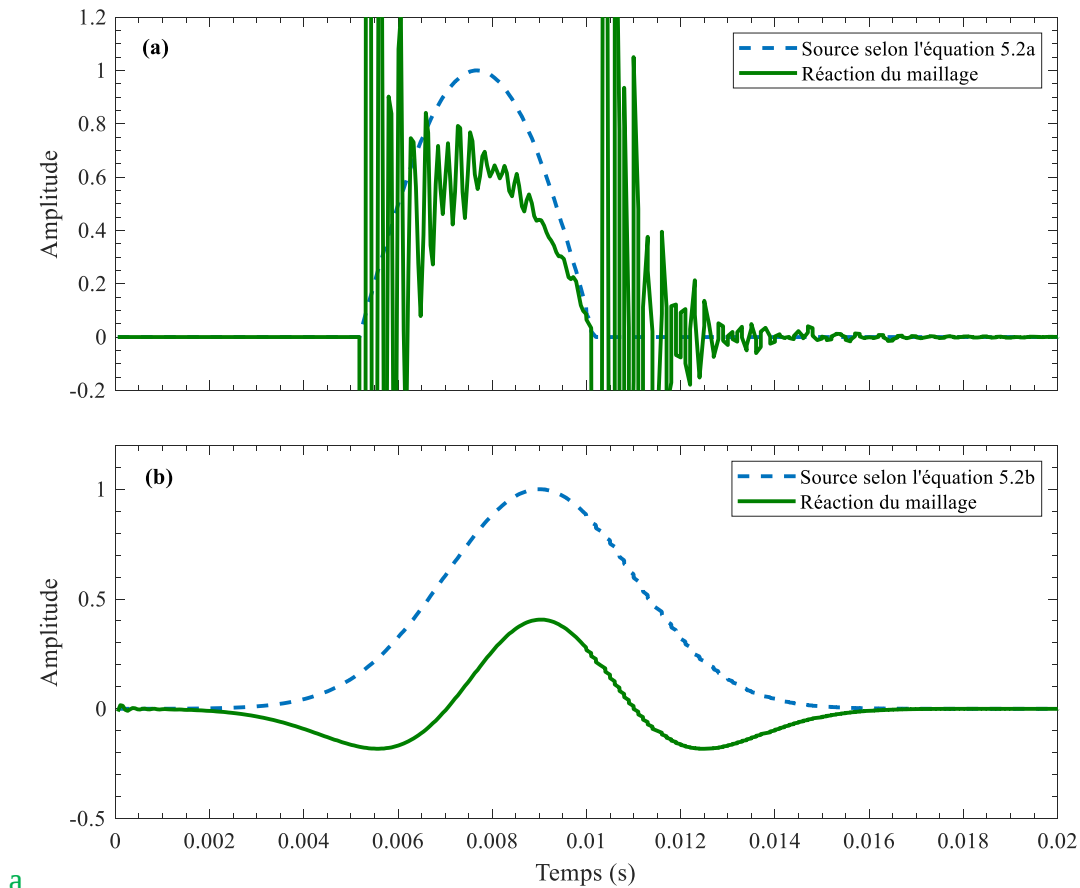


Figure 5.9. Influence des propriétés de la source sismique sur la réaction numérique du maillage durant les modélisations numériques. (a) Lorsque la source utilisée est sous la forme de l'équation 5.2a et (b) lorsque la source utilisée est sous la forme de l'équation 5.2b.

En effet, la figure 5.9 montre la réaction du maillage directement au nœud de l'application de la source. Comme le montre la Figure 5.9a, lorsque l'amplitude de la source varie rapidement au début et à la fin de l'impact, cela crée des distorsions importantes apparaissant sous la forme de hautes fréquences.

Cependant, lorsque l'amplitude de la source varie plus lentement, la Figure 5.9b montre que la réaction du maillage est proportionnelle à la forme de la source permettant ainsi d'éviter la création de hautes fréquences. Néanmoins, bien l'utilisation d'un amortissement plus élevé permet d'éliminer une partie importante de l'énergie parasite (bruit numérique), cela requiert également un temps de calcul élevé, ce qui est problématique pour les simulations numériques en 3D qui requièrent déjà un temps de calcul très important. Lors des simulations numériques, il est donc avantageux d'utiliser l'équation 5.2b afin d'éviter l'introduction d'énergie à de hautes fréquences pouvant causer des distorsions numériques. Néanmoins, l'utilisation d'un amortissement de Rayleigh qui filtre les hautes fréquences permet l'utilisation de l'équation 5.2a. Pour les simulations numériques réalisées dans ce rapport, l'équation 5.2b a été utilisée afin de simuler la source sismique.

CHAPITRE 6 : ÉTUDE DE L'EFFET DES DIFFÉRENTES COMPOSANTES D'UN REMBLAI ROUTIER SUR LA PROPAGATION DES ONDES ÉLASTIQUES

6.1 Processus d'analyse

Afin de montrer la faisabilité du processus d'analyse proposée au chapitre 4, nous commencerons par montrer, à l'aide d'exemples théoriques, comment la propagation d'ondes élastiques est affectée par la présence d'une structure souterraine telle qu'un ponceau. Nous démontrerons par la suite comment la présence d'une anomalie dans le sol recouvrant la structure peut affecter la propagation des ondes élastiques en fonction de sa profondeur par rapport à la surface du modèle. Bien qu'utiles, ces exemples tirés des méthodes théoriques ne permettent pas une représentation réaliste des conditions dans

lesquelles les anomalies sont formées autour des ponceaux. En effet, ces méthodes ne permettent que de simuler des profils de sol composés d'une succession de couches horizontales ne comportant aucune variation latérale des propriétés dynamiques (figure 6.1). Ces méthodes ne permettent donc pas de prendre en considération l'effet que peut avoir la taille des anomalies dans l'axe Y et qui sera exposé plus loin à l'aide du modèle réduit et des simulations numériques en 3D.

Nous présenterons les résultats obtenus sur le modèle réduit construit à l'UdeS (chapitre 5). Ces résultats viendront confirmer certaines des conclusions établies à l'aide des méthodes théoriques.

6.2 Méthode théorique de la matrice de propagation

Bien que les méthodes analytiques ou semi-analytiques ne permettent pas de modéliser avec exactitude les conditions dans lesquelles se trouvent les ponceaux en dessous des routes, ces méthodes permettent néanmoins de mieux comprendre les effets que peuvent avoir la présence du ponceau et d'une cavité sur la propagation des ondes élastiques. La figure 6.1 montre les 4 profils de sol/modèles qui furent analysés à l'aide de la méthode de la matrice de propagation. La vitesse des ondes de cisaillement fut déterminée à l'aide de la relation suivante:

$$V_s = \frac{V_{s1}}{(100/\sigma')^{0.25}} \quad (6.1)$$

Où $v_{s1} = 150$ m/s et σ' est la contrainte effective. Les modèles 1 et 2 sont utilisés dans la section 6.2.1 afin de montrer l'influence de la présence et de la profondeur du ponceau sur la propagation des ondes élastiques. Les modèles 3 et 4 sont, quant à eux, utilisés afin de montrer l'influence de la présence et de la profondeur d'une anomalie (zones de vitesse faible) présente dans le sol recouvrant un ponceau (section 6.2.2).

Un des avantages des méthodes analytiques est qu'elles permettent également de connaître le lien qui existe entre la longueur d'onde du mode fondamental (R_0) de propagation des



Figure 6.1. Illustration des 4 profils de sols considérés lors de l'analyse à l'aide de la méthode de la matrice de propagation. Les propriétés dynamiques des différents matériaux se trouvent dans la table 6.1.

Tableau 6.1. Propriétés des différents matériaux des modèles illustrés par la figure 6.1.

	v_s (m/s)	v_p (m/s)	ρ (kg/m ³)	h (m)
Sol 1	100	181	1900	1
Sol 2	117	378	1900	1
Sol 3	130	419	1900	1
Sol 4	139	450	1900	1
Sol 5	147	476	1900	1
Anomalie	90	170	1600	0.2
Inclusion rigide	1500	2300	2500	Milieu semi-infini.

ondes de Rayleigh et sa profondeur de pénétration dans le sol comme le montre la figure 6.2.

Théoriquement, le mode R0 tend à pénétrer dans le sol jusqu'à une profondeur égale à sa longueur d'onde. Cependant, comme le montre la figure 6.2, la majeure partie des déplacements causés par une onde du mode R0 de longueur d'onde λ se trouve concentrée à une profondeur d'environ $\lambda/3$.

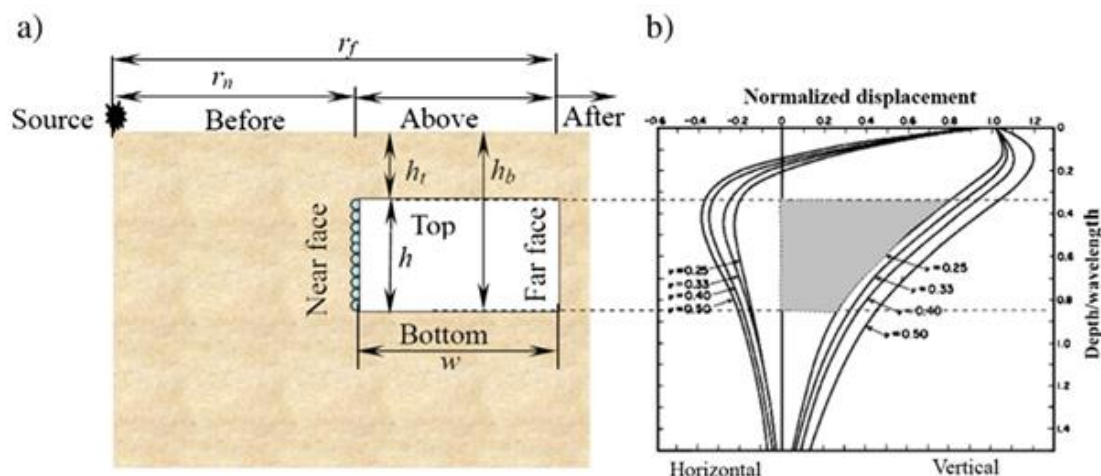


Figure 6.2. Déplacement vertical normalisé du mode R0 en fonction de sa longueur d'onde (Chai et coll. 2012).

Cette relation est importante puisqu'elle permet de mieux comprendre pourquoi les ondes de Rayleigh se propageant à différentes fréquences (ou longueur d'onde) n'ont pas la même vitesse. En effet, une onde se propageant à une plus basse fréquence (donc à une plus grande longueur d'onde, équation 6.2) pénètre plus profondément dans le sol et est donc davantage affectée par les propriétés des couches de sols se trouvant à plus grande profondeur dans le sol.

Il est à noter que les méthodes analytiques permettent de simuler efficacement la propagation des ondes élastiques dans des modèles géologiques à une dimension (1D). Ces modèles ne permettent donc pas de modéliser la présence de discontinuités ayant des dimensions limitées latéralement et ne sont pas en mesure de simuler la présence des vides. Les valeurs des paramètres dynamiques retenues pour modéliser les anomalies sont illustrées à la figure 6.1, et ont donc été choisi d'une manière arbitraire mais appropriée (tab. 6.1), permettant ainsi l'étude de l'effet de la présence d'une anomalie sur la dispersion des ondes élastiques en termes de vitesse de phase et de vitesse de groupe.

6.2.1 Effet de la profondeur de l'inclusion

La méthode théorique de la matrice de propagation présentée dans le chapitre 3 permet de montrer comment la présence d'un ponceau affecte les courbes de dispersions de vitesses

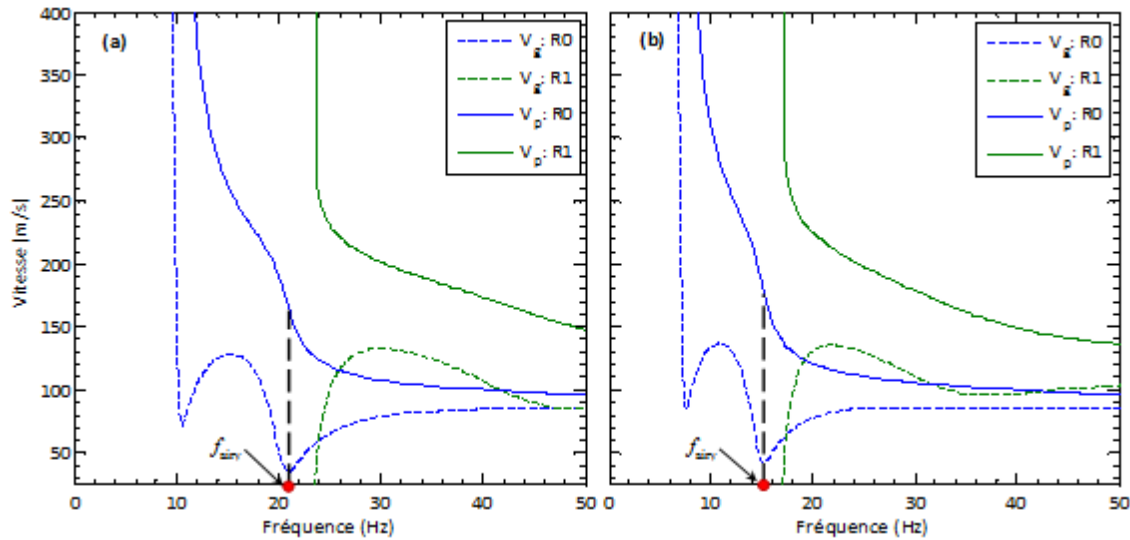


Figure 6.3. Effet de la présence du ponceau situé sous une couche de sol de : (a) 3 m (modèle 1) et (b) 5 m (modèle 2) sur les courbes de dispersion en vitesse de groupe (V_g) et de phase (V_p) des modes R0 et R1 des ondes de Rayleigh. Les cercles rouges sur les graphiques (a) et (b) indiquent la localisation de f_{airy} et les lignes pointillées noires indiquent le croisement entre $V_g - V_p$ du mode R0 et f_{airy} .

de groupe et de phase. La figure 6.3 montre que la profondeur du ponceau par rapport à la surface du sol (ou du pavé) a une influence importante sur les courbes de dispersion des deux premiers modes des ondes de Rayleigh. En effet, une augmentation de la profondeur du ponceau entraîne une ‘translation’ des courbes de dispersions vers les basses fréquences et donc vers la gauche du graphique. Par exemple, pour un ponceau se trouvant à une profondeur de trois mètres sous la surface du sol, la vitesse de groupe du mode R0 atteint une valeur minimale à une fréquence de 22.5 Hz (fig. 6.3a) tandis que pour un ponceau situé à une profondeur de cinq mètres, R0 atteint une vitesse minimale près de 15 Hz (fig.6.3b). D’après Ewing et coll. (1957) et Aki et Richard (2002), théoriquement, la fréquence où se trouve la vitesse de groupe minimum (f_{airy} : *Airy phase*) correspond à l’endroit où de multiples ondes arrivent en même temps à la surface du sol et une concentration importante d’énergie devrait donc se produire autour de cette fréquence.

La figure 6.3 permet de constater qu’en dessous de la fréquence, f_{airy} il n’existe que le mode R0. Cette observation est importante puisque lors de l’analyse des signaux, il est primordial

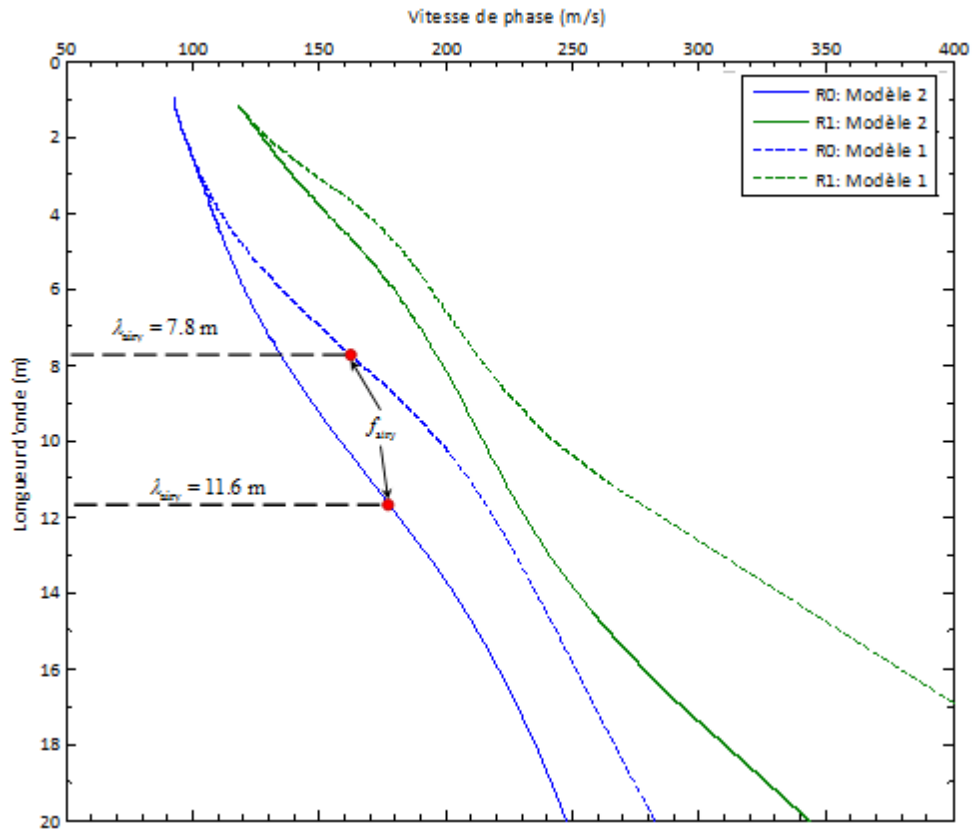


Figure 6.4. Variation de la longueur d'onde en fonction de la vitesse de phase pour les modes R0 et R1 des modèles 1 et 2. Les cercles rouges sur les courbes du mode R0 indiquent la localisation de f_{airy} . Les lignes noires pointillées indiquent la longueur d'onde (λ_{airy}) associée à f_{airy} .

de s'assurer que les vitesses calculées à différentes fréquences correspondent au même mode de propagation. En examinant la figure 6.3, on note également que la présence du ponceau affecte principalement les fréquences situées en dessous de f_{airy} . Afin de mieux comprendre le lien entre la fréquence et la profondeur du ponceau, il est possible d'exprimer les courbes de dispersions en fonction de la variation de la longueur d'onde (λ) par rapport à la vitesse de phase en utilisant la relation suivante :

$$V_p = \lambda f \quad (6.2)$$

En utilisant les vitesses de phase du mode R0 de la figure. 6.3a-b et l'équation 6.2, il devient possible de calculer les courbes de dispersions montrées dans la figure 6.4. Comme le

montre la figure 6.4, les vitesses de phase des modèles 1 et 2 sont les mêmes pour des longueurs d'ondes inférieures à 3.0 m ce qui s'explique grâce au lien entre la profondeur de pénétration des ondes du mode R0 et leur longueur d'onde (Fig. 6.2). Pour des longueurs d'onde supérieures à 3.0 m, la présence de l'inclusion rigide à une profondeur moindre pour le modèle 1 entraîne une augmentation plus rapide de la vitesse de phase. Les changements de la pente des courbes de dispersions des différents modes s'expliquent également par les propriétés des différentes couches traversées par les ondes de Rayleigh en fonction de leur longueur d'onde. Par exemple, pour le modèle 1, un changement de pente se produit à une longueur d'onde de 3.0 m tandis que pour le modèle 2, ce changement de pente se produit à une longueur d'onde de 5.0 m.

6.2.2 Présence d'anomalie

La présence d'une anomalie dans le profil de sol recouvrant l'inclusion rigide (ponceau) entraînera un changement dans les vitesses de propagations des ondes de Rayleigh. Pour une onde d'une fréquence donnée, ce changement de vitesse ne sera cependant pas le même dépendamment de la profondeur de l'anomalie. La figure 6.5 montre la variation de la longueur d'onde en fonction de la vitesse de phase pour deux anomalies ayant la même taille et les mêmes propriétés dynamiques, mais étant située à des profondeurs différentes comme le montre la figure 6.1.

La figure 6.5 permet de constater les éléments suivants :

- Lorsque l'anomalie se trouve à une profondeur de 1.7 m sous la surface du sol (modèle 3), des variations dans la vitesse de phase se produisent à partir d'une longueur d'onde d'un peu moins de 2.0 m.
- Lorsque l'anomalie se trouve à une profondeur de 4.7 m (modèle 4), des variations dans la vitesse de phase se produisent à partir d'une longueur d'onde d'un peu moins de 5.0 m.
- Des changements de la vitesse de phase ne se produisent donc que lorsque la longueur d'onde du mode R0 est égale ou supérieure à la profondeur de l'anomalie.

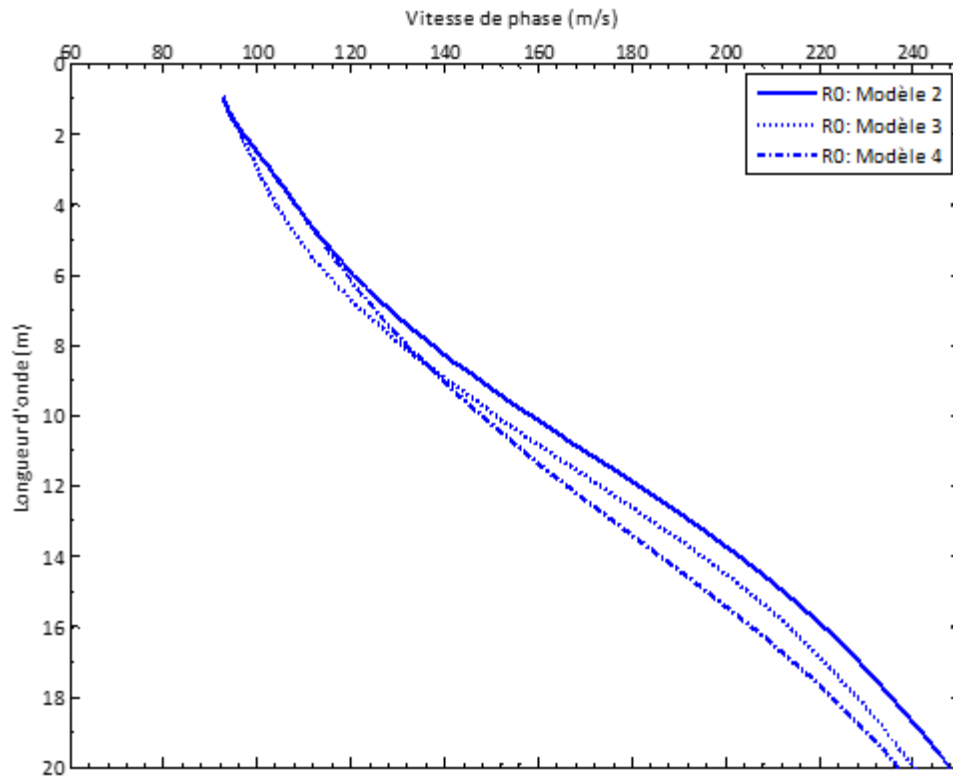


Figure 6.5. Variation de la longueur d'onde en fonction de la vitesse de phase pour le mode R0 des modèles 2, 3 et 4.

À l'aide de ces observations, il est possible de conclure que la profondeur de l'anomalie a un impact important sur la vitesse de propagation du mode fondamental (R0) des ondes de Rayleigh et que cet impact dépend de la profondeur de l'anomalie ainsi que de la longueur d'onde du mode R0.

6.3 Étude de l'effet du revêtement rigide

6.3.1 Introduction

Lorsque des méthodes d'inspections basées sur la propagation des ondes de surface sont utilisées pour caractériser un dépôt de sol, la présence d'un revêtement rigide (asphalte) à sa surface vient compliquer sa caractérisation lorsque la source se trouve sur le revêtement (Ryden et Lowe 2004). Cette complication se manifeste par l'apparition d'un mode de flexion et des modes supérieurs des ondes de Rayleigh, ainsi que de par la difficulté à exciter le sol en profondeur puisque l'énergie reste, en majorité, retenue dans la couche

rigide (Ryden et Lowe 2004; Karray et Lefebvre, 2009a). Toutefois, des récentes études ont prouvé que ces aspects peuvent être réduits et même parfois évités en plaçant la source sismique directement sur le sol et en gardant les capteurs à la surface du revêtement rigide. Bien qu'il fût montré que cette configuration permette la caractérisation du sol en profondeur, la présence du revêtement affecte néanmoins la propagation des ondes élastiques.

Afin de déterminer comment la présence d'un revêtement affecte l'énergie et la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh, un programme d'essais expérimentaux réalisés sur le modèle réduit ainsi que des simulations numériques 3D ont été réalisées sur des modèles avec et sans revêtement rigide. Ce programme permettra de montrer que l'effet du revêtement se traduit par une accélération globale du train d'ondes et que la profondeur du revêtement rigide affecte la distribution de l'énergie des différents modes des ondes de Rayleigh. La profondeur du revêtement vient aussi favoriser le problème de mélange des modes, puisque l'énergie des ondes de Rayleigh aura tendance à se propager davantage sur les modes supérieurs. Il sera également montré que la profondeur du dépôt du sol et ses propriétés influence davantage les vitesses de propagations des ondes de Rayleigh du mode R0 que l'épaisseur et les propriétés du revêtement. Finalement, il sera démontré que l'influence du revêtement sur les vitesses de groupe et de phase dépend de la fréquence avec laquelle se propagent les ondes de Rayleigh.

6.3.2 Étude expérimentale de l'effet du revêtement

La figure 6.6 présente les courbes de dispersion calculées avec la distribution temps-fréquence des signaux enregistrés à une distance 1.6 m de la source des modèles E1 et E2. La position 1.6 m est localisée au milieu de la crête du modèle. C'est cette même position qui a été considérée pour l'analyse des signaux obtenus numériquement avec FLAC3D. La figure 6.6 montre la présence d'énergie réfléchiée par les murs latéraux du modèle. Cette énergie apparaît à une vitesse de groupe de l'ordre de 35 m/s, et est visible sur le plan vitesse de groupe-fréquence des deux modèles E1 et E2.

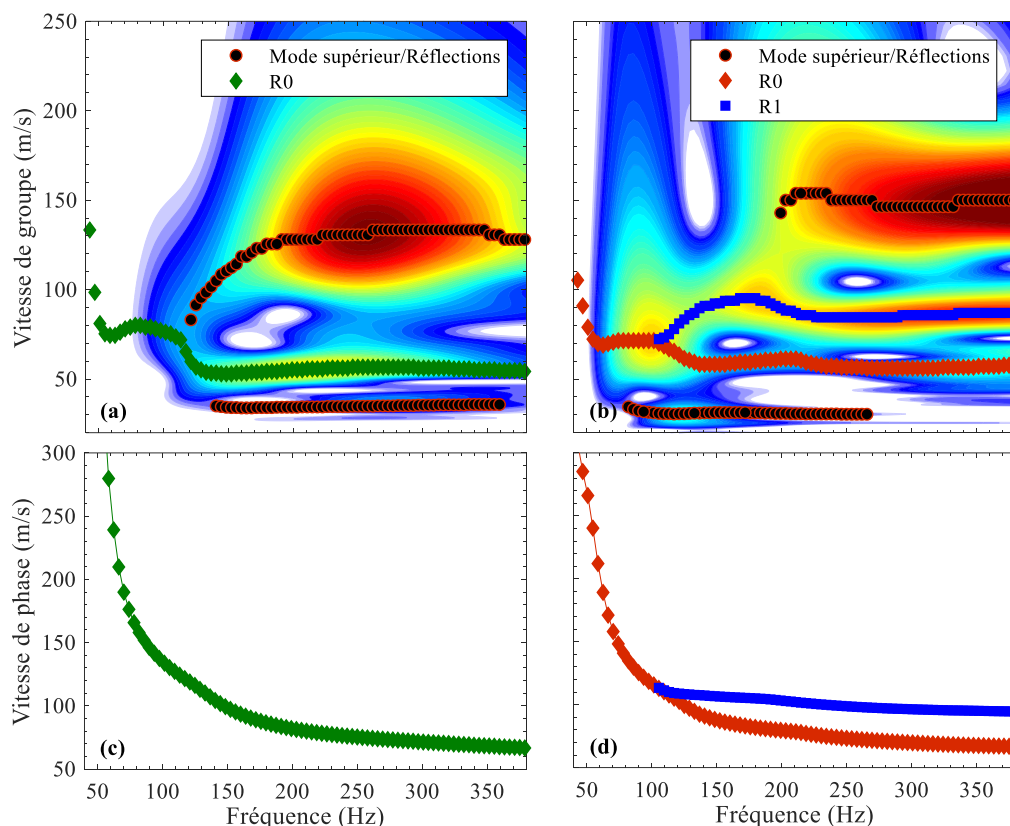


Figure 6.6. Distribution d'énergie et vitesse de groupe calculé à 1.6 m de la source des modèles expérimentaux : (a) E1, (b) E2. Courbes de dispersion de la vitesse de phase du mode R0 identifiées des modèles : (c) E1 et (d) E2.

Tableau 6.2. Résumé de la configuration des 2 modèles expérimentaux étudiés.

	E1	E2
Épaisseur du sol (m)	1.0	1.0
Épaisseur du revêtement (m)	0	0.05
Proportion revêtement/sol (%)	-	5

La comparaison entre la figure 6.6a et 6.6b permet de constater que la présence du revêtement rigide vient changer la distribution de l'énergie présente dans les différents groupes d'ondes visibles dans le plan vitesse-fréquence. Pour le modèle E1 (fig. 6.6a), le fait qu'un mode supérieur comporte plus d'énergie au-dessus de 115 Hz, ne vient pas empêcher la séparation et l'identification de chacun des modes présents sur le signal, puisqu'ils ces derniers sont suffisamment espacés sur le plan vitesse de groupe – fréquence.

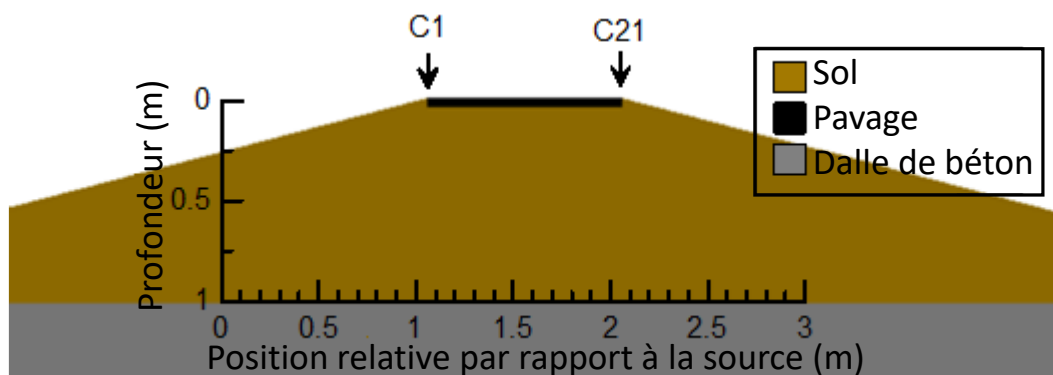


Figure 6.7. Courbes de d Coupe à travers les plans X-Z des modèles numériques. Les axes indiquent les dimensions du modèle et la position par rapport à l'emplacement de la source qui se trouve à la position 0 m.

Avec la présence du revêtement rigide (Modèle E2 – fig.6.6b), le mélange de modes est plus susceptible de se produire au-dessus de 100 Hz, puisqu'un mode supérieur contenant plus d'énergie que le mode R0 apparaît à une faible distance de celui-ci. L'utilisation d'une fenêtre adéquate est essentielle pour bien identifier, localiser et séparer les modes (Tremblay, 2017). L'impact d'une mauvaise localisation du mode R0 sur l'estimation de la vitesse de phase est illustré à la figure 6.6d, conduisant à une surestimation de 80% de la vitesse de phase pour certaines fréquences comme en témoigne la courbe de dispersion de vitesse de phase, illustrée sur la figure 6.6d, calculée avec le mode R1 en comparaison avec celle calculée avec R0 (6.6b).

6.3.3 Étude numérique de la signature du revêtement

Afin d'étudier l'effet du revêtement rigide, 7 modèles numériques, dont la configuration est résumée au tableau 6.3, ont été exécutés. Pour les modèles N1, N2, N3 et N4, la hauteur totale du modèle (hauteur du sol et hauteur du revêtement rigide) a été fixée à 1.0 m et l'épaisseur de la couche rigide varie entre 0 à 0.15 m avec un incrément de 0.05m. Pour les modèles N1, N5, N6 et N7, c'est la hauteur du sol qui a été fixée à 1.0 m, tandis que l'épaisseur du revêtement varie entre 0 à 0.15 m avec un incrément de 0.05m. La hauteur totale des modèles N1, N5, N6 et N7 n'est donc pas la même.

Tableau 6.3. Résumé de la configuration des 7 modèles numériques.

	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7
Épaisseur du sol (m)	1.0	0.95	0.8	0.75	1.0	1.0	1.0
Épaisseur du revêtement (m)	0	0.05	0.1	0.15	0.05	0.1	0.15
Proportion revêtement/sol (%)	-	5.26	12.5	20	5	10	15

Les figures 6.8 et 6.9 montrent les courbes de dispersion, en termes de V_g et V_{ph} , calculées à partir des signaux obtenus avec les modèles numériques N1, N2, N3 et N4, à une distance de 1.6 m de la source. La position 1.6 m est localisée au milieu de la crête du talus (fig. 6.7). Pour chaque modèle, la distribution de l'énergie des différents groupes d'onde présents dans le signal est illustrée à la figure 6.8. Cette figure montre également la position du mode R0 ainsi des ondes appartenant à des modes supérieurs des ondes de Rayleigh ou des ondes réfléchies par les murs latéraux des modèles. En absence de revêtement rigide (modèle N1, fig. 6.8a), l'énergie est majoritairement localisée entre 150 et 300 Hz et appartient au mode R0.

Un mode supérieur, se propageant avec une plus grande vitesse de près de 90m/s, et sur des fréquences plus élevées que 185 Hz, est aussi présent. De l'énergie appartenant à des ondes réfléchies et se trouvant à des vitesses de 43 m/s est aussi présente sur les figures 6.8a, 6.8b, 6.8c et 6.8d. Ces figures montrent aussi que la présence de revêtement rigide à la surface des modèles vient modifier la distribution d'énergie de façon à ce que plus d'énergie se trouve à des plus faibles fréquences (au-dessous de 150 Hz). Également, la distribution de l'énergie entre le mode R0 et le mode supérieur dépend de la profondeur du revêtement rigide. En effet, lorsque l'épaisseur du revêtement est de 0.15 m, la majorité de l'énergie des ondes de Rayleigh se propage sur un mode supérieur à des fréquences au-dessus de 140 Hz. Cependant, même si elles transportent moins d'énergie, les ondes se propageant sur le mode R0 sont toujours présentes à des fréquences inférieures à 140 Hz comme illustré à la figure 6.8d. La figure 6.9a, montre les courbes de dispersion en vitesses de phase des modes R0 identifiés sur la figure 6.8, alors que la figure 6.9b montre les différences, en pourcentage, entre la vitesse de phase de mode R0 des différents modèles avec revêtement rigide (N2, N3 et N4), par rapport au modèle sans revêtement (N1).

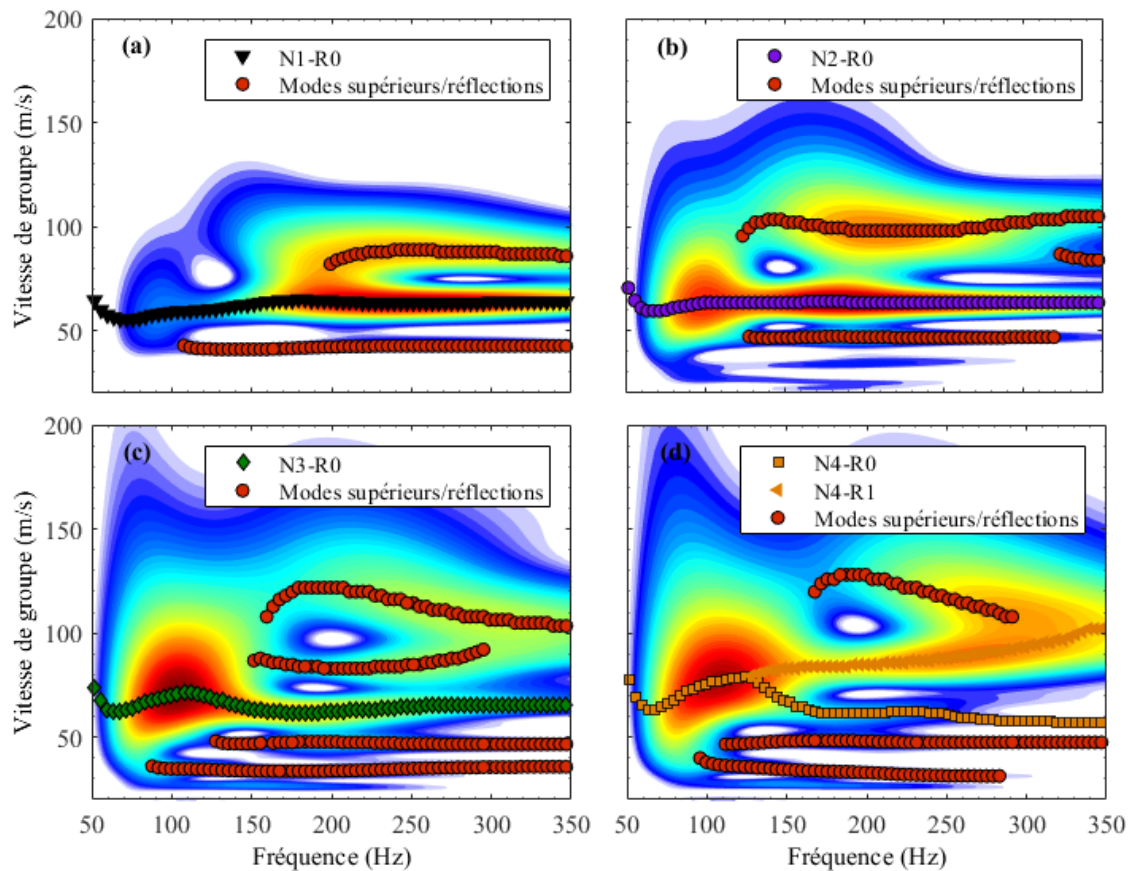


Figure 6.8. La distribution d'énergie et la vitesse de groupe calculées à une distance de 1.6 m de la source des modèles numériques : (a) N1, (b) N2, (c) N3 et (d) N4. Les marques indiquent la localisation où le mode R0, les modes supérieurs et les réflexions ont été identifiés sur le VFP comme mentionnés sur les légendes des graphes.

Comme le montre la figure 6.9b, il est à noter que la présence du revêtement rigide entraîne une variation de la vitesse de phase qui varie selon la fréquence. En effet, l'augmentation de la vitesse des ondes, causé par la présence du revêtement est plus important pour les ondes se propageant à basses fréquences.

La figure 6.9b montre l'impact d'une mauvaise identification du mode R0 sur l'estimation de la vitesse de phase, qui est surestimé par plus de 20% dans le cas où un autre mode (R1) aurait été utilisé pour le calcul de la vitesse de phase.

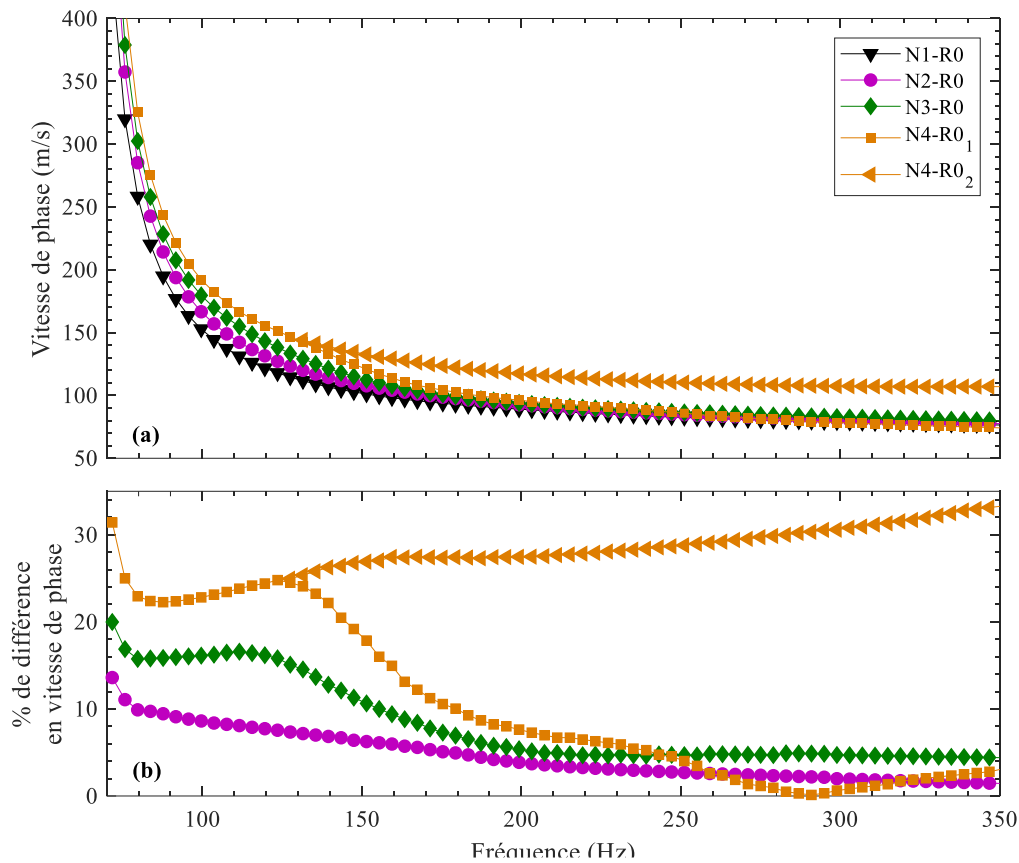


Figure 6.9. Courbes de dispersion de la vitesse de phase du mode R0 calculée en se basant sur la vitesse de groupe identifiée à la figure 6. (b) Différence en pourcentages entre la vitesse de phase du modèle N1 et des modèles N2, N3 et N4.

Pour les modèles numériques N5, N6 et N7, le revêtement rigide est situé directement sur la couche de sol dont la hauteur a été fixée à 1.0 m (tab. 6.3). Les figures 6.10 et 6.11 montrent les courbes de dispersion, en termes de V_g et V_{ph} , calculées à partir des signaux obtenus avec les modèles numériques N1, N5, N6 et N7, à une distance de 1.6 m de la source. Comme le montre la figure 6.10, tout comme pour les modèles N2, N3 et N4, la présence du revêtement rigide à la surface des modèles N5, N6 et N7 vient changer la distribution de l'énergie des ondes. Cependant, et spécifiquement pour N6 et N7, la présence du revêtement rigide risque peu de provoquer un mélange de modes puisque comparés à N3 et N4, il y a moins d'énergie renvoyée aux modes supérieurs (fig. 6.10c-6.10d comparées à fig. 6.8c-6.8d).

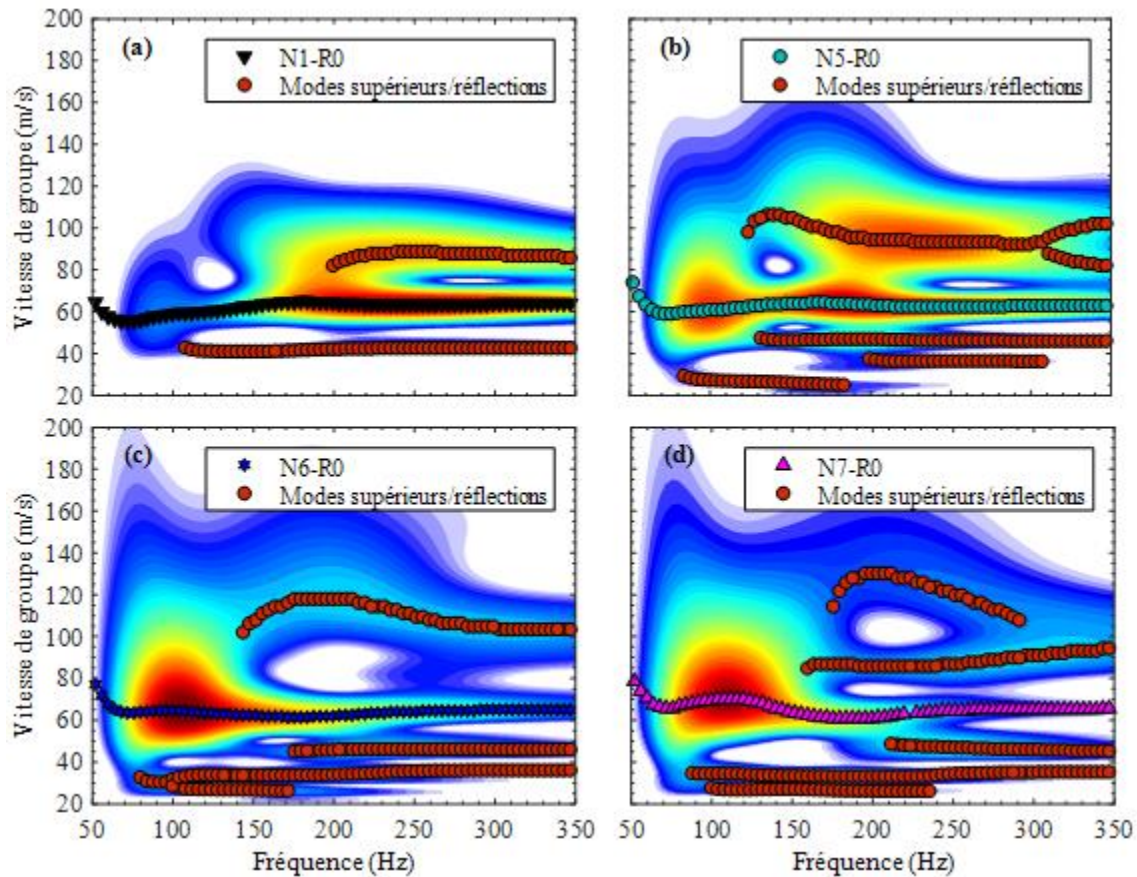


Figure 6.10. La distribution d'énergie et la vitesse de groupe calculées à une distance de 1.6 m de la source des modèles numériques : (a) N1, (b) N5, (c) N6 et (d) N7. Les marques indiquent la localisation où le mode R0, les modes supérieurs et les réflexions ont été identifiés sur le VFP comme il est mentionné sur les légendes des graphes.

Tableau 6.4. Propriétés élastiques des différents matériaux.

	Module d'élasticité (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Densité (kg/m ³)
Revêtement	400	200	2200
Sol	8	30	2000
Béton	400	200	2200
Anomalie	0.75	0.26	1000

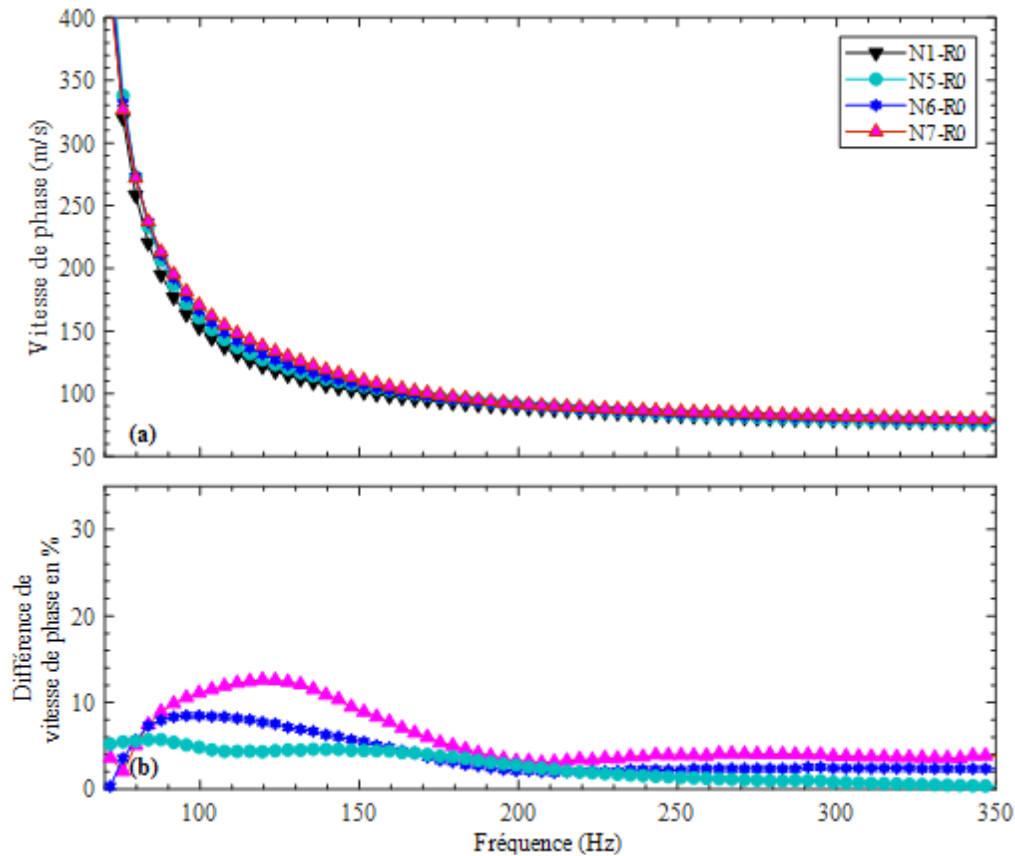


Figure 6.11. Courbes de dispersion des vitesses de phase des modes R0 calculées en se basant sur les vitesses de groupe identifiées à la figure 6.10 (b) Différence en pourcentages entre la vitesse de phase du modèle N1 et des modèles N5, N6 et N7.

La figure 6.11a illustre les courbes de dispersion des vitesses de phase des modes R0 identifiés sur la figure 6.10, alors que la figure 6.11b illustre les différences, en pourcentage, entre la vitesse de phase de mode R0 des différents modèles avec revêtement rigide N5, N6 et N7, par rapport au modèle sans revêtement (N1). Bien que l'épaisseur du revêtement rigide varie dans les modèles N5, N6 et N7, la figure 6.11b montre que sa présence n'induit qu'une légère variation des vitesses de phase en comparaison aux modèles N2, N3 et N4 (fig. 6.9b).

Il est également important de remarquer que les courbes de dispersion en vitesse de phase des modèles N1, N5, N6 et N7, sont presque parallèles à l'axe vertical (axe de vitesse) aux alentours de 70 Hz, se distinguant ainsi des modèles N2, N3 et N4 (fig. 6.9b) où les courbes de dispersion en vitesse de phase sont parallèles à l'axe vertical, mais à des fréquences

différentes. Ainsi, la figure 6.9b, permet de remarquer qu'une diminution de l'épaisseur du sol cause une augmentation de la fréquence à laquelle la courbe de dispersion en vitesse de phase devient presque parallèle à l'axe vertical. Cependant, lorsque l'épaisseur de la couche de sol reste la même, mais que l'épaisseur du revêtement varie, la fréquence à laquelle la courbe de dispersion en vitesse de phase devient presque parallèle à l'axe vertical demeure inchangée. Il est donc possible de conclure que l'épaisseur de la couche de sol a davantage d'influence sur la propagation des ondes de Rayleigh que l'épaisseur du revêtement.

Théoriquement, comme démontré à la section 6.2, les courbes de dispersions en vitesse de phase des modèles N2, N3 et N4 sont une version décalée vers la droite le long de l'axe des fréquences de la courbe du modèle N1 alors que les courbes de dispersions en vitesse de phase des modèles N5, N6 et N7 sont une version décalée vers le haut le long de l'axe des vitesses de la courbe du modèle N1 et c'est ce qu'on a observé sur les figures 6.9a et 9.11a.

Ces observations concordent avec le fait qu'à de basses fréquences, la courbe de dispersion en vitesse de phase du mode R0 doit atteindre la vitesse de phase de la couche inférieure du modèle (une dalle de béton dans le cas des modèles numériques et du modèle physique), tel qu'il est démontré par Tolstoy (1973). Le contraste de rigidité (tab. 6.4) élevé entre le sol et le béton est responsable de la variation rapide de la vitesse de phase qui est presque parallèle à l'axe vertical à des fréquences bien spécifiques telles qu'on peut l'observer sur les figures 6.9a et 6.11a.

Finalement, comme il a été montré dans cette section, lors de la caractérisation d'un dépôt de sol, la présence d'un revêtement rigide vient changer la distribution de l'énergie des ondes de Rayleigh et tend également à faire augmenter leur vitesse de propagation. La cause de ces variations d'énergies et de vitesse peut être montrée à l'aide de simulations numériques comme le montre la figure 6.12. En effet, la comparaison entre un train d'onde qui se propage dans un sol et un train d'onde qui se propage dans un sol superposé d'un revêtement rigide permet de remarquer qu'en présence d'un revêtement, une partie de l'énergie du train d'ondes se propage à travers ce dernier.

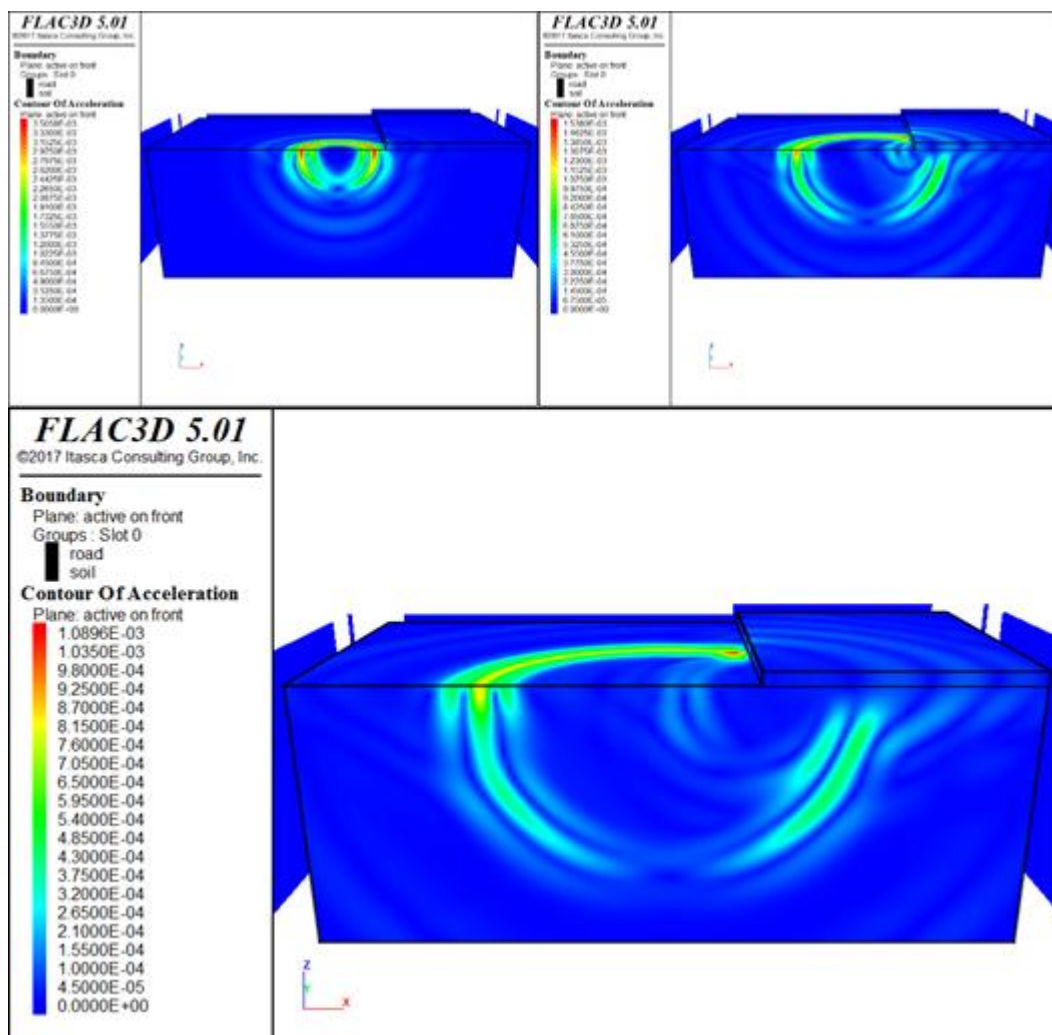


Figure 6.12. Effet d'accélération du front d'onde induit par le revêtement rigide (à gauche) en comparaison à un front d'onde véhiculé par le sol (à droite) simulé numériquement.

La présence d'énergie dans le revêtement explique pourquoi la distribution de l'énergie dans le plan vitesse-fréquence n'est pas la même pour les modèles avec et sans revêtements (figs. 6.6, 6.8 et 6.10).

Également, le train d'onde se propageant à travers le sol superposé d'un revêtement est en avance par rapport au train d'onde seulement à travers le sol ce qui explique les augmentations de vitesses observées dans les figures 6.9 et 6.11.

6.4 Étude de la signature une cavité/anomalie

6.4.1 Introduction

Lors de l'inspection d'un remblai routier situé au voisinage d'un ponceau en vue de détecter des anomalies, une des difficultés réside dans l'identification du type d'anomalie. La question qui s'impose est : est-ce que la signature peut être différente dépendamment de la nature de l'anomalie en question : une cavité vide ou une zone érodée (décompactée, de faible densité en comparaison au sol avoisinant). La réponse à cette question permettra d'améliorer de manière significative les objectifs des inspections. En effet, une cavité est souvent synonyme d'un problème en phase avancée qui nécessite une intervention d'urgence alors qu'une zone décompactée peut indiquer que le processus de formation de cavité est encore à ses débuts et qu'il est souvent possible d'arrêter sa progression avec un coût moindre.

Un programme expérimental (modèle réduit) et numérique a été entrepris, pour essayer d'étudier l'effet d'une anomalie et de voir s'il est possible de distinguer entre une cavité et une zone décompactée. À cette étape de l'étude, seul l'aspect de la signature d'un vide (cavité) a été étudié dans le cas expérimental. Dans ce cas, la présence d'un vide se manifeste par une augmentation des vitesses de groupe et de phase aux fréquences qui correspondent aux longueurs d'onde interagissant avec le vide. Il était démontré aussi que dépendamment de la taille du vide, donc de l'énergie réfléchie, les énergies des ondes vibrant sur les modes supérieurs sont de plus en plus importantes.

En ce qui concerne l'effet d'une zone de faible densité sur la propagation des ondes, seule la partie numérique a été réalisée et présentée jusqu'ici. Cet aspect sera examiné expérimentalement à la fin des essais expérimentaux en cas de cavités, par le remplissage de ces derniers par un matériau ayant une certaine rigidité (exemple : mousse expansive). Ainsi, il a été observé à l'aide de l'étude numérique que la présence d'une zone de faible densité se manifeste plutôt par une réduction des vitesses de groupe et de phase. Le pourcentage de cette diminution est proportionnel à la dimension de la zone décompactée.

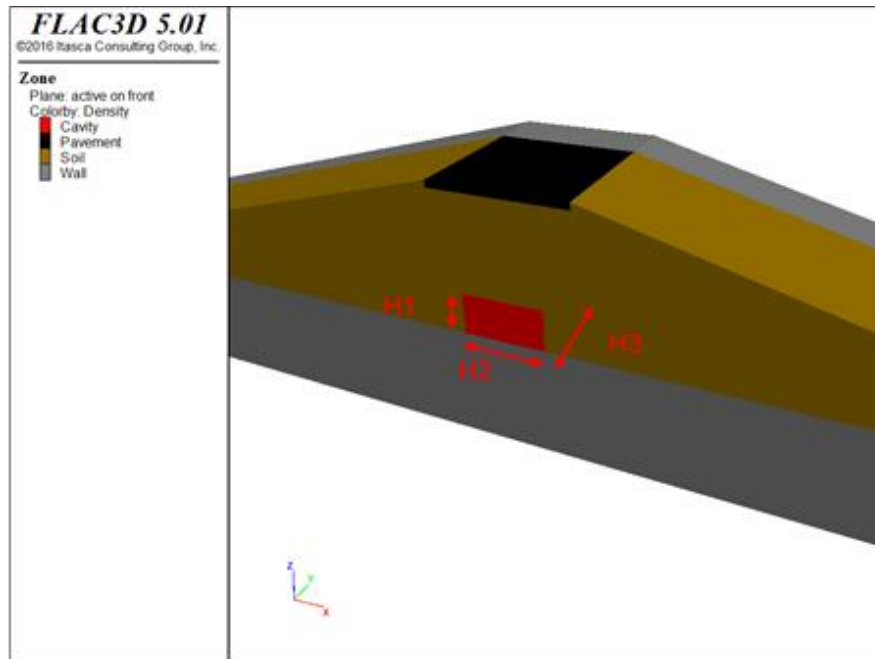


Figure 6.13. Vue latérale d'une coupe à travers le plan X-Z des modèles 3D.

6.4.2 Étude numérique de la signature d'une anomalie

La possibilité de caractériser un remblai routier dans le but de détecter une anomalie, a été examinée à l'aide des 6 modèles numériques N1, N2, N3, N4, N5 et N6, dont les configurations sont résumées au tableau 6.5 et illustrées aux figures 6.13 et 6.14. Les propriétés des différentes couches sont celles du tableau 6.4. Il est à noter que, même si les méthodes numériques sont mieux adaptées pour simuler la présence des anomalies et des discontinuités latérales que les méthodes analytiques, simuler un vide reste problématique et difficile à mettre en œuvre à cause des problèmes de distorsions numériques qui peuvent survenir lors des simulations. Deux approches ont été adoptées dans le cadre des simulations numériques effectuées lors de cette étude. Ces deux approches ont permis d'obtenir un comportement plus proche des observations expérimentales, d'atténuer les réflexions et la radiation d'énergie qui se produisent numériquement sur les limites du vide. La première approche consiste à simuler une cavité avec un matériau de très faibles propriétés mécaniques et une densité non nulle (chap. 6). La deuxième approche consiste à ajouter des zones de transition autour du vide dont les propriétés se dégradent au fur et à mesure que la zone s'approche du vide (chap.7).

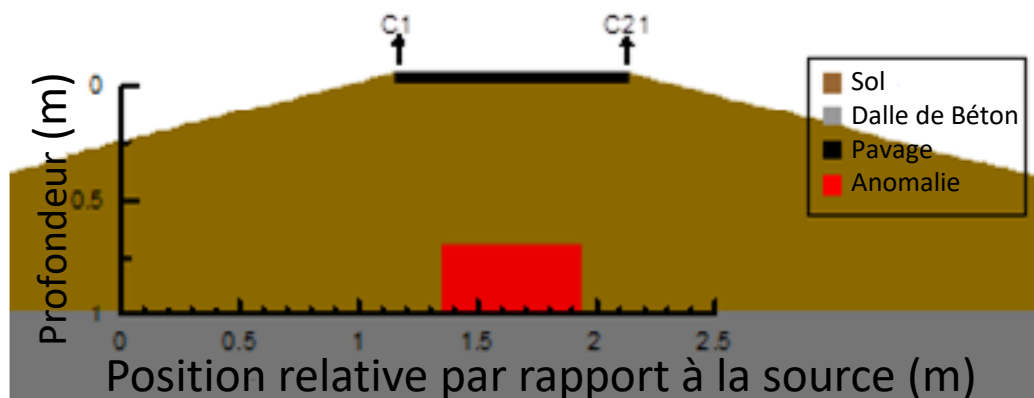


Figure 6.14. Coupe à travers le plan X-Y des modèles numériques. Les axes indiquent les dimensions du modèle et la position par rapport à l'emplacement de la source qui se trouve à la position 0 m.

Tableau 6.5. Résumé de la configuration des 6 modèles numériques (les dimensions H1, H2 et H3 sont définies à la figure 6.13).

	Revêtement	Anomalie	H1(m)	H2(m)	H3(m)
N1	Non	Non	0	0	0
N2	Non	Oui	0.3	0.6	0.6
N3	Non	Oui	0.3	1	1
N4	Oui	Non	0	0	0
N5	Oui	Oui	0.3	0.6	0.6
N6	Oui	Oui	0.3	1	1

Les courbes de dispersion en termes de V_g et V_{ph} , illustrées aux figures 6.15 et 6.16, sont calculées à partir de signaux numériques obtenus à 1.6 m de la source, donc au milieu du talus. Pour illustrer l'effet d'une anomalie dans un remblai routier sur la vitesse de propagation des ondes, la figure 6.15 présente les courbes de dispersion des modèles N1, N2 et N3, (sans revêtement rigide), alors que la figure 6.16, présente les courbes de dispersion des modèles N4, N5 et N6 (avec revêtement rigide). Comme démontré expérimentalement et numériquement dans la section 6.3, la présence d'un revêtement rigide n'a pas d'effet significatif sur les vitesses des ondes qui se propagent à des basses fréquences. En effet, les vitesses de groupe et de phase des modèles N1 et N4 sont similaires à des fréquences inférieures à 140 Hz (Fig. 6.15 et 6.16).

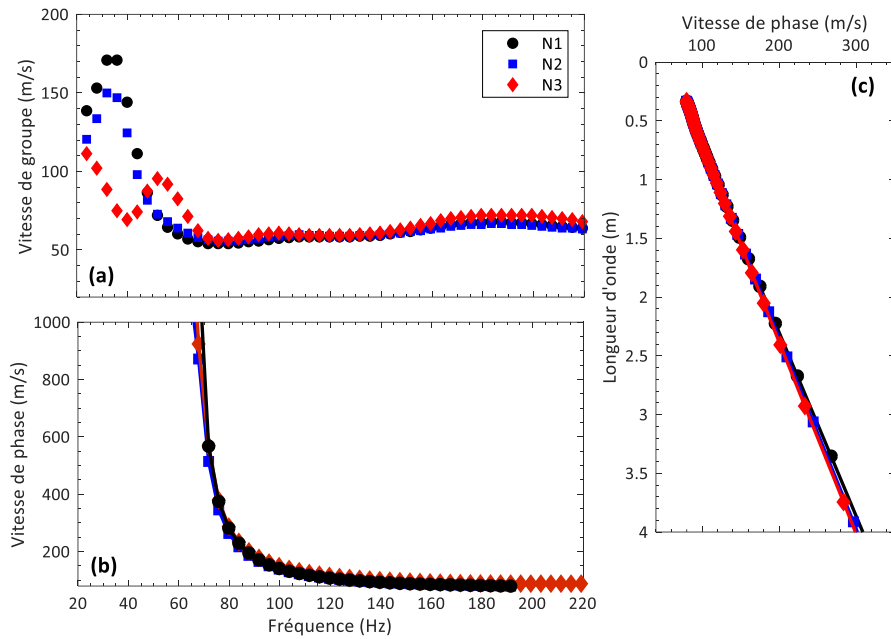


Figure 6.15. Courbes de dispersion du mode R0 calculé à partir d'un signal localisé à 1.6 m de la source du modèle N1, N2 et N3 (sans pavage) exprimées : (a) V_g vs fréquence (b) V_{ph} vs fréquence et (c) V_{ph} vs longueur d'onde (λ).

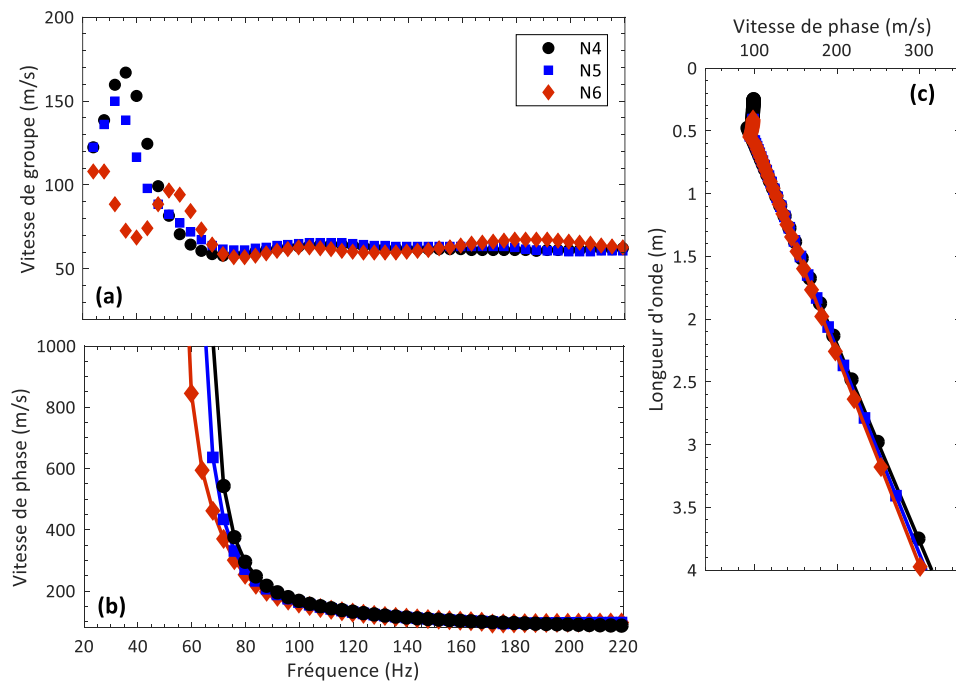


Figure 6.16. Courbes de dispersion du mode R0 calculé à partir d'un signal localisé à 1.6 m de la source du modèle N4, N5 et N6 (avec pavage) exprimées : (a) V_g vs fréquence (b) V_{ph} vs fréquence et (c) V_{ph} vs longueur d'onde (λ).

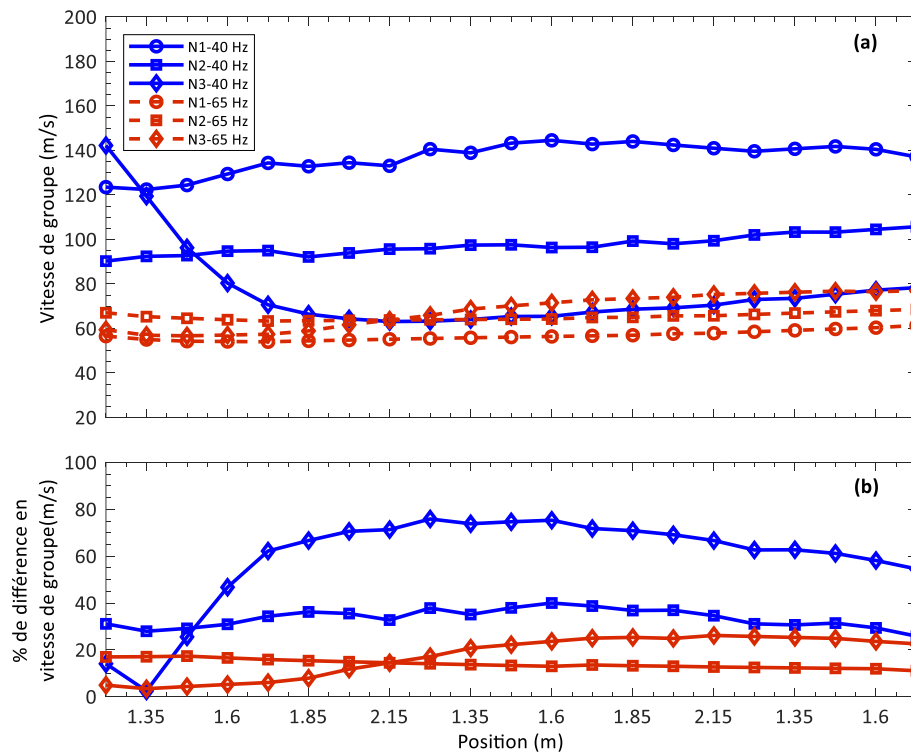


Figure 6.17. Variation de la V_g calculée à 40 Hz (lignes bleues) et 65 Hz (lignes rouges) à la surface des modèles N1, N2 et N3. (b) Différence, en pourcentage, entre V_g de N1 et N2 (carrés) et entre N1 et N3 (losanges).

La partie de la courbe de dispersion qui présente des vitesses de phase qui augmentent avec la diminution de la longueur d'onde (augmentation de la fréquence) à cause de la présence du revêtement rigide (observée expérimentalement aux modèles E2) apparaît aussi sur les courbes de dispersion des modèles N4, N5 et N6 (fig. 6.16).

Pour les deux cas, sans et avec pavage rédige, la présence d'anomalie est visible à travers les différentes courbes de dispersion (fig. 6.15 et fig. 6.16) et induit des diminutions importantes dans les vitesses, spécifiquement, à des fréquences inférieures à 100Hz. En comparant les courbes de dispersion (V_g ou V_{ph}) des modèles N2-N3 et des modèles N5-N6, on note que la différence entre les courbes de dispersion par rapport aux modèles sans anomalie (N1 et N4 respectivement) est liée aux dimensions de cette dernière. Également, l'effet induit par la présence d'une anomalie sur les vitesses de groupe et de phase est facilement repérable en absence de pavage (Fig. 6.15). Toutefois, sa présence n'empêche pas la détection d'anomalie (Fig. 6.16). De plus, pour les conditions du sol et du pavage

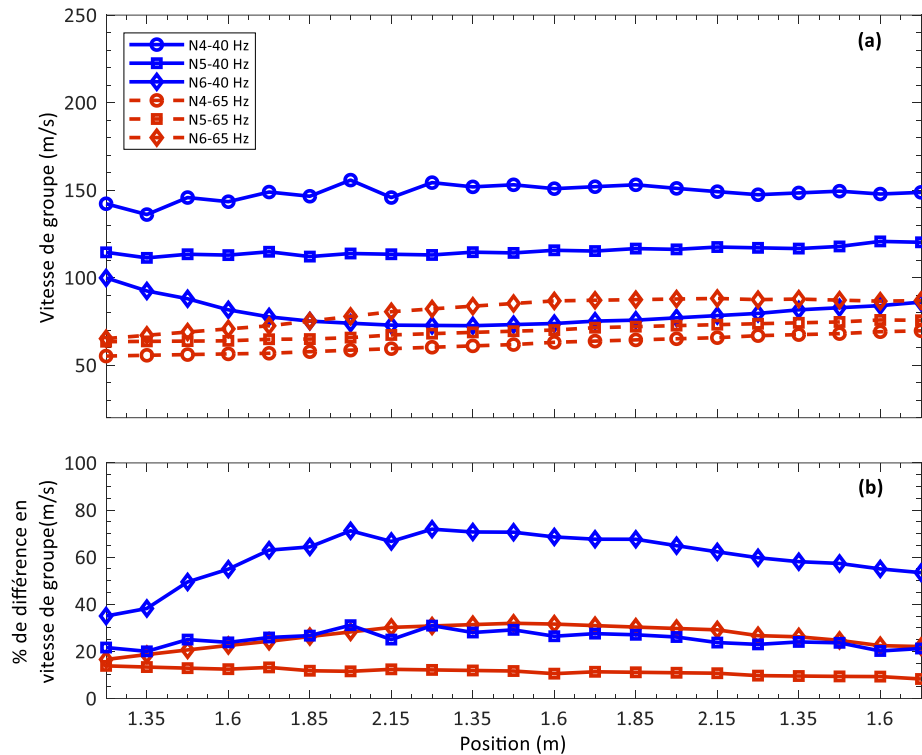


Figure 6.18. Variation de la V_g calculée à 40 Hz (lignes bleues) et 65 Hz (lignes rouges) à la surface des modèles N4, N5 et N6. (b) Différence, en pourcentage, entre V_g de N4 et N5 (carrés) et entre N4 et N6 (losanges).

du modèle physique réduit, c'est-à-dire pour un sol peu profond et un pavage d'une faible épaisseur, la présence du pavage semble favorable à la détection de cavité. Il serait intéressant de vérifier cet aspect sur un site expérimental en présence d'un pavage en enrobé bitumineux.

Les analyses effectuées jusqu'ici montrent que l'effet induit par une composante du système de remblai routier (pavage/sol/ anomalie, ponceau) sur la vitesse de propagation des ondes élastiques dépend de la fréquence, donc de la longueur d'onde. Les figures 6.17 et 6.18 viennent illustrer la variation de la vitesse de groupe, à 40 Hz en bleu et 65 Hz en rouge, à différentes positions de la source le long des modèles sans revêtement rigide (fig. 6.18) et avec revêtement rigide (fig. 6.17). Il est important de noter que les vitesses de phase à des fréquences inférieures à 70 Hz n'apparaissent pas sur les figures 6.15b et 6.16b. Seules les vitesses de groupe seront considérées pour le cas du modèle réduit. Afin d'apprécier l'effet de la présence d'une anomalie sur la variation de la vitesse de groupe,

les différences entre les vitesses de groupe des modèles avec anomalie (N2-N3 et N5-N6) par rapport à ceux sans anomalie (N1 et N4) ont été calculées en fonction de la position. Ces différences ont été déterminées à deux fréquences, soit 40 Hz et 65 Hz. Ces deux fréquences sont théoriquement situées dans la bande de fréquence où il y a la présence d'un seul mode de vibration (soit le mode fondamental des ondes de Rayleigh – plus bas que la phase de Airy). À partir des variations des vitesses de groupe montrées aux figures 6.17 (cas sans pavage) et 6.18 (cas avec pavage), on peut tirer les remarques suivantes :

- La vitesse de groupe varie de façon importante dépendamment de la taille de l'anomalie à 40 Hz, cette variation atteint 75% et 72% entre le modèle N1 et N3 et entre le modèle N4 et N6, respectivement (cavités les plus volumineuses).
- Pour les anomalies de petite taille, donc le modèle N2 et N5, la différence maximale atteinte par rapport aux modèles sans cavités (N1 et N4) est de 40 et 31%, respectivement.
- À 65 Hz, la présence d'une anomalie a , aussi, induit une variation de la V_g , mais d'une manière moins importante qu'à 40 Hz.
- À 65 Hz, le maximum de différence atteint, entre le modèle N1 et N2 et entre le modèle N4 et N5, est de 17% et 13% respectivement.
- À 65 Hz, le maximum de différence atteint, entre le modèle N1 et N3 et entre le modèle N4 et N6, est de 26% et 32% respectivement.
- La présence de revêtement rigide n'a pas affecté, significativement, la vitesse des ondes se propageant à 40 et 65 Hz.

En conclusion, même si la présence d'un revêtement rigide induit une barrière à la génération d'onde dans le sol (empêchant la caractérisation du sol en profondeur), ce problème peut être contourné en plaçant la source directement sur le sol et en gardant les capteurs sur la couche rigide. Avec cette configuration et à travers le modèle expérimental et numérique, l'effet du revêtement a été étudié, pour montrer que ce dernier n'empêche pas la caractérisation du sol en profondeur ouvrant ainsi la voie à la détection des anomalies localisées dans le sol. Ainsi, la présence de cavité (avec et sans pavage à la surface) induit une différence notable des vitesses de groupe du mode fondamental des ondes de Rayleigh (R0) calculées à certaines fréquences.



Figure 6.19. Les 6 prélèvements de sol effectués pour l'étude expérimentale d'une cavité localisée au voisinage d'un ponceau.

6.4.3 Étude expérimentale de la signature d'une cavité

Après avoir examiné expérimentalement dans un premier lieu, la signature du revêtement et dans un deuxième lieu celle du ponceau, la première trappe (fig. 6.19), celle du dessus, du modèle réduit expérimental, a pu être ouverte, afin de pouvoir prélever du sol, et créer une première cavité, et ainsi pouvoir étudier la signature d'une cavité sur le front d'onde mesuré à la surface du sol. Au total, 6 prélèvements de sol ont été effectués jusqu'au moment de l'écriture de ce rapport (fig. 6.19). Le poids et la hauteur de la cavité ont été mesurés, permettant ainsi d'avoir une bonne estimation du volume de cette dernière.

La figure 6.20 présente la distribution d'énergie dans le plan vitesse de groupe – fréquence, ainsi que le mode R0 identifié (carré bleu) et un autre mode supérieur (carré rouge) pour le cas sans cavité (fig. 6.20a) et les trois cas avec cavités de différentes dimensions : 6 cm pour la figure 6.20b, 10 cm pour la figure 6.19c et 15 cm pour la figure 6.20d. Ces figures montrent que la présence d'une cavité modifie la distribution d'énergie en renvoyant une partie de l'énergie sur un mode supérieur des ondes de Rayleigh. En absence de cavité, l'énergie appartenant au mode supérieur R1 est au plus faible (fig. 6.20a).

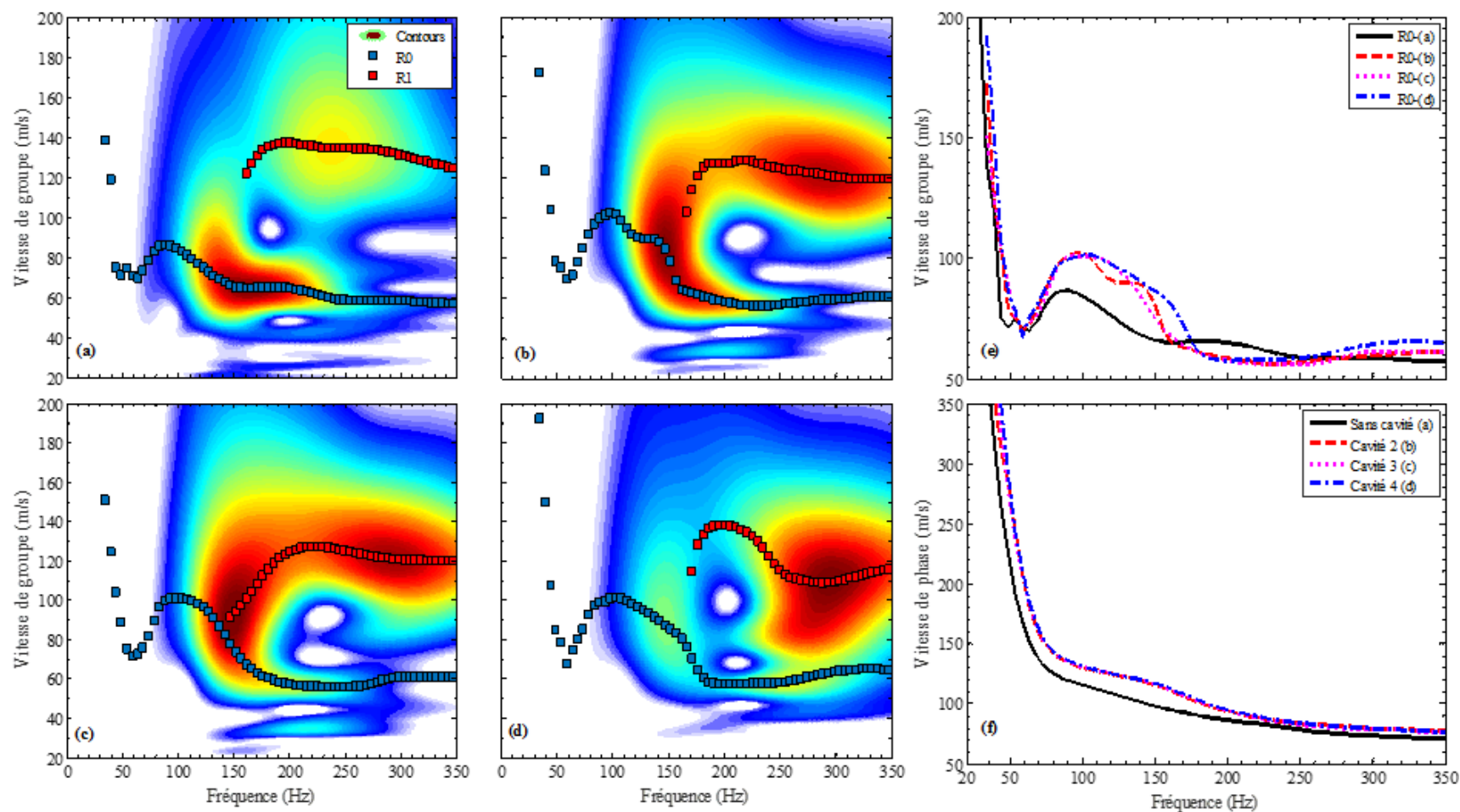


Figure 6.20. La distribution d'énergie et la vitesse de groupe calculées à une distance de 1.6 m de la source avec le modèle physique réduit : (a) sans cavité, (b) avec une cavité de 6 cm, (c) avec une cavité de 10 cm (d) avec une cavité de 15 cm. Courbes de dispersion des vitesses (e) de groupe et (f) de phase du mode R0 identifiés.

En présence de cavité, on constate la présence d'une plus grande énergie sur le mode supérieur R1 sans toutefois voir une variation significative pour les cavités de 6 cm et de 10 cm (fig. 6.20b à fig. 6.20c). Dans le cas de la cavité de 15 cm, une bonne partie de l'énergie se retrouve sur le mode supérieur R1 des ondes de Rayleigh. Le mode R0, quant à lui, reste toujours identifiable malgré la faible quantité d'énergie (fig. 6.20d).

La signature d'une cavité est similaire à celle d'un réflecteur qui réfléchit les ondes et qui semble renvoyer l'énergie sur des modes supérieurs des ondes de Rayleigh, dépendamment de son volume et de ses dimensions. Cet effet, simulé numériquement, est illustré à la figure 6.21, où on voit une partie du front d'onde réfléchi à la surface par la cavité (fig. 6.21c et 6.21d à gauche) en comparaison à l'effet qui ressemble à une absorption de l'énergie provoquée par la zone de faible densité ou décompactée (fig. 6.21c et 6.21d à droite). La chute de vitesse de phase et de groupe observée avec les modèles N3, N4, N5 et N6, soit aux figures 6.15 et 6.16 est la signature typique d'une zone décompactée. Lorsqu'un front d'onde entre en contact avec une telle zone, il semblerait qu'une partie de son énergie est atténuée, conséquence à l'amortissement élevé (en comparaison au sol plus intact avoisinant) des zones décompactées. Les fréquences (ou les longueurs d'onde) qui subissent une atténuation sont les fréquences les plus affectées par l'anomalie donc qui se propagent à l'intérieur. Vu le contraste de rigidité entre le sol avoisinant l'anomalie et l'anomalie, des réflexions sont susceptibles d'apparaître et accélérer ainsi la vitesse des fréquences légèrement plus élevées (donc des longueurs d'onde légèrement plus courtes) que ceux dont la vitesse est atténuée. Ce phénomène est plus visible est facilement décelable sur les courbes de dispersion des vitesses de groupe que des vitesses de phase (fig. 6.20e en comparaison à fig. 6.20 et fig. 6.15a et 6.16a en comparaison à fig. 6.15b et 6.16b, respectivement).

En présence d'un vide, l'énergie est réfléchi ce qui semble se traduire par une accélération de l'énergie aux fréquences concernées. L'effet induit par une cavité est aussi visible à travers des courbes de dispersion des vitesses de groupe à la figure 6.20e. Sur cette figure, en présence de cavité, l'énergie au voisinage de 90 Hz est accélérée et passe de 80 m/s à 100 m/s.

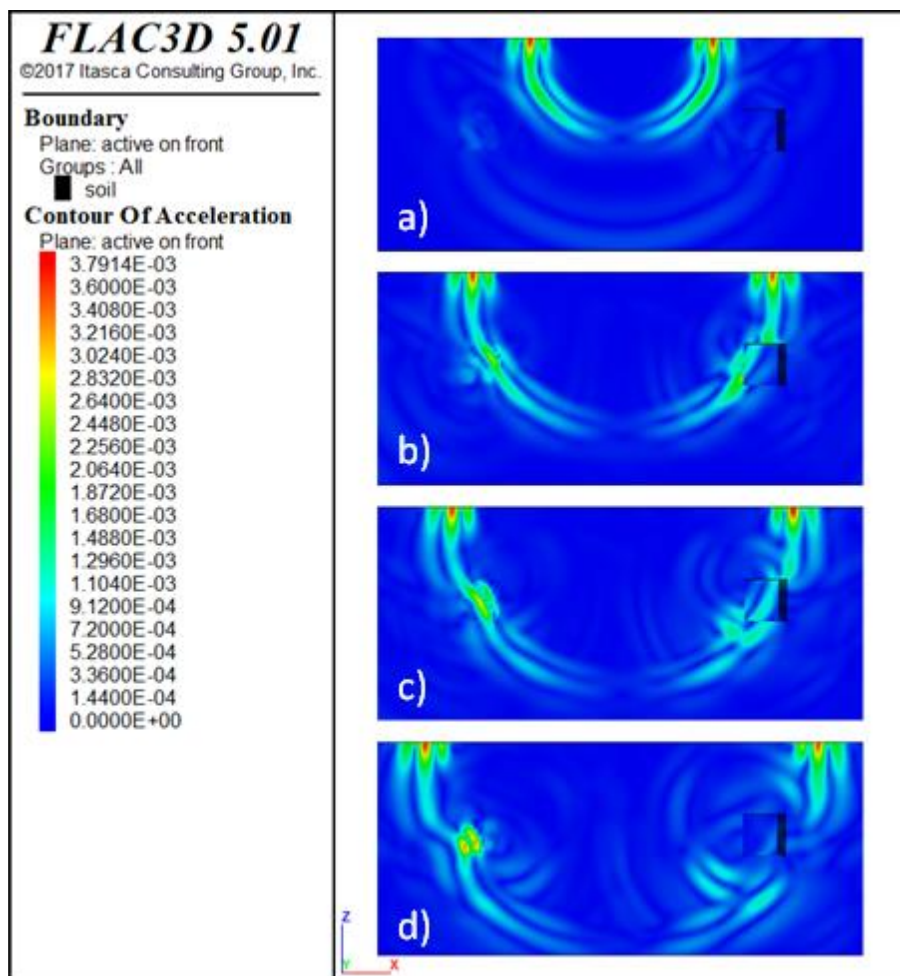


Figure 6.21. Effet de ralentissement induit par une zone de faible densité sur un front d'onde (à gauche) en comparaison à l'effet de réflexion d'énergie induit par un vide (à droite) simulé numériquement.

Quoique concluante, l'étude de la signature d'une cavité/anomalie mérite d'être étudiée davantage sur un site expérimental à échelle réelle et à conditions contrôlées, afin de pouvoir relier l'emplacement et l'étendue géométrique d'une anomalie par rapport à l'emplacement des points auxquels ces variations typiques dans la vitesse de groupe apparaissent à la surface, surtout qu'un front d'onde réfléchi ou atténué prendrait un certain délai entre le moment de son apparition et le moment où il va atteindre la surface et être mesuré.

Certains remblais routiers du MTQ, surtout les plus anciens et donc, parfois, en absence de documentations techniques sont les plus susceptibles d’avoir besoin d’être inspectés. Ces remblais peuvent être constitués des matériaux moins uniformes que les remblais construits plus récemment. Ce genre de remblais présente déjà des variations dans la courbe de dispersion de vitesse de groupe, d’où la difficulté à déceler les variations dues à des cavités ou à des anomalies localisées dans ces remblais. Ceci met la lumière sur la nécessité d’étudier davantage la signature d’une anomalie à travers un modèle de dimensions réelles. Cet aspect sera étudié dans les prochains chapitres notamment sur un modèle à échelle réelle.

6.5 Résumé et étude de cas

La figure 6.22 résume les résultats des études numériques et expérimentales réalisées sur le modèle réduit physique et les modèles numériques dans le but d’étudier la signature de chaque composante d’une structure routière (revêtement / sol / ponceau / cavité) afin de mieux comprendre le comportement d’un train d’ondes généré à partir de la surface du sol et ainsi établir une méthode d’inspection rapide pour évaluer l’intégrité d’un remblai routier situé au voisinage d’un ponceau. Malgré la complexité du phénomène de propagation d’onde dans le type de structures étudiées, l’approche suivie a permis d’isoler la signature de chaque composante du système. Cette approche consiste à étudier individuellement l’effet de chaque composante ainsi que les combinaisons des différentes composantes comme il est illustré à travers les différentes parties de la figure 6.22. La figure 6.23 présente les courbes de dispersions des vitesses de groupe des modes R0 identifié à la figure 6.22 alors que la figure 6.24 représente les courbes de dispersions des vitesses de phase correspondantes. À travers ces deux figures, il est clair que malgré le fait que les vitesses de phase sont affectées par les différentes composantes, les vitesses de groupe restent un paramètre plus intéressant à utiliser puisqu’il est plus facile à détecter les signatures des différentes composantes. En présence d’un pavage, qui a tendance à globalement augmenter les vitesses des ondes, la signature des autres composantes est rehaussée et semble plus facile à détecter. En effet, tout comme le ponceau, le pavage peut agir comme un guide d’ondes forçant l’énergie de ces dernières à se propager entre ces deux milieux.

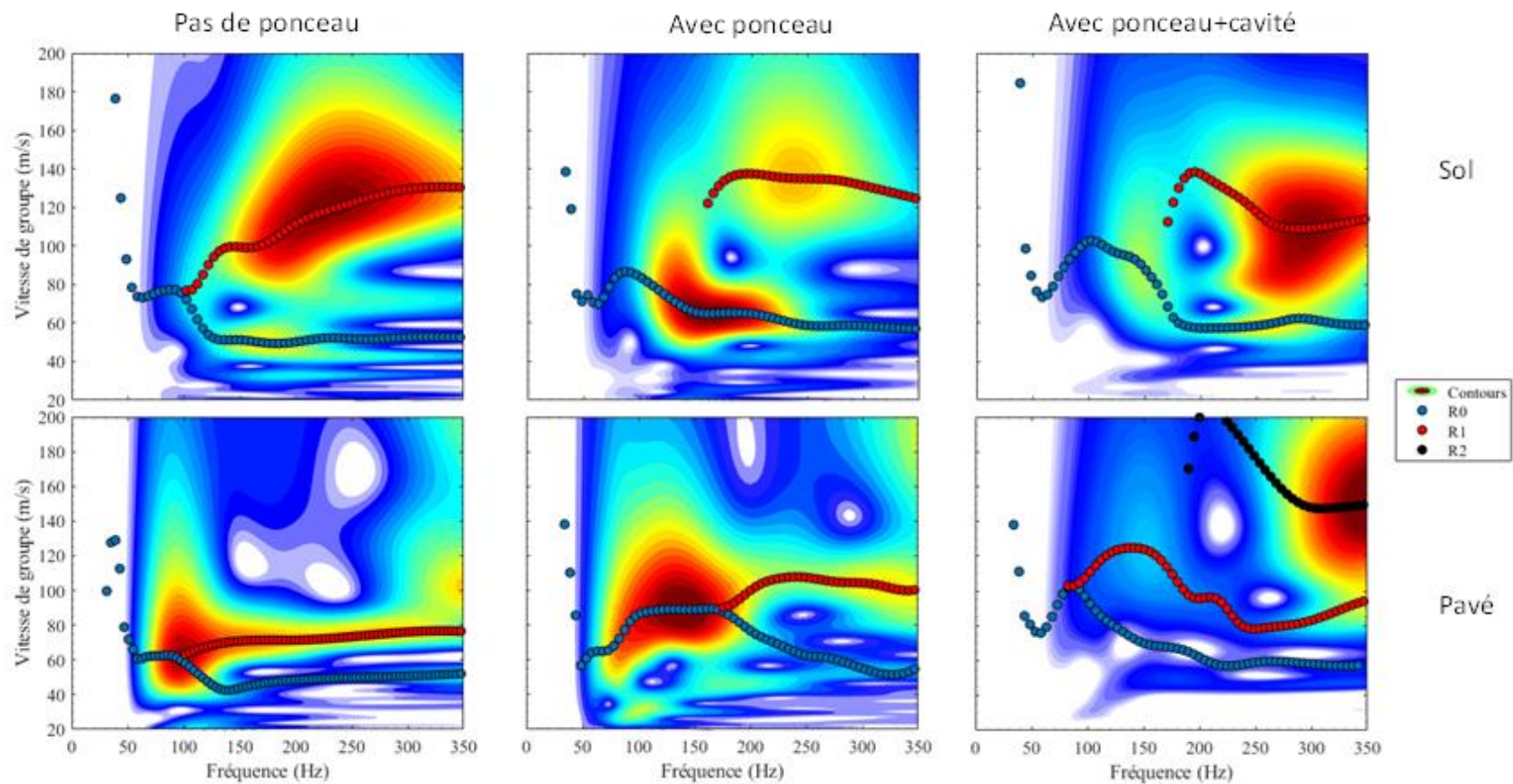


Figure 6.22. La distribution d'énergie et la vitesse de groupe des différentes modes (R0, R1 et R2) calculées à une distance de 1.6 m de la source avec le modèle physique réduit pour différentes configurations : en présence et absence de revêtement rigide, ponceau et cavité.

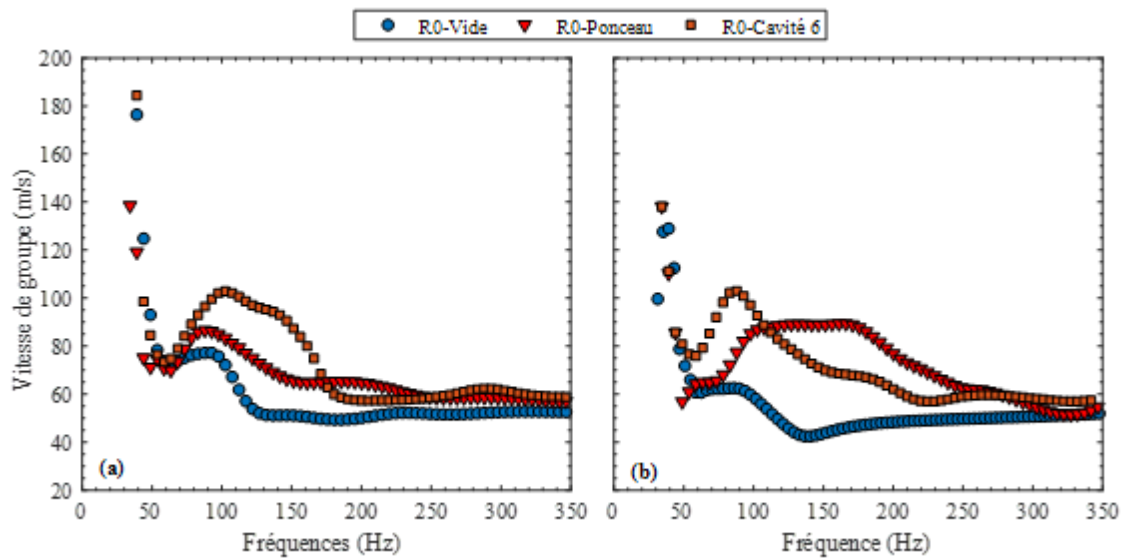


Figure 6.23. Courbes de dispersion des vitesses de groupe du mode R0 identifié à la figure 6.23 sans/avec ponceau et cavité (a) avec revêtement rigide et (b) sans revêtement rigide.

À certaines fréquences (longueur d'onde), la signature d'un ponceau est similaire à celle d'une cavité puisque les deux agissent comme un réflecteur, mais à différents degrés et différents niveaux. Dépendamment des dimensions et de la profondeur de ces deux composantes, l'augmentation des vitesses de groupe surgit à différentes fréquences. Dans le cas d'une structure réelle, et donc en présence d'un ponceau le long du profil inspecté, il faut s'attendre à ce que la signature du ponceau apparaisse sur la totalité des signaux aux alentours des mêmes fréquences affectées par ce dernier. Les cavités et les anomalies, quant à elles, sont plus localisées et ponctuelles, donc leurs présences devraient être détectées par quelques capteurs situés en dessus d'eux. Comme elles sont situées au voisinage du ponceau, elles ne devront pas affecter la même gamme de fréquences.

Le dernier cas présenté dans ce chapitre concerne l'étude de la propagation des ondes élastiques dans un remblai routier du MTQ, situé sur l'autoroute 40 près de la ville de Trois-Rivières. Ce cas est particulièrement intéressant puisqu'il a permis la collecte de signaux sur un remblai routier existant avant et après qu'il ne soit recouvert d'un pavé. La configuration du remblai est présentée dans la Figure 6.25.

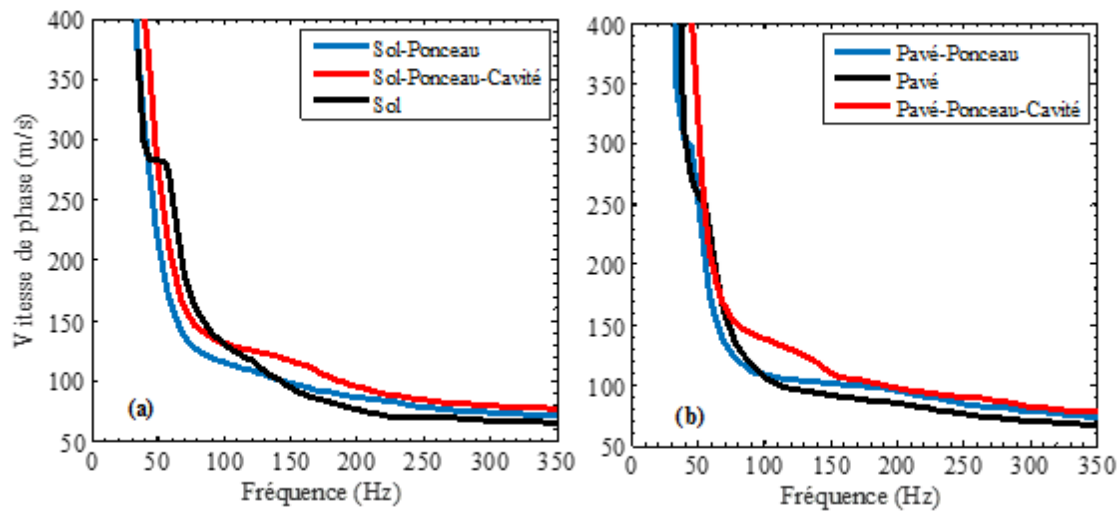


Figure 6.24. Courbes de dispersion des vitesses de phase du mode R0 identifié à la figure 6.23 sans/avec ponceau et cavité (a) avec revêtement rigide et (b) sans revêtement rigide.

Les résultats présentés dans les Figures 6.26 et 6.27 ont été obtenus à l'aide de la méthode MMASW. Cette méthode a été utilisée avec succès depuis 2002 pour la détection d'anomalies de plusieurs fondations routières au Québec (Karray et al., 2016). Dans cette section, nous verrons comment la présence d'une chaussée rigide à la surface d'un remblai routier affecte les vitesses des ondes de Rayleigh calculées avec la méthode MMASW. Quatre lignes MMASW, deux sans le pavé et deux avec le pavé, ont été réalisées sur le profil étudié. Pour étudier l'ensemble du profil de sol souhaité, il a été nécessaire de réaliser une ligne de chaque côté de la route (pour couvrir les voies de gauche et de droite) avant et après l'asphaltage, puisque les véhicules étaient autorisés à circuler sur la voie non surveillée. La distance entre la source et le premier récepteur était de 1,2 m et la distance intercapteur était de 0,2 m.

La Figure 6.26 montre la variation de la vitesse de phase du mode R0 le long du profil étudié par rapport aux points 1 et 2 de la figure 6.25. La figure 6.26a montre la vitesse calculée sans le pavé, tandis que la figure 6.26b montre la vitesse calculée après l'asphaltage. Notez que le profil de vitesse commence à une distance plus courte du point

1 de la figure 6.26b, car la source devait être placée à 0,6 m derrière l'emplacement où elle était située en l'absence du pavé (figure 6.26aa).

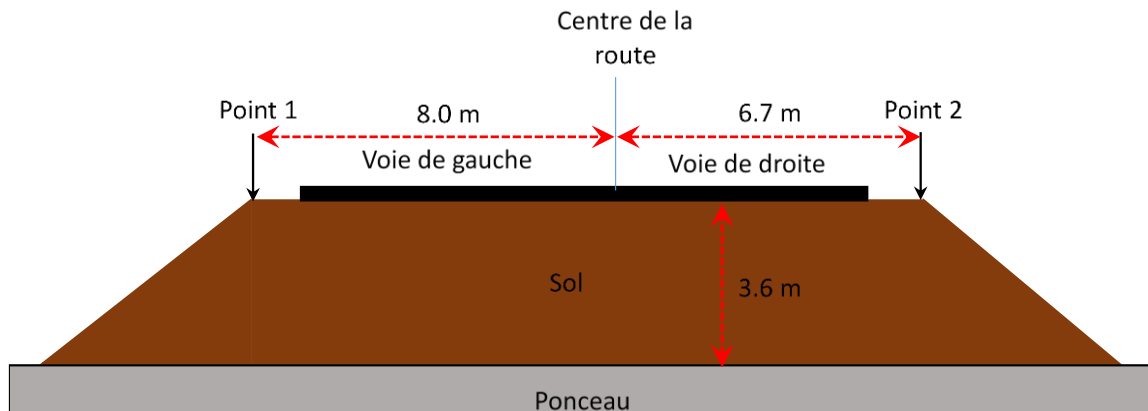


Figure 6.25. Schéma de la configuration du remblai routier.

La source a dû être déplacée vers l'arrière, car le pavé a été ajouté sur une surface plus grande que prévu, couvrant ainsi l'emplacement initial de la source. En outre, il existe une zone comprise entre 7,2 et 9,7 m dans la Figure 6.26a où aucune vitesse n'est calculée, car il n'était pas possible de placer les récepteurs dans cet intervalle en raison du trafic routier. Cette zone est toutefois couverte lorsque le pavé est présent (Figure 6.26b), car le trafic routier a été dévié plus loin du point 2 dans ce cas.

Dans les deux cas (figure 6.26a, b), une zone de faible vitesse à des longueurs d'onde supérieures à 3,0 m apparaît entre 5,5 et 8,8 m. Également dans les deux cas, les vitesses calculées sont maximales entre 3 et 5,5 m et entre 8,8 et 11,0 m à des longueurs d'onde supérieures à 3,0 m. La principale différence entre les contours des figures 6.28a et b est que les vitesses calculées sont plus élevées dans le cas où la chaussée est présente. L'augmentation de la vitesse n'est cependant pas la même à toutes les longueurs d'onde. Cette observation est conforme aux conclusions des sections précédentes, où il a été montré que l'augmentation de la vitesse provoquée par la présence du pavé n'est pas la même à toutes les fréquences. La figure 6.27 montre l'énergie et les vitesses de groupe et de phase calculées avec la méthode MMASW le long du même jeu de seize capteurs avant et après l'asphaltage de la route.

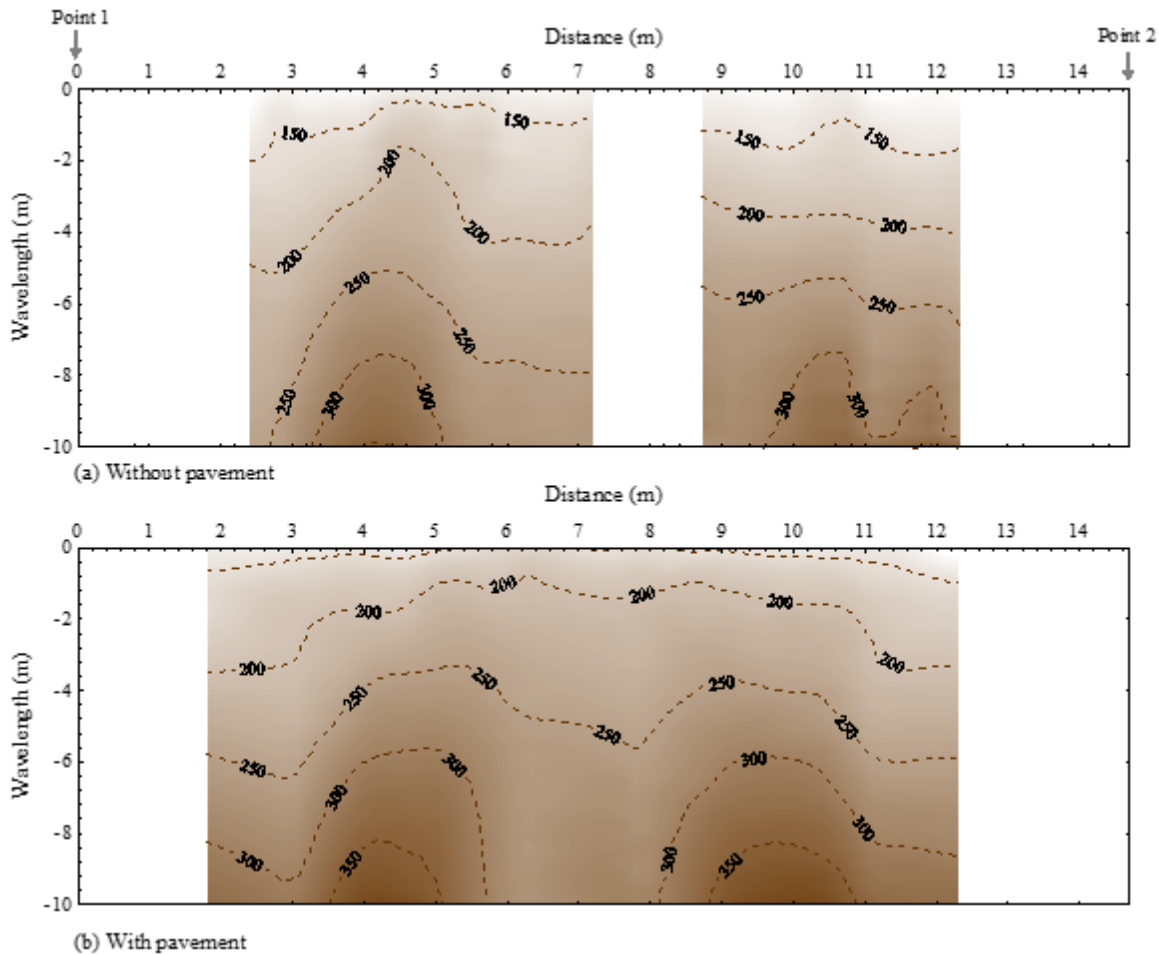


Figure 6.26. Contours des vitesses de phase du mode R0 (a) avant et (b) après l'asphaltage de la route.

Comme le montrent les figures 6.27a et b, la présence de la chaussée modifie la répartition de l'énergie au sein des traces enregistrées. De plus, la figure 6.27d montre que la présence du revêtement rend plus difficile l'identification du mode R0 et que cette erreur conduirait au calcul de vitesses de phase plus élevées. Il est à noter que ces conclusions confirment celles formulées sur la base des figures 6.6, 6.8, 6.9, 6.10 et 6.11.

6.6 Conclusion : Vers une meilleure compréhension de la réponse d'un remblai routier à un champ d'accélération à la surface et étude de cas.

Les résultats présentés dans le chapitre 6 ont permis de démontrer l'effet du pavé et du ponceau sur la propagation des ondes de Rayleigh.

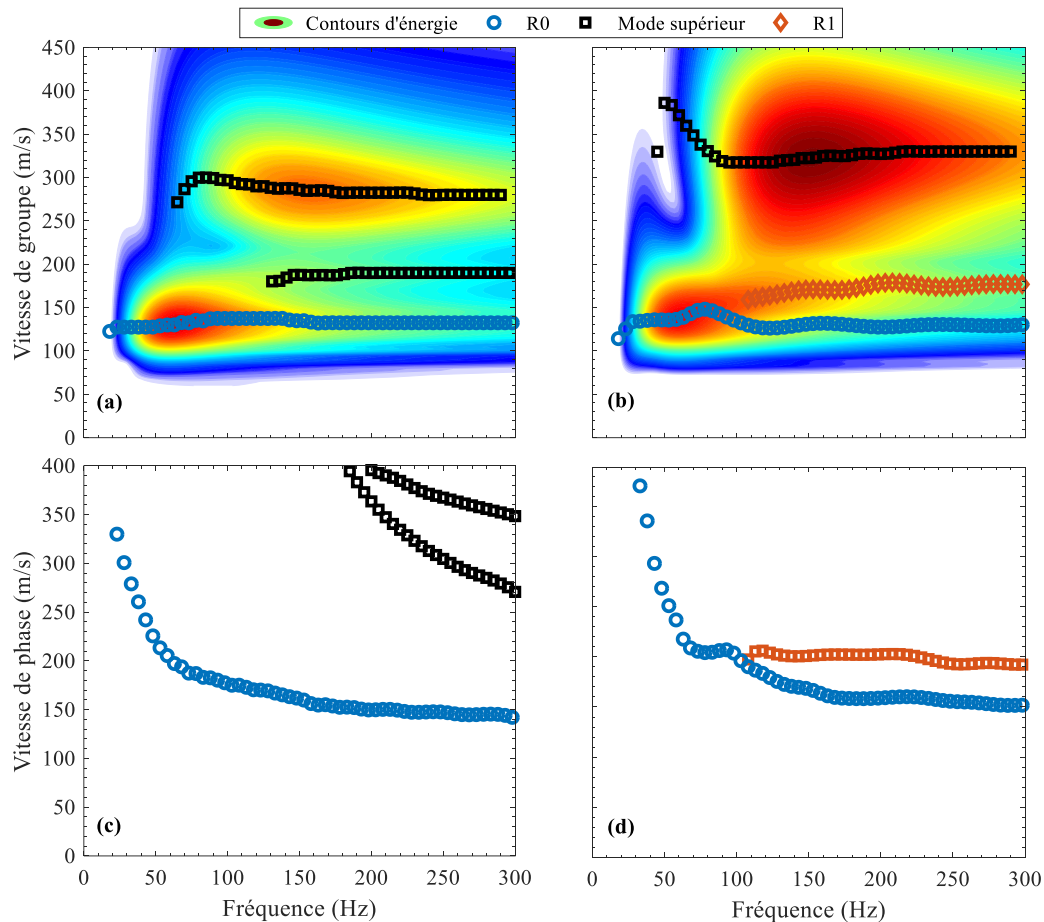


Figure 6.27. Contours d'énergie, de vitesses de groupe et de phase calculés avec la méthode MMASW avant et après l'asphaltage de la route. (a-c) Vitesses de groupe et de phase calculées correspondant à la position de 3,8 m sur la figure 6.26a. (b-d) Vitesses de groupe et de phase calculées correspondant à la position de 3,8 m sur la figure 6.26b.

L'effet possible de la présence d'une anomalie dans le sol a aussi été étudié à l'aide de la méthode de la matrice de propagation. À partir de ces résultats, l'approche suggérée pour la détection d'une anomalie dans le sol consiste à réaliser une analyse temps-fréquence des signaux enregistrés lors des essais. À partir de cette analyse, différentes approches peuvent être utilisées. L'approche utilisée dans le chapitre 6 consiste à analyser la variation de la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh à différentes fréquences (longueurs d'onde) le long du profil de sol investigué. Dans les chapitres 7 et 8, nous montrerons comment la propagation des ondes élastiques peut être efficacement utilisée pour la détection et la localisation des anomalies présentes dans différents types de modèles numériques et des remblais routiers du MTQ.

CHAPITRE 7 : UTILISATION DE LA NOUVELLE PROCÉDURE POUR LA DÉTECTION D'ANOMALIES

7.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, des modèles analytiques et numériques et un modèle expérimental de petite taille ont été utilisés afin de montrer quels sont les effets de : 1) La présence d'un pavé rigide à la surface du sol; 2) La présence d'un ponceau dans le sol; et; 3) La présence d'une anomalie dans le sol. Ce chapitre a permis de montrer que la présence et la configuration de chacune de ces composantes ont un impact sur la propagation des ondes élastiques émises par la source.

Dans le chapitre 7, un modèle numérique de plus grande taille sera utilisé afin de montrer comment la présence d'une anomalie peut être détectée à l'aide des algorithmes présentés dans le chapitre 4. Une attention particulière sera portée à la détection d'anomalies à l'aide de la configuration perpendiculaire également présentée à la fin du chapitre 4.

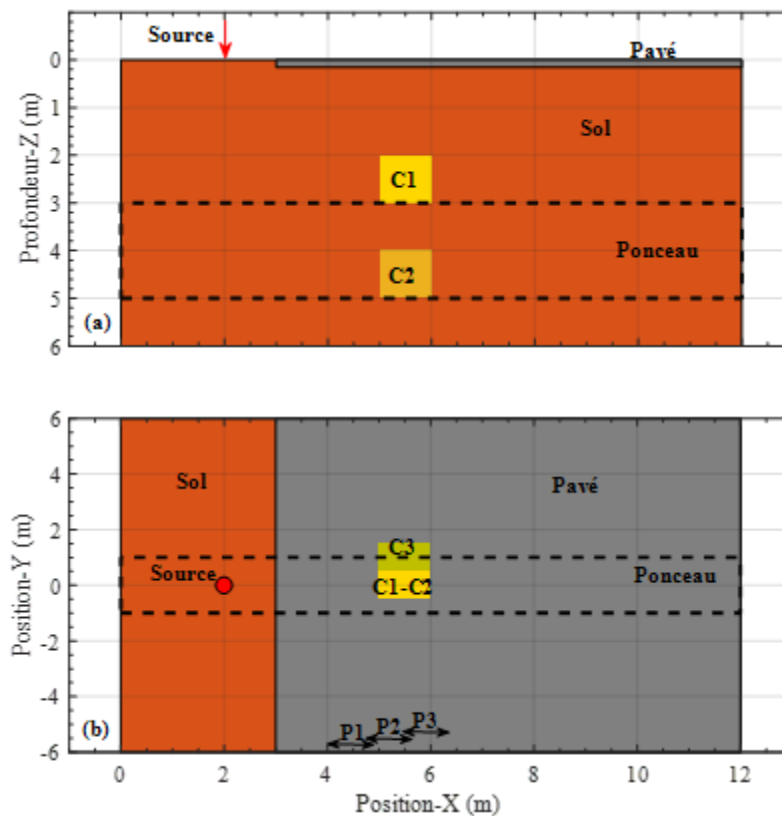


Figure 7.1. Différentes composantes (sol, pavé, ponceau, cavités) des modèles numériques. (a) Coupe à travers les plans X-Y. (b) Vue ‘aérienne’ du modèle. La position de la source est indiquée par la flèche et le cercle rouge tandis que la position des trois différentes cavités modélisées est indiquée par les rectangles C1, C2 et C3 (décalée en Y par rapport à C1 dans le plan X-Z en (a)). Les flèches doubles P1, P2 et P3 indiquent la position des courbes de vitesses de phase présentées dans les Figures 7.4 et 7.5.

Les modèles numériques de tailles comparables aux remblais routiers du MTQ étudiés ont une géométrie simple comme le montre la figure 7.1. Cette géométrie est préférée pour les simulations numériques puisque l’introduction de géométries plus complexes (comme l’introduction de pentes) obligerait la création d’un maillage irrégulier qui devra être de très petite taille afin d’éviter les distorsions numériques. Comme nous l’avons expliqué dans les chapitres précédents, un tel maillage entraîne un temps de calcul considérable et l’utilisation de ressources informatiques importantes. Toutefois, les résultats qui seront présentés dans ce chapitre s’appliquent tout à fait aux remblais routiers du MTQ comme le montrera le prochain chapitre (chapitre 8).

7.2 Détection d'anomalies à l'aide de la configuration perpendiculaire

Dans cette section, différents modèles seront utilisés afin de montrer comment la présence d'anomalie peut être détectée à l'aide des algorithmes et de la configuration perpendiculaire présentés dans le chapitre 4. La Figure 7.1 montre les différentes composantes du modèle utilisé dans les simulations 3D tandis que le tableau 7.1 présente les propriétés dynamiques des différentes composantes du modèle. La Figure 7.1a montre une coupe à travers les plans X-Z du modèle numérique tandis que la Figure 7.1b présente une vue de la surface du modèle (plan X-Y).

Tableau 7.1. Propriété des différents matériaux des modèles numériques (FLAC3D).

Profondeur (m)	Matériaux	V_s (m/s)	Coefficient de Poisson (ν)	Densité (kg/m ³)
0-0.15*	Asphalte	1000	0.33	2200
0-1	Sol	200	0.33	1900
1-3	Sol	240	0.33	1900
3-5*	Béton	1500	0.2	2400
3-6	Sol	300	0.33	1900
6-12	Sol	380	0.33	1900
*Ces matériaux ne sont pas présents dans tous les modèles.				

La Figure 7.1 montre que trois différentes cavités ont été modélisées. Cependant, la modélisation en 3D d'une cavité dans un sol nécessite de prendre en considération l'effet qu'aura cette dernière sur les éléments de sol l'entourant. En effet, lors des premières simulations réalisées avec FLAC3D, il a été constaté que la modélisation d'une cavité en tant qu'un vide dans le modèle ne permet pas de modéliser de manière réaliste la propagation des ondes élastiques. Dans les modèles utilisés dans cette étude, la cavité est donc modélisée comme une zone ayant un V_s très faible de l'ordre de 50 m/s. De plus, la présence d'un vide ou d'une zone de faible densité dans le sol affectera également les éléments de sols se trouvant à proximité de ce vide.

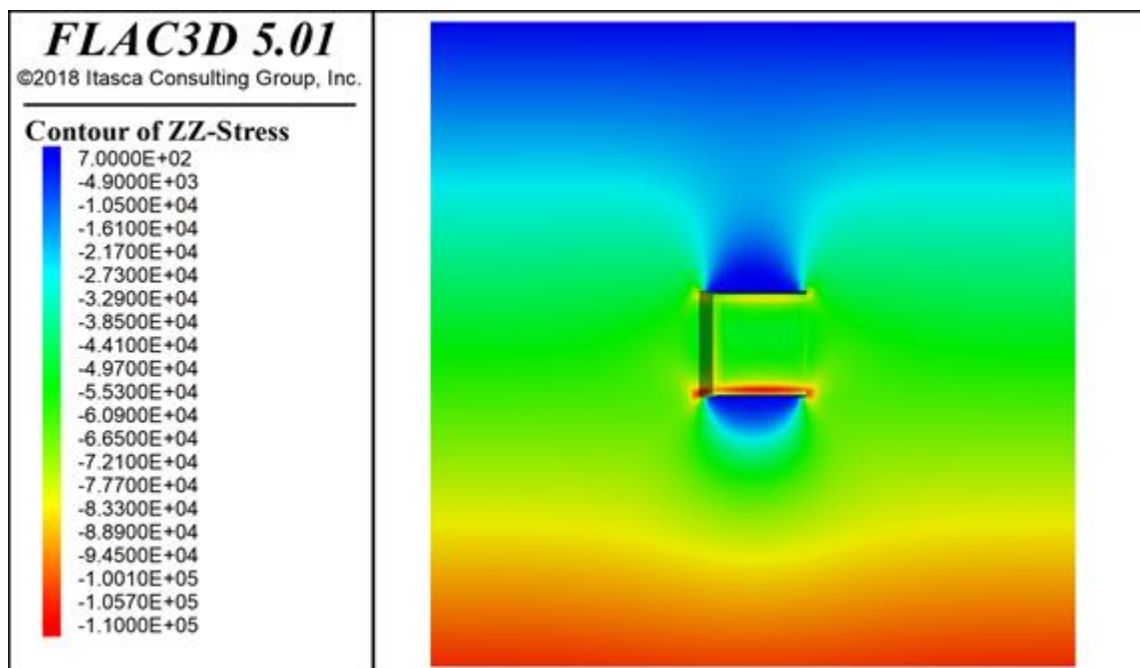


Figure 7.2. Effet considéré pour les modélisations en 3D de la présence d'une cavité dans le sol.

La Figure 7.2 montre donc ce qui se produit dans un modèle numérique lorsqu'un vide est introduit dans un sol et lorsque la force exercée par la gravité est considérée. La gravité entraîne un changement de l'état de contrainte du sol se trouvant autour du vide ce qui entrainera à son tour une réduction du module de cisaillement de ce sol. Cependant, il est difficile de quantifier exactement ce changement de contrainte à l'aide de simulations numériques ne tenant compte que des paramètres élastiques du sol. Néanmoins, afin de reproduire ce phénomène, une zone ayant la forme des contours présentés dans la Figure 7.2 où la vitesse des ondes de cisaillements est réduite de 10 à 75 % par rapport au reste du sol a été créée autour de chacune des cavités C1, C2 et C3.

7.2.1 Effet de la profondeur d'une cavité

Dans cette section, le modèle numérique montré dans la Figure 7.1 sera utilisé afin d'étudier l'effet de la profondeur d'une cavité sur les vitesses de groupe et de phase des ondes de Rayleigh. La figure 7.3 montre, sous forme de cartes de contours, les vitesses de groupe calculées à près de 35 Hz pour chacun des signaux enregistrés à la surface des modèles numériques.

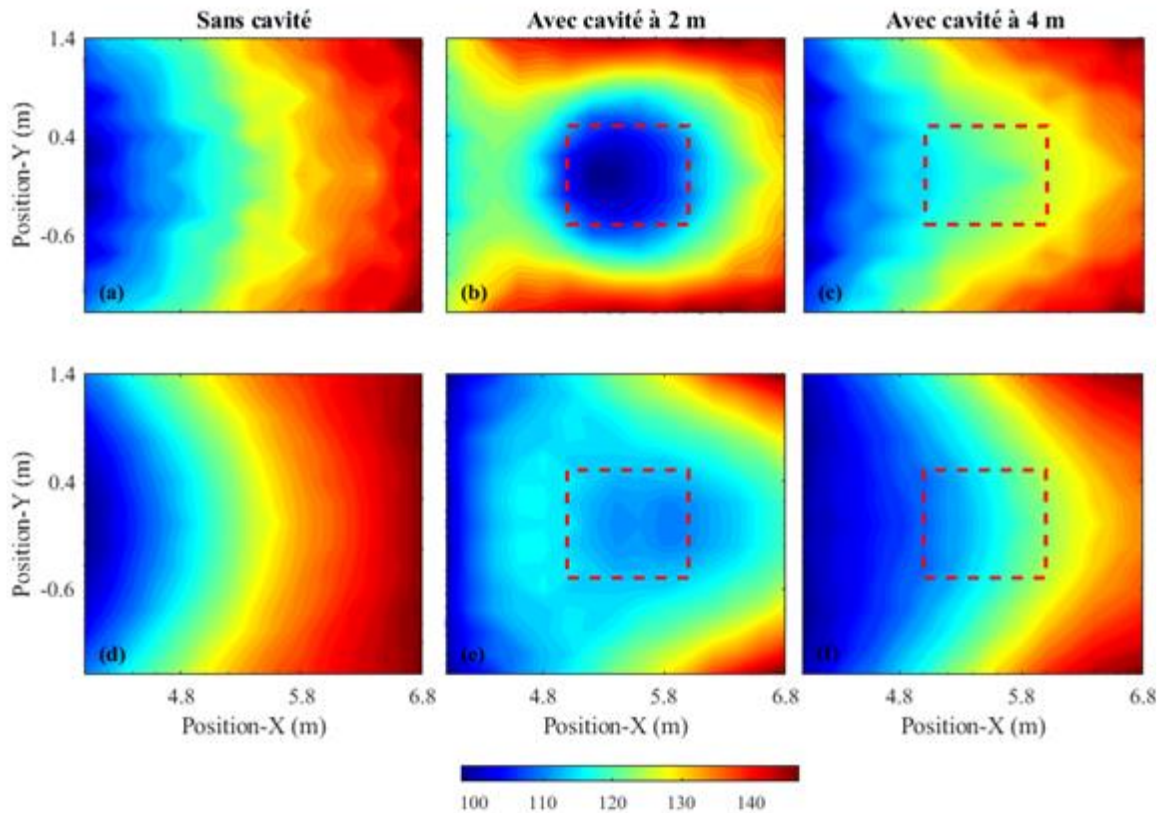


Figure 7.3. Effet de la profondeur d’une anomalie sur les vitesses de groupe calculées à près de 35 Hz lorsque le modèle n’est pas recouvert d’un pavé (a, b et c) et lorsque le modèle est recouvert d’un pavé de 0.15 m (d, e et f). (a, d) Modèles sans cavité, (b, e) modèles avec cavité C1 et (c, f) modèles avec cavité C2. La position des cavités est indiquée par les rectangles rouges et l’échelle de couleur indique la valeur des contours en vitesses de groupe.

La position le long des axes X et Y est la même que celle présentée dans la Figure 7.1 et la position des cavités C1 et C2 est indiquée par des rectangles rouges. La Figure 7.3 illustre l’effet de la présence et de la profondeur d’une cavité se trouvant à différentes profondeurs à la surface d’un modèle recouvert d’un pavé de 0.15 m (d-e-f) et d’un modèle sans pavé (a-b-c). Lorsqu’aucune cavité n’est présente (Figure 7.3a-d), il est possible d’observer une augmentation régulière (de gauche à droite) de la vitesse de groupe le long de la zone investiguée. Notez que dans la Figure 7.3a, l’augmentation des vitesses de groupe n’est pas aussi régulière (présence d’irrégularités locales) que lorsqu’un pavé est présent à la surface du modèle (Figure 7.3d).

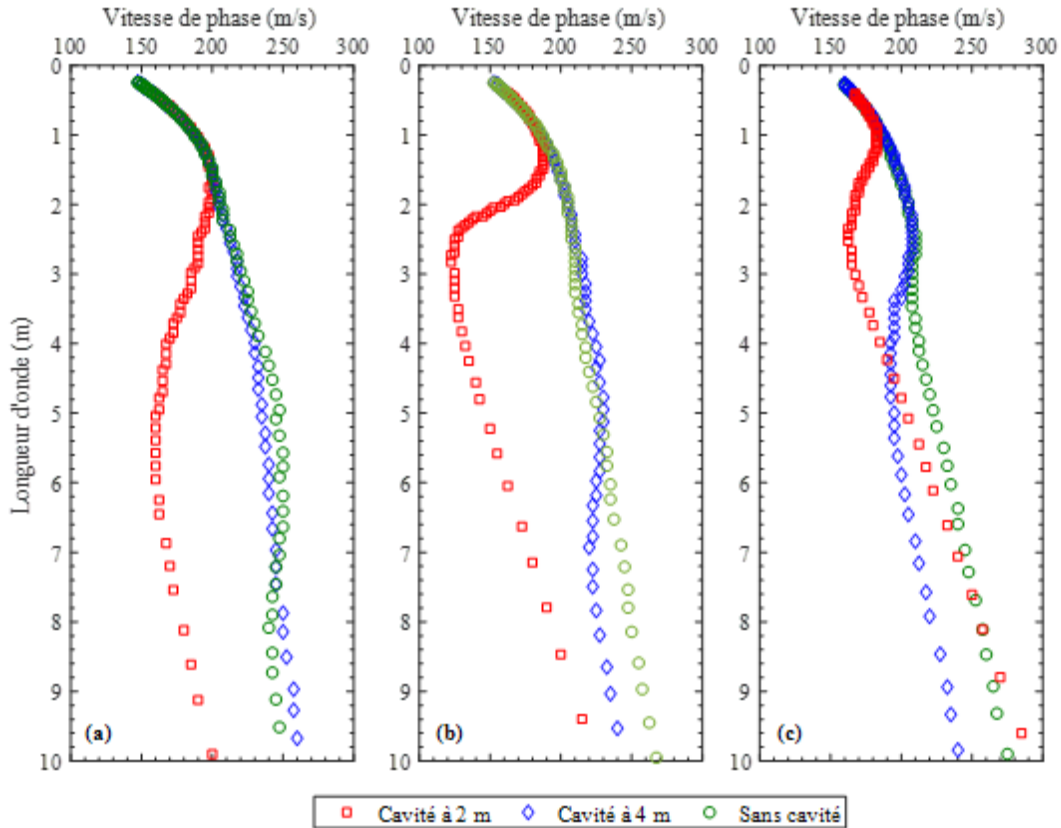


Figure 7.4. Effet de la présence et de la profondeur d'une cavité lorsque le sol n'est pas recouvert d'un pavé. Vitesse des ondes de Rayleigh calculées avec la MGST entre (a) 4.0 et 4.9 m, (b) entre 4.7 et 5.6 m et (c) entre 5.4 et 6.3 m le long de l'axe horizontal (X) de la Figure 7.1a.

Ces irrégularités locales sont causées par le modèle numérique et sont réduites en présence du pavé qui permet une atténuation importante des ondes causant ces irrégularités. Comme le montre les contours de la Figure 7.3, avec ou sans pavé, la présence d'une cavité à 2 m de profondeur (C1) entraîne une diminution importante des vitesses de groupe facilement observables sur les Figures 7.3b et e.

Également, la présence d'une cavité à 4 m de profondeur (figure 7.3c-f) entraîne une diminution de la vitesse de groupe qui est cependant plus difficilement observable à 35 Hz sur les cartes de contours. La présence de cette cavité est cependant plus difficilement observable puisqu'elle est située directement au centre des lignes perpendiculaires et qu'elle est de forme régulière (cubique).

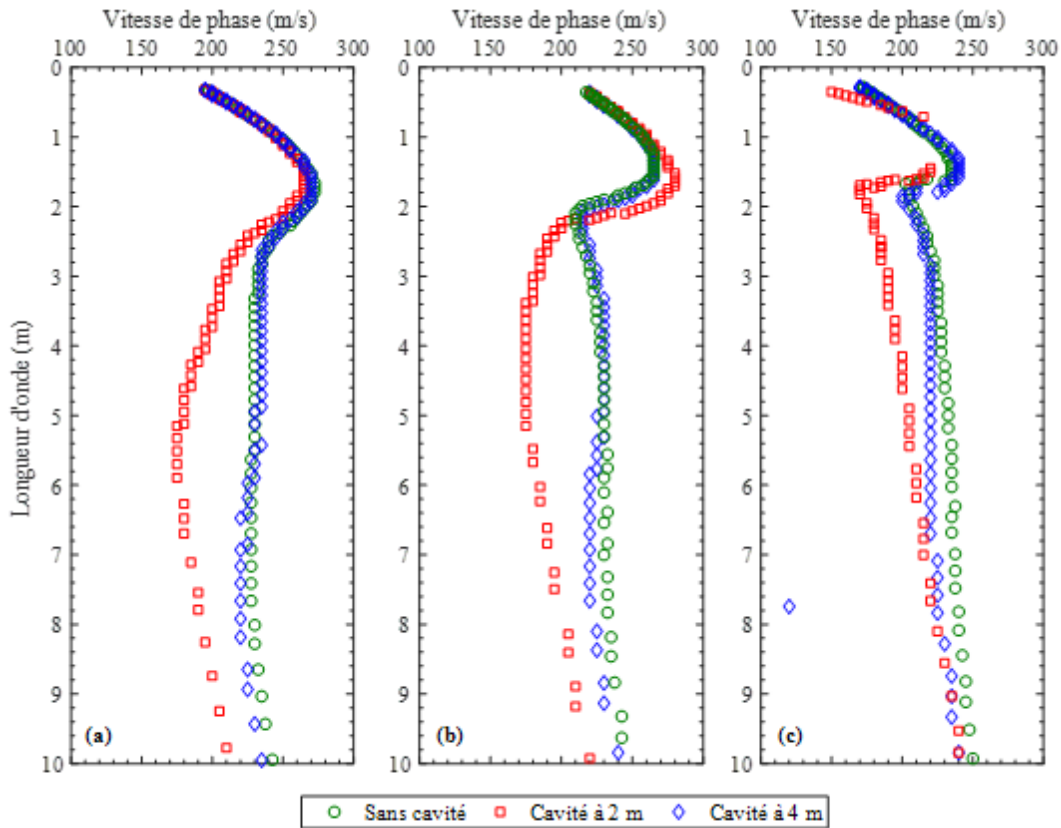


Figure 7.5. Effet de la présence et de la profondeur d’une cavité lorsque le sol est recouvert d’un pavé. Vitesse des ondes de Rayleigh calculées avec la MGST entre (a) 4.0 et 4.9 m, (b) entre 4.7 et 5.6 m et (c) entre 5.4 et 6.3 m le long de l’axe horizontal (X) de la Figure 7.1a.

La GST présentée par l’équation 4.14 peut également être modifiée afin de calculer la vitesse de groupe et de phase le long de différents capteurs comme dans la méthode MMASW (Tremblay, 2018). Lorsqu’utilisée de cette manière, cette transformation se nomme la MGST et permet un calcul de la vitesse de phase sans avoir à réaliser le déroulement de la l’angle de phase. Cela est avantageux puisque le déroulement de la phase peut entraîner des erreurs dans le calcul des vitesses de phase et est difficile à automatiser (Tremblay, 2018). Comme le montrent les Figures 7.4 et 7.5, la MGST a été utilisée pour le calcul de la vitesse de phase le long des différents intervalles indiqués dans la Figure 7.1 pour les modèles sans et avec pavé respectivement. Comme le montrent les Figures 7.4 et 7.5, la présence d’une cavité affecte grandement les vitesses de phase calculées le long des différents profils.

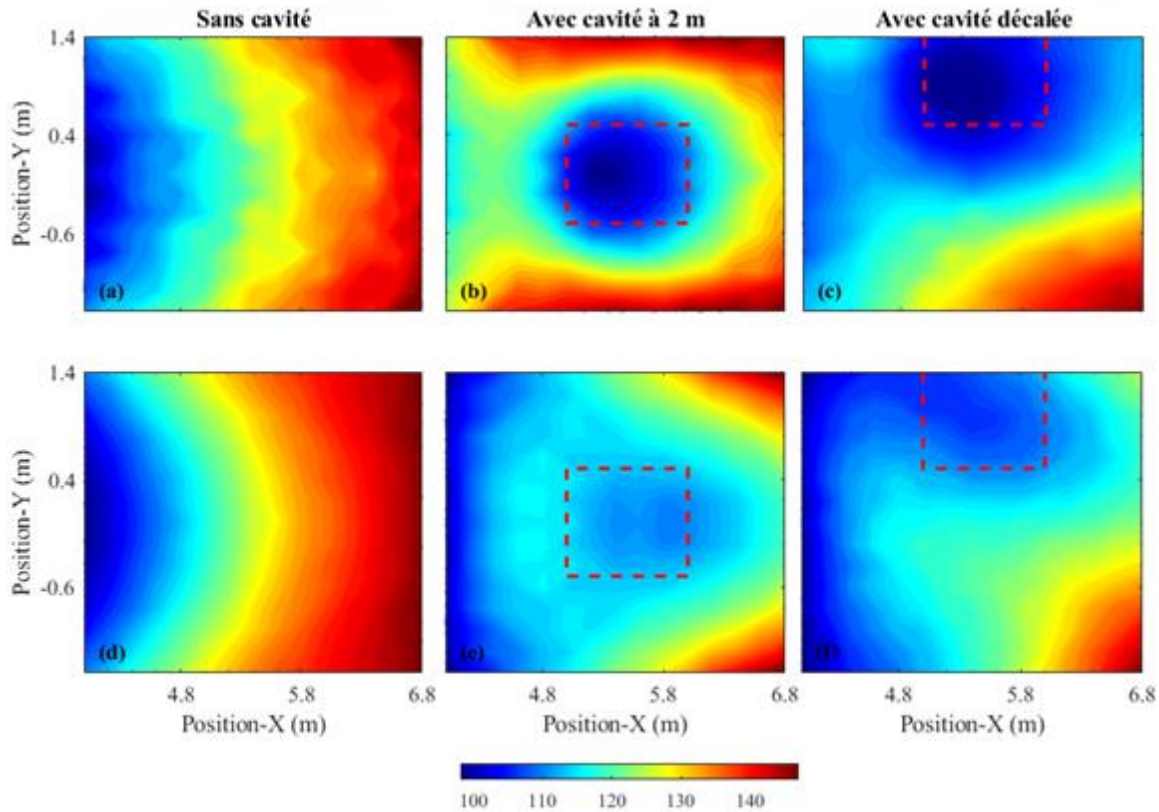


Figure 7.6. Effet de la position d'une anomalie sur les vitesses de groupe calculées à près de 35 Hz lorsque le modèle n'est pas recouvert d'un pavé (a, b et c) et lorsque le modèle est recouvert d'un pavé de 0.15 m (d, e et f). (a, d) Modèles sans cavité, (b, e) modèles avec cavité C1 et (c, f) modèles avec cavité C3. La position des cavités est indiquée par les rectangles rouges et l'échelle de couleur indique la valeur des contours en vitesses de groupe.

Également, la présence de cette dernière à de plus faibles profondeurs (C1) affectera les ondes de Rayleigh à partir de longueurs plus courtes que lorsqu'elle se trouve à une plus grande profondeur (C2).

Noter qu'en présence du pavé, même lorsqu'il n'y a pas de cavité, il semble y avoir une diminution de la vitesse de phase autour d'une longueur d'onde de 2.0 m. Cette diminution de vitesse est en réalité causée par la présence d'un mode supérieur qui est difficilement séparable du mode fondamental à des longueurs d'ondes plus courtes que 2.0 m lorsque peu de signaux (5) sont utilisés pour le calcul de la MGST. Il serait néanmoins possible de séparer les différents modes en utilisant d'avantages de signaux, mais cela se ferait au

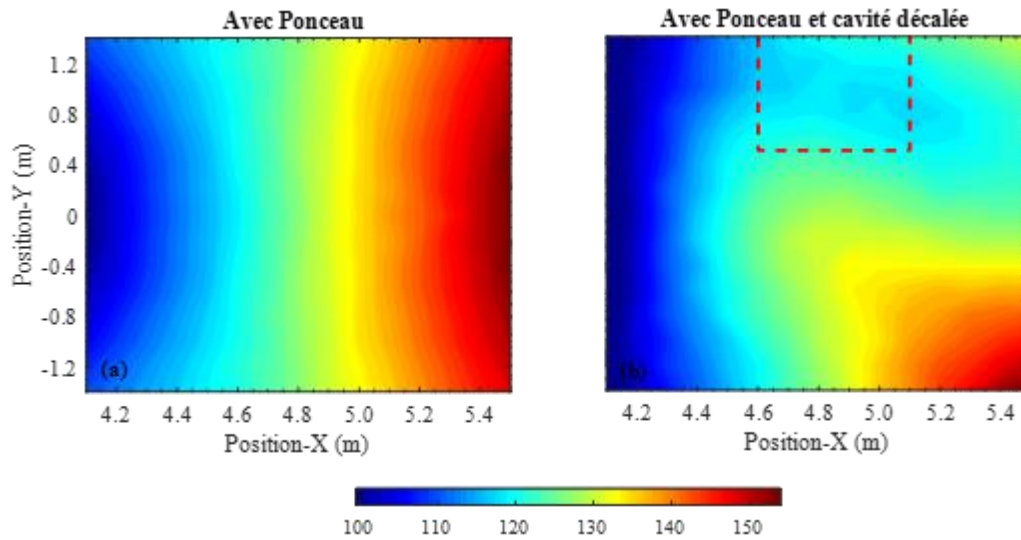


Figure 7.7. Variation des vitesses de groupe calculées à près de 35 Hz dans un modèle (a) en présence d'un pavé et d'un ponceau et (b) en présence d'un pavé, d'un ponceau et de la cavité C3. La position de la cavité C3 est indiquée par le rectangle rouge et l'échelle de couleur indique la valeur des contours en vitesses de groupe.

détriment de la résolution latérale de l'investigation puisque l'utilisation de plus de signaux signifie que les vitesses calculées correspondent à de plus grandes distances.

Aussi, en présence du pavé (Figure 7.5), les variations de la vitesse de phase causées par la présence des cavités sont moins importantes que lorsque le modèle n'est pas recouvert du pavé (Figure 7.4).

7.2.2 Effet de la position d'une cavité

Dans cette section, l'effet de la position d'une cavité sur les contours de vitesses de groupe calculées à 35 Hz est étudié à l'aide de la Figure 7.6. Tout comme la Figure 7.3a, b, d et e, la Figure 7.6a, b, d et e montre l'effet de la présence des cavités C1 sur les contours de vitesses de groupe. Cependant, la Figure 7.3c et f montre que lorsque la position de la cavité (C3) est décalée par rapport au centre des lignes perpendiculaires le long de l'axe Y, la diminution de la vitesse de groupe se trouve maintenant elle aussi décalée du centre de l'axe Y (position 0 m en Y). Comme le montre la Figure 7.6, cette diminution de vitesse permet de localiser la présence de la cavité.

Pour la Figure 7.7, un ponceau ayant la configuration montrée dans la Figure 7.1 et les propriétés présentées dans le tableau 7.1 est ajouté aux modèles numériques. La Figure 7.7a montre qu'en présence d'un ponceau, les contours des vitesses de groupe sont légèrement différents que lorsqu'il n'y a pas de ponceau (Figure 7.6d). Cependant, tout comme pour la Figure 7.6f, la présence de la cavité C3 entraîne une diminution importante de la vitesse de groupe près de la zone où se trouve la cavité.

7.3 Conclusions

Dans le chapitre 7, il a été montré comment la présence d'une cavité affecte les vitesses de propagations des ondes de Rayleigh et comment la configuration perpendiculaire présentée à la fin du chapitre 4 permet d'identifier la présence d'une cavité. En effet, dépendamment de la position d'une cavité, il est possible en utilisant les cartes de contours en vitesses de groupe, d'identifier sa position qui coïncide avec une diminution locale des vitesses de groupe. La vitesse de groupe, dont le calcul est plus facile à automatiser, a été choisie comme premier paramètre d'analyse concluant pour la nouvelle méthode d'inspection rapide proposée. Aussi, il a été montré qu'il est également possible de calculer la vitesse de phase à l'aide de la MGST. Dans le futur, des études plus ciblées sur la vitesse de phase (dont le calcul est plus difficilement automatisable) pourraient aboutir à l'élaboration des cartes de contours en termes des vitesses de phase. Pouvoir étudier ce paramètre sur un site expérimental à échelle réelle et à conditions contrôlées est nécessaire pour mieux comprendre ce paramètre.

Le prochain chapitre viendra étudier plus en détail l'efficacité de la méthode proposée et la validité des conclusions établies dans les chapitres 6 et 7 à l'aide de données recueillies sur différents remblais routiers du MTQ.

CHAPITRE 8 : ÉTUDES DE CAS ET VALIDATION SUR TERRAIN

8.1 Introduction

Durant le printemps 2016, l'été 2017 et l'été 2018, il a été possible de réaliser l'inspection de cinq différents ponceaux localisés sur différentes routes du MTQ à travers le Québec. Le tableau 8.1 présente un résumé des essais réalisés sur chacun des ponceaux. Ces inspections ont permis de tester la faisabilité de la nouvelle configuration proposée dans le chapitre 4 et utilisée dans le chapitre 7, ainsi que son efficacité en comparaison avec les relevées MMASW effectué conjointement sur ces ponceaux.

Lors de ces essais, différentes configurations de lignes (ex. : nombre de lignes, espacement intercepteur, espacement interligne) ont pu être testées sur des ponceaux se trouvant à différentes profondeurs. Pour toutes les inspections, les relevés ont été réalisés avec comme objectif de permettre la détection d'une anomalie située au-dessus ou près du ponceau.

Tableau 8.1. Résumé des études de cas réalisés dans le cadre de ce projet.

Étude de cas	1	2	3.1	3.2	4	5
Période	Printemps 2016	Printemps 2016	Nov-2017	Nov-2017	Mai-2018	Sept-0218
Localisation	Saint-Sauveur	Gatineau	Trois-Rivières	Trois-Rivières	Drummondville	Gatineau
Autoroute	A15	A50-Direction Ouest	A40-Direction Est	A40-Direction Ouest	A20-Direction Ouest	A50-Direction Est
Ponceau	*	*	P-12600	P-12600	6548-0	RTS 0050-01-070
Profondeur du ponceau (m)	7.5	4.5	6.5	6.5	10	15
Nombre de lignes	9	9	6	10	12	14
Espacement Interligne (m)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Nombre de capteurs par ligne	14	14	14	14	14	7
Espacement intercapteur (m)	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2
Superficie des relevés perpendiculaire (m²)	8.32	8.32	2.6	4.68	5.72	6.24
Fréquence d'échantillonnage (Hz)	2000	2000	2000	2000	1000	1000
Décalage par rapport à la source (m)	4	6.4	3.12	4	3.4	4
Relevé MMASW	Lignes 5 et 6	ligne L1AV / ligne L2AM	MMASW-7V / MMASW-8M	MMASW-4M	MMASW-1 / MMASW-2	*
Verdict de MMASW (zone inspectée)	Remblai uniforme/ absence d'anomalie	Remblai uniforme/ absence d'anomalie	Remblai uniforme/ absence d'anomalie	Remblai uniforme/ absence d'anomalie	Remblai non uniforme/ présence d'anomalie	*
Verdict de la nouvelle Configuration (zone inspectée)	Remblai uniforme/ absence d'anomalie	Remblai uniforme/ absence d'anomalie	Remblai uniforme/ absence d'anomalie	Remblai uniforme/ absence d'anomalie	Remblai non uniforme/ présence d'anomalie	Remblai uniforme/ absence d'anomalie

8.2 Autoroute 15, Saint-Sauveur

Lors du printemps 2016, des relevés MMASW furent réalisés au-dessus d'un ponceau de l'autoroute 15 près de Saint-Sauveur. En plus des relevés MMASW conventionnels, d'autres relevés en configuration perpendiculaire furent réalisés.

La figure 8.1a montre les courbes de dispersion du mode fondamental (R0) et du premier mode supérieur (R1) en vitesse de groupe calculées pour un capteur se trouvant au-dessus du ponceau. Comme lors des essais réalisés sur le banc d'essai de l'UdeS, (chapitres 5-6) l'énergie contenue dans le signal se propage en deux groupes différents : (1) À des fréquences de moins de 60 Hz, l'énergie correspond à des ondes se propageant principalement dans le sol sur le mode R0 (2) À des fréquences de plus de 60 Hz, l'énergie correspond à des ondes se propageant principalement sur des modes supérieurs. La figure 8.1b montre les courbes de dispersion du mode fondamental (R0) et du premier mode supérieur (R1) en vitesse de phase calculées à l'aide de la GST à partir des vitesses de groupe identifiées dans la Figure 8.1a. La Figure 8.2 montre également les courbes de dispersions des modes R0 et R1, mais en termes de vitesse de phase-longueur d'onde.

La figure 8.3 montre comment, une fois les courbes de dispersion calculées pour chaque capteur, les signaux enregistrés sur le terrain peuvent être présentés. Ce type de représentation ou tomographie peut être présenté en termes de vitesse de phase ou de groupe. La variation de la vitesse de phase à différentes fréquences (ou longueur d'onde) à travers un profil de sol peut cependant s'avérer un meilleur indicateur de la présence d'une anomalie dans le sol. En effet, comme démontré dans le chapitre 6, la présence du ponceau à une faible profondeur et du revêtement à la surface du sol peut entraîner des variations rapides de la vitesse de groupe sur de courts intervalles de fréquences ce qui peut avoir pour effet d'en compliquer l'interprétation. Cependant, pour des ondes se propageant à des fréquences entre 20 et 40 Hz, la variation de la vitesse de groupe n'est pas trop rapide et les vitesses calculées sur cet intervalle correspondent au mode R0 des ondes de Rayleigh (Fig. 8.1a).

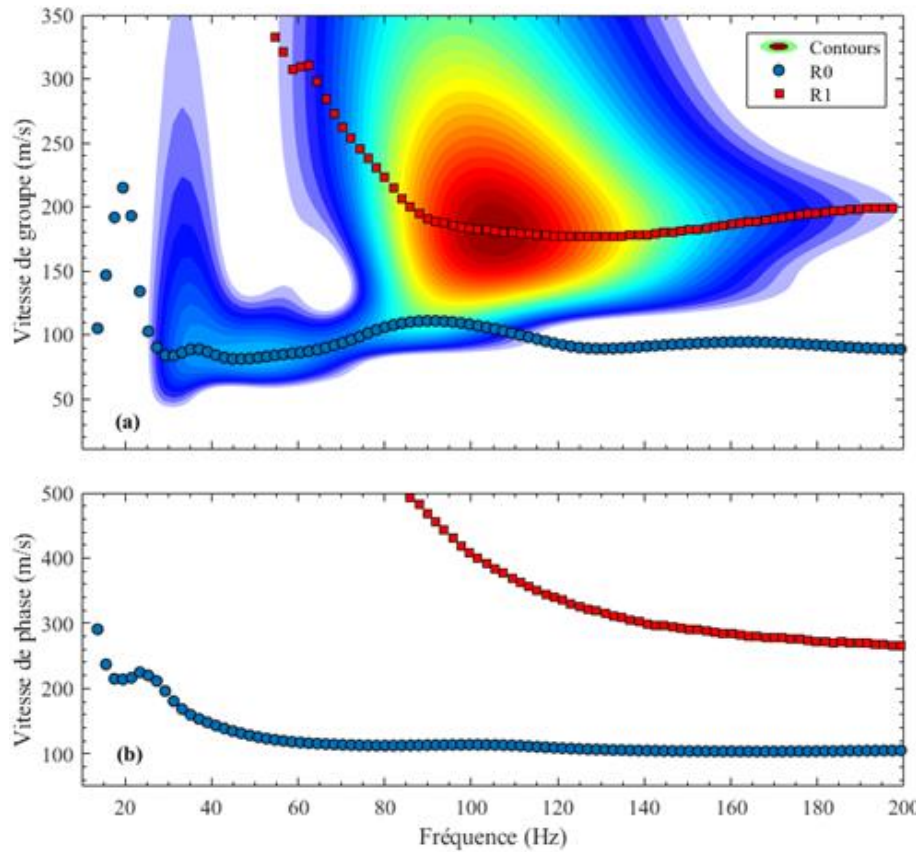


Figure 8.1. Courbes de dispersion en (a) vitesse de groupe et (b) en vitesse de phase calculées pour un accéléromètre situé au-dessus du ponceau.

Ces éléments font en sorte que la tomographie en vitesse de groupe des essais réalisés à l'aide de la configuration perpendiculaire peut être comparée aux tomographies en vitesse de phase obtenue à l'aide de la méthode MMASW. Comparativement aux tomographies en vitesse de phase habituellement fournies lors des essais MMASW, la tomographie présentée dans la Figure 8.3 peut être vue sur différents plans. Le plan fréquence/position (ligne) de la figure 8.3 correspond au même plan que celui présenté dans les tomographies en vitesse de phase de la méthode MMASW (Fig. 8.4). En effet, les plans 1 et 2 de la figure 8.3 correspondent approximativement aux zones identifiées par des rectangles rouges dans les tomographies illustrées dans les figures 8.4a et 8.4b. L'échelle de couleur n'est cependant pas la même puisque les logiciels utilisés pour faire les contours ne sont pas les mêmes pour les deux méthodes.

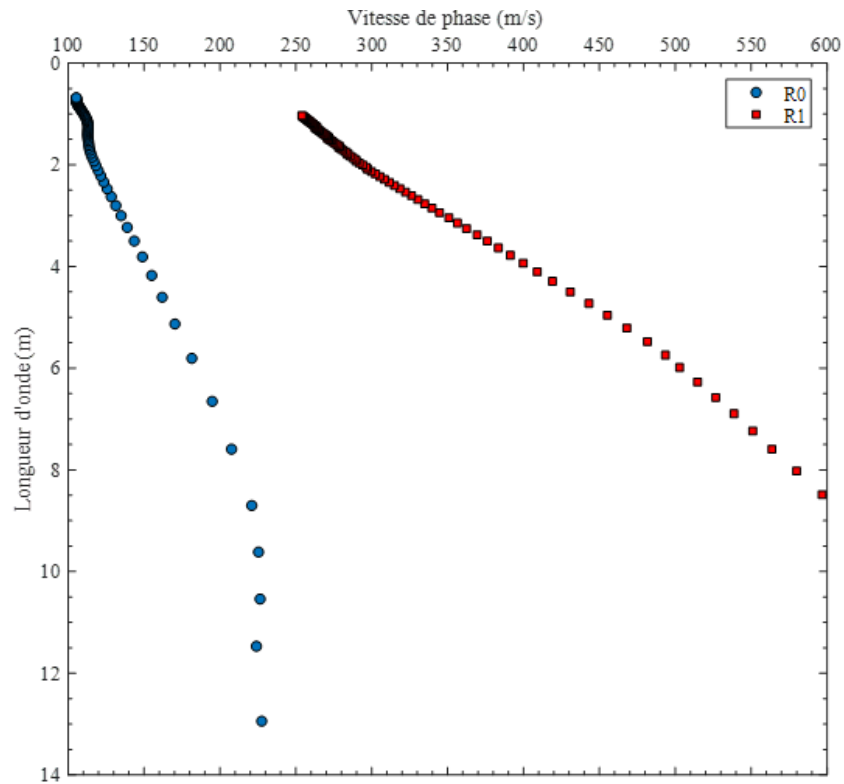


Figure 8.2. Courbes de dispersion (λ - V_{ph}) des modes R0 et R1 calculées pour un accéléromètre situé au-dessus du ponteau.

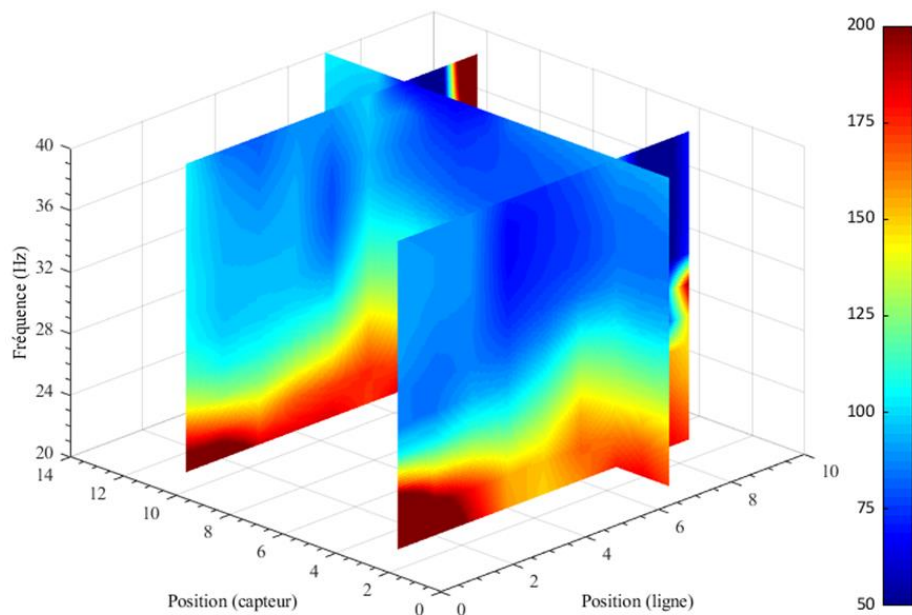


Figure 8.3. Tomographie en vitesse de groupe obtenue à l'aide de la configuration perpendiculaire. Les plans 1 et 2 correspondent respectivement aux tomographies de vitesse de phase des figures 8.4a et 8.4b. L'échelle de couleurs indique les valeurs de la vitesse.

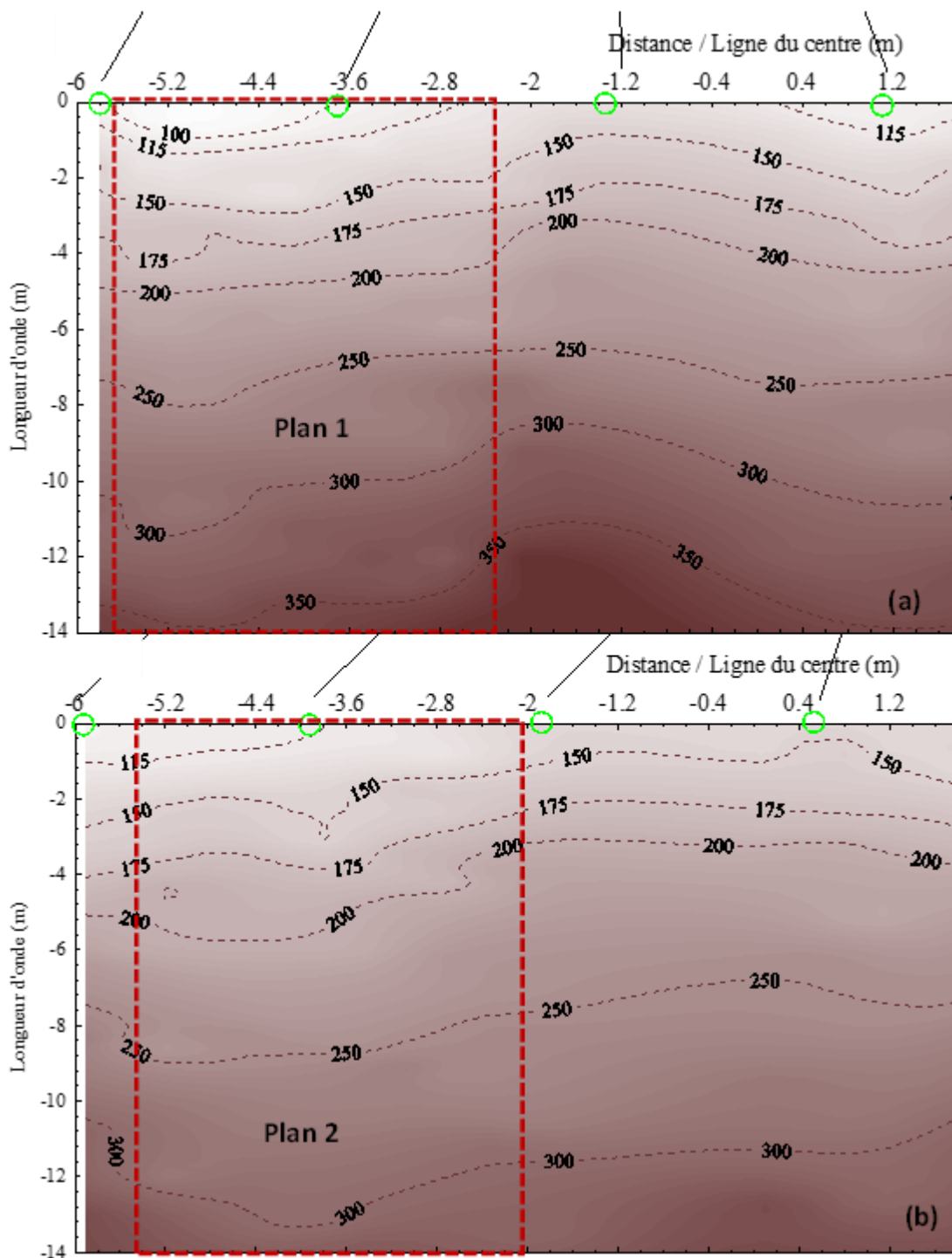


Figure 8.4. Tomographie de vitesse de phase de (a) la ligne 5 (plan 1) et de (b) la ligne 6 (plan 2) calculée selon la méthode MMASW. Les rectangles pointillés rouges montrent les zones couvertes par les plans 1 et 2.

8.3 Autoroute 50, Gatineau

Au printemps 2017 des relevés sismiques (MMASW) ont été réalisés sur l'autoroute 50 (A50 Ouest, figure 8.5) afin d'évaluer la condition du remblai sous la chaussée. D'autres relevés sismiques ont également été réalisés afin de tester l'efficacité des algorithmes et de la configuration de capteurs présentée dans le chapitre 4. Pour ces relevés, la configuration de capteur perpendiculaire a été utilisée. La Figure 8.6 montre un schéma des essais réalisés sur l'A50 à l'aide de la configuration perpendiculaire. Les lignes 1AV et 2AM coïncident avec les capteurs 12 et 3 de chacune des lignes de la configuration perpendiculaire. Comme le montre les figures 8.5-8.6, neuf lignes perpendiculaires (appelées 1P, 2P,...,9P) de 14 capteurs séparées d'une distance de 0.4 m ont permis de couvrir une distance totale de 3.2 m se trouvant entre les PM -12.6 et -9.4 des lignes 1AV et 2AM. La distance entre chacun des 14 capteurs de chaque ligne perpendiculaire est de 0.2 m ce qui fait en sorte que chacune des lignes perpendiculaires couvre une distance de 2.6 m. La figure 8.5 montre également les positions de deux capteurs, nommés C1 et C2, dont les traces temporelles (signaux) sont utilisées pour le calcul des courbes de dispersions calculées avec la nouvelle méthode (GST-chapitre 4). Les figures 8.7 et 8.8 montrent 4 profils de vitesse des ondes de cisaillements normalisés ainsi que les contours de vitesse des ondes de Rayleigh calculés le long des lignes 1AV et 2AM respectivement. Comme pour la Figure 8.5, les lignes pointillées rouges indiquent la zone couverte par les essais réalisés à l'aide de la configuration perpendiculaire. À la suite de l'analyse des résultats des essais MMASW (Fig. 8.7-8.8), il a été conclu que le remblai au-dessus du ponceau de l'A50 ne comporte aucune anomalie.

Comme il est montré dans le chapitre 4, les calculs des vitesses de groupe et de phase avec la méthode proposée (GST) et la méthode MMASW ne sont pas effectués de la même manière.

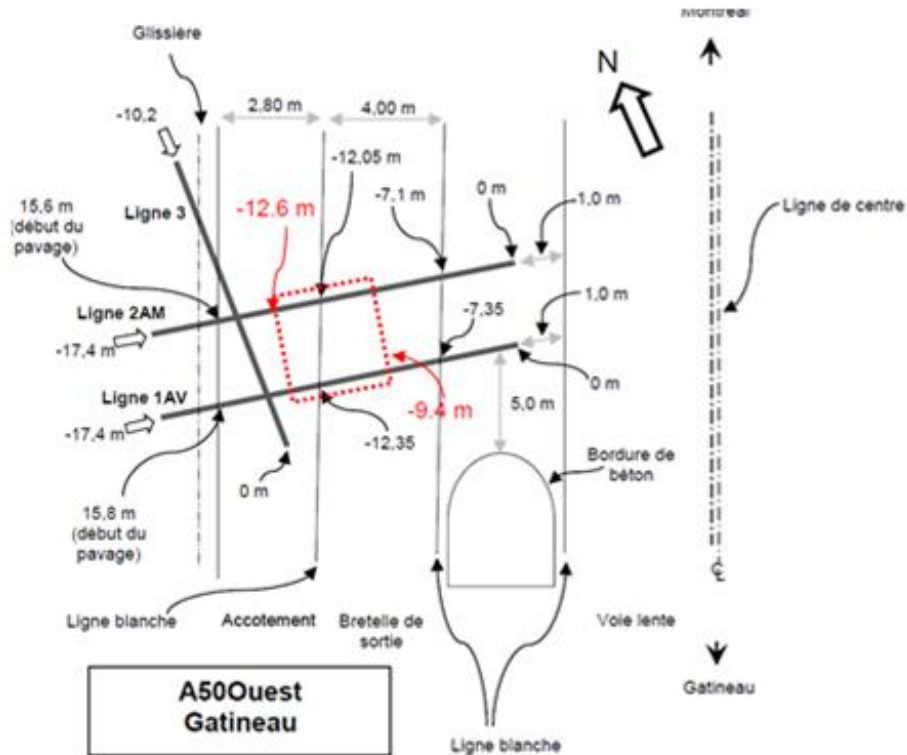


Figure 8.5. Localisation des essais MMASW sur l'autoroute 50 Ouest. Les pointillés rouges indiquent la position des essais réalisés à l'aide de la configuration perpendiculaire.

Néanmoins, pour un même profil de sol, les vitesses de groupe et de phase calculées à l'aide de ces deux méthodes devraient atteindre des valeurs similaires. Afin de valider cette hypothèse, la Figure 8.9a-b montre les vitesses de groupe calculées à l'aide de la GST aux positions indiquées par les cercles C1 et C2 de la figure 8.6. Par rapport aux lignes 1AV et 2AM, ces capteurs se trouvent vis-à-vis la position -11.8 m comme l'indique la ligne pointillée noire des Figures 8.7b et 8.8b. Comme le montre la Figure 8.9a-b, la GST permet de reconnaître la présence d'au moins deux différents modes de propagation des ondes de Rayleigh, le mode fondamental (R0) et le premier mode supérieur (R1). La figure 8.9a-b montre également qu'une partie importante de l'énergie des ondes de Rayleigh appartient aux modes de propagation supérieurs des ondes de Rayleigh à des fréquences supérieures à 35 Hz.

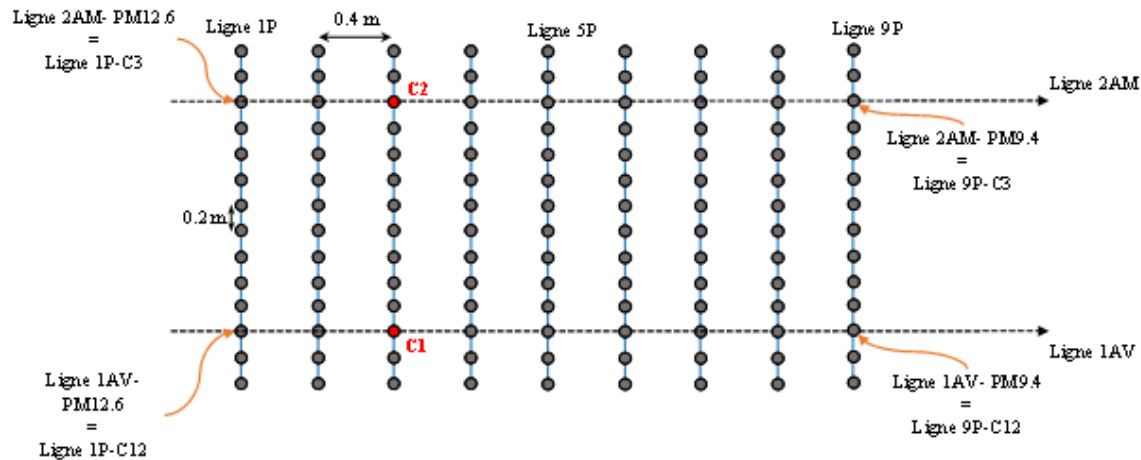


Figure 8.6. Schéma montrant la configuration des essais réalisés à l'aide de la configuration perpendiculaire. Les cercles C1 et C2 indiquent la position des capteurs utilisés pour le calcul des courbes de dispersions des figures 8.8 et 8.9.

La figure 8.10a montre les courbes de dispersion en termes de vitesse de phase-fréquences tandis que la figure 8.10b montre les courbes de dispersion en termes de longueur d'onde-vitesse de phase des modes R0 et R1 identifiés à l'aide de la GST de la figure 8.9a. Comme le montre la figure 8.10b, les vitesses de phase calculées à différentes longueurs d'onde des courbes de dispersion du mode R0 de C1 et C2 sont compatibles avec les vitesses présentées par les contours de vitesse de phase calculés à la position -11.8 m des lignes 1AV et 2AM (figs. 8.7b-8.8b). En effet, dans les deux cas, les vitesses de phase varient entre 100 m/s à des longueurs d'onde de près de 0 m jusqu'à près de 320 m/s à une longueur d'onde de 12 m.

Cela suggère donc qu'il serait possible de réaliser une tomographie en vitesse de phase similaire à celles des figures 8.4b et 8.5b à l'aide de la GST. Cependant, la présence de plusieurs modes de propagations à des fréquences supérieures à 35 Hz fait en sorte qu'il est nécessaire, pour chacun de signaux enregistrés, de correctement identifier et séparer le mode R0 afin de permettre le calcul des vitesses de phase sur une large bande de fréquences.

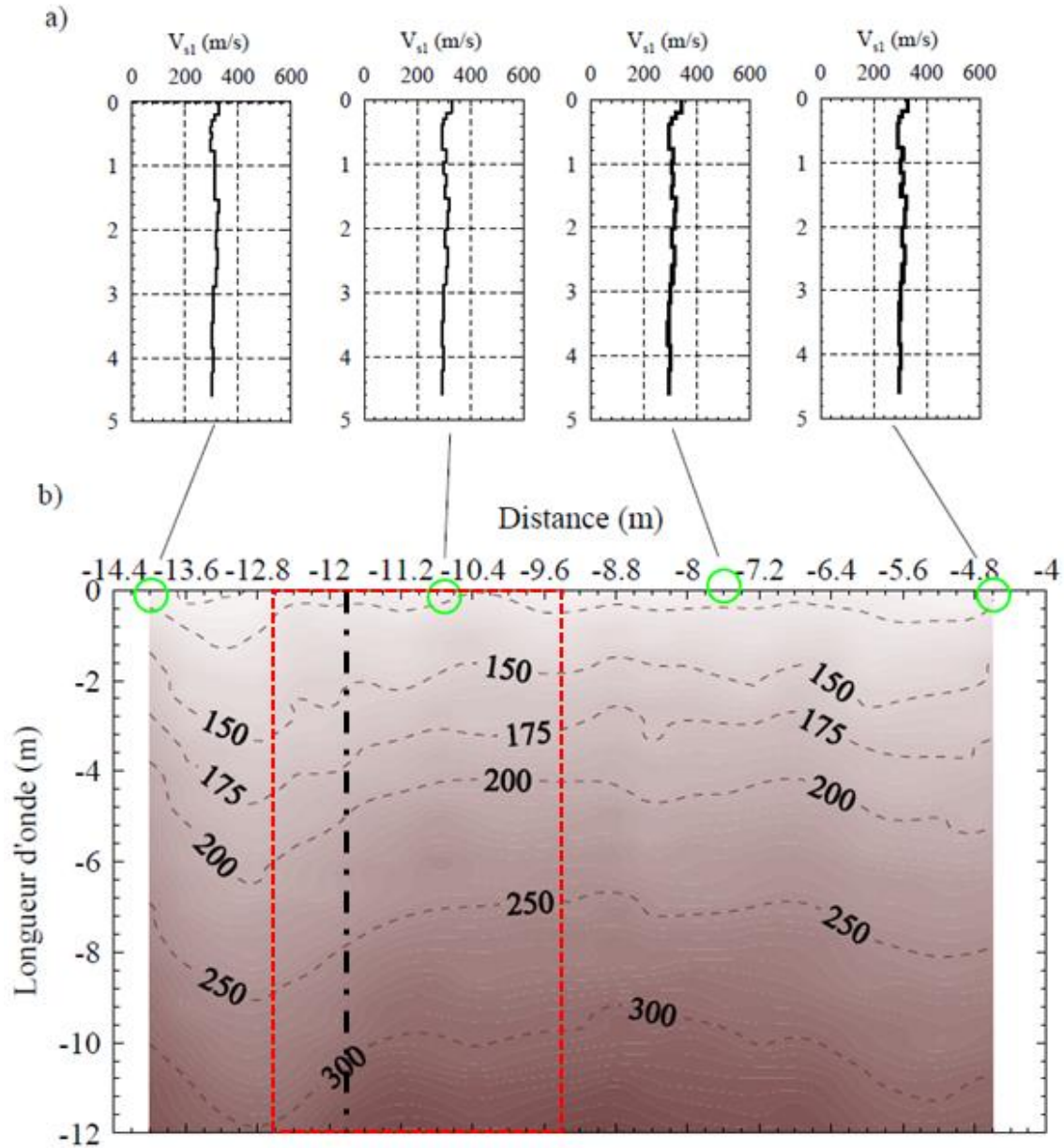


Figure 8.7. (a) Profils de vitesse des ondes de cisaillements normalisés et (b) contours de vitesse des ondes de Rayleigh calculés le long de la ligne 1AV. La zone délimitée par les lignes pointillées rouges indique la zone couverte par les essais perpendiculaires. La ligne pointillée noire indique la position où se trouve le capteur C1.

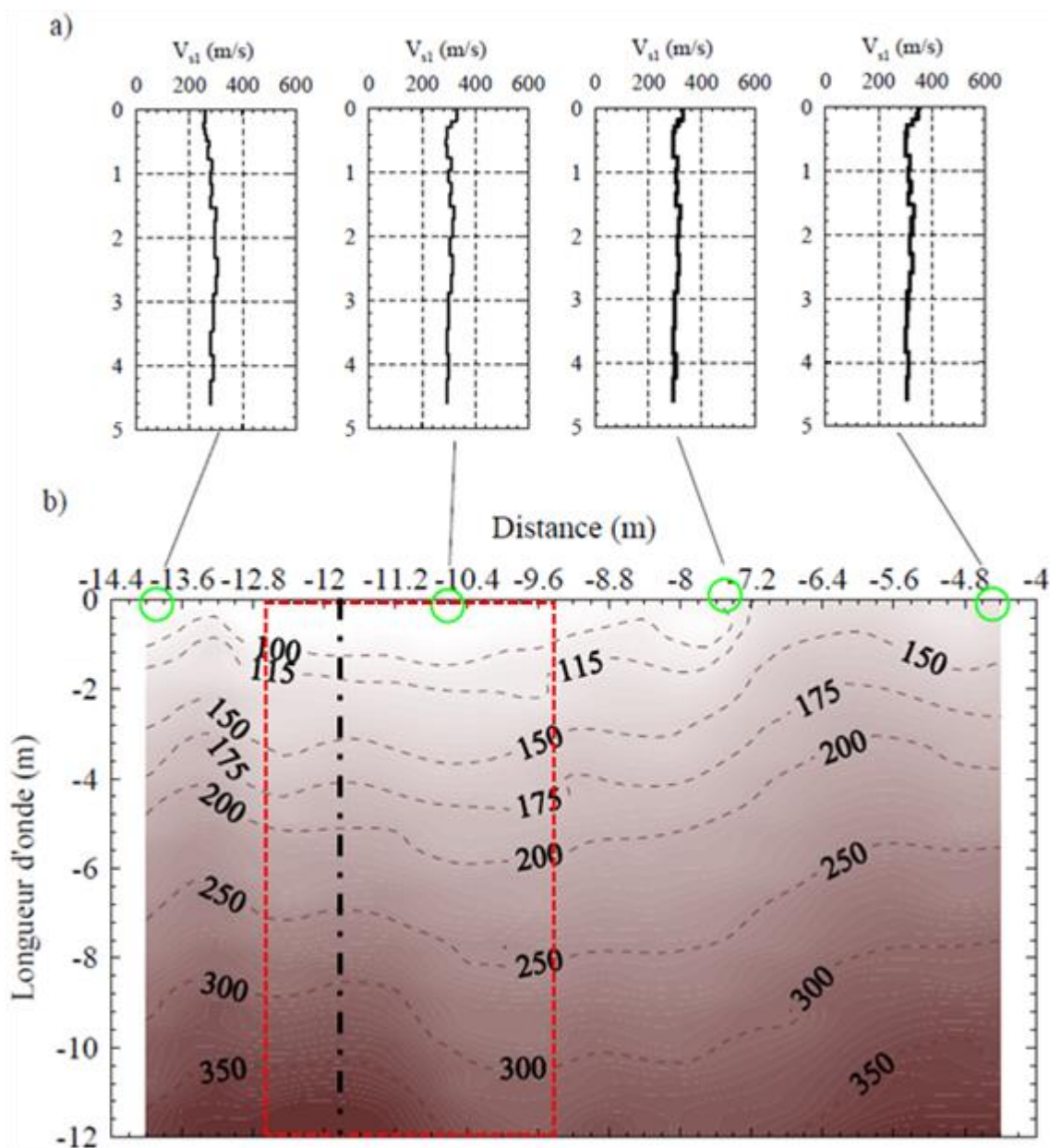


Figure 8.8. (a) Profils de vitesse des ondes de cisaillements normalisés et (b) contours de vitesse des ondes de Rayleigh calculés le long de la ligne 2AM. La zone délimitée par les lignes pointillées rouges indique la zone couverte par les essais perpendiculaires. La ligne pointillée noire indique la position où se trouve le capteur C2.

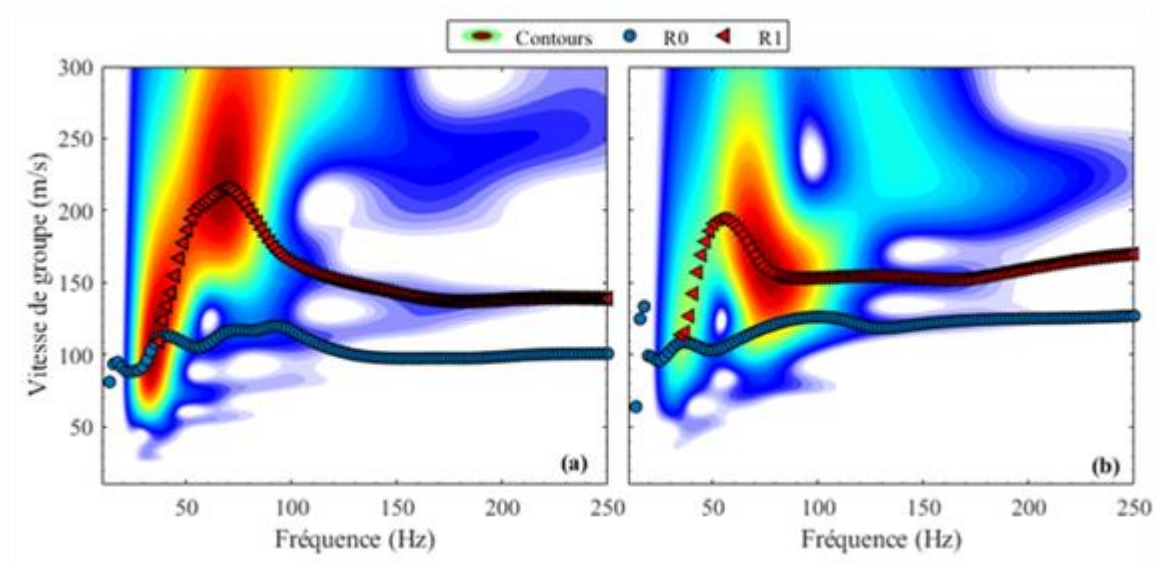


Figure 8.9. Énergie et courbes de dispersions (fréquences-vitesse de groupe) des modes R0 et R1 calculées avec la GST à partir de l'accélération verticale du sol mesurée par le capteur placé à la position (a) C1 et (b) C2.

Le processus de séparation des différents modes est cependant difficilement automatisable et doit être réalisé à l'aide d'un processus itératif. Également, lors du calcul de la vitesse de phase à l'aide de la GST, un déphasage de l'ordre de $2\pi n$, où n est un nombre entier, peut se produire ce qui causera une variation importante de la vitesse de phase surtout à de basses fréquences (Tremblay, 2018). Bien qu'il soit facile de corriger ce déphasage, ce processus est également difficilement automatisable et nécessite une bonne connaissance du domaine de traitement de signal afin de s'assurer que les vitesses de phase calculées à l'aide de la GST sont correctes. Ces deux facteurs font en sorte qu'il est pour l'instant plus facile de présenter les tomographies en termes de vitesse de groupe. Ainsi, comme le montre la figure 8.8, le calcul des vitesses de groupe à des fréquences plus basses que 35 Hz garantit que les vitesses calculées appartiennent au mode R0.

La figure 8.11 montre donc la variation de la vitesse de groupe dans la zone couverte par les relevés perpendiculaires (fig. 8.5) à des fréquences de 25 et 35 Hz sous forme de cartes de contours.

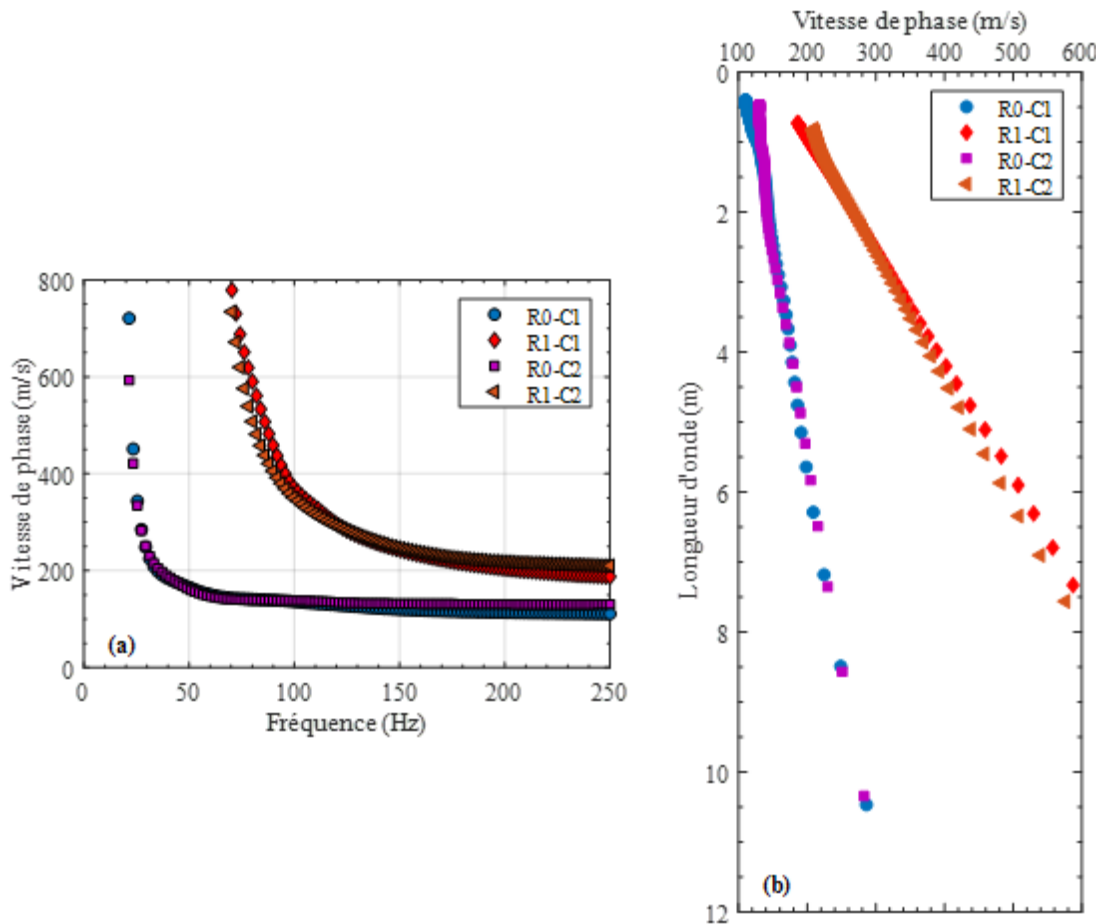


Figure 8.10. (a) Courbes de dispersion en vitesse de phase / fréquence et (b) courbes de dispersion en vitesse de phase / longueur d'onde des modes R0 et R1 identifiés à l'aide de la figure 8.5a-b.

La figure 8.11 montre également la position des lignes 1AV et 2AM et des capteurs C1 et C2. Cette figure permet de remarquer que les vitesses de groupe sont généralement plus faibles le long de la ligne 1AV que le long de la ligne 2AM. Cette zone où les vitesses sont plus faibles est située entre les lignes 1P et 3P et entre les capteurs 6 et 14. Cette zone où la vitesse est plus faible est également visible entre les PM -14.2 et -12.0 dans les contours de vitesse des ondes de Rayleigh calculés le long de la ligne 1AV (Fig. 8.7b). Cependant, les profils de vitesse des ondes de cisaillements (Fig. 8.7a) calculés près de cette zone n'indiquent pas une diminution de la vitesse assez importante pour indiquer la présence d'une anomalie.

Il sera donc important au cours des travaux réalisés dans le futur de définir à partir de quel seuil la variation de la vitesse de groupe peut indiquer la présence d'une anomalie.

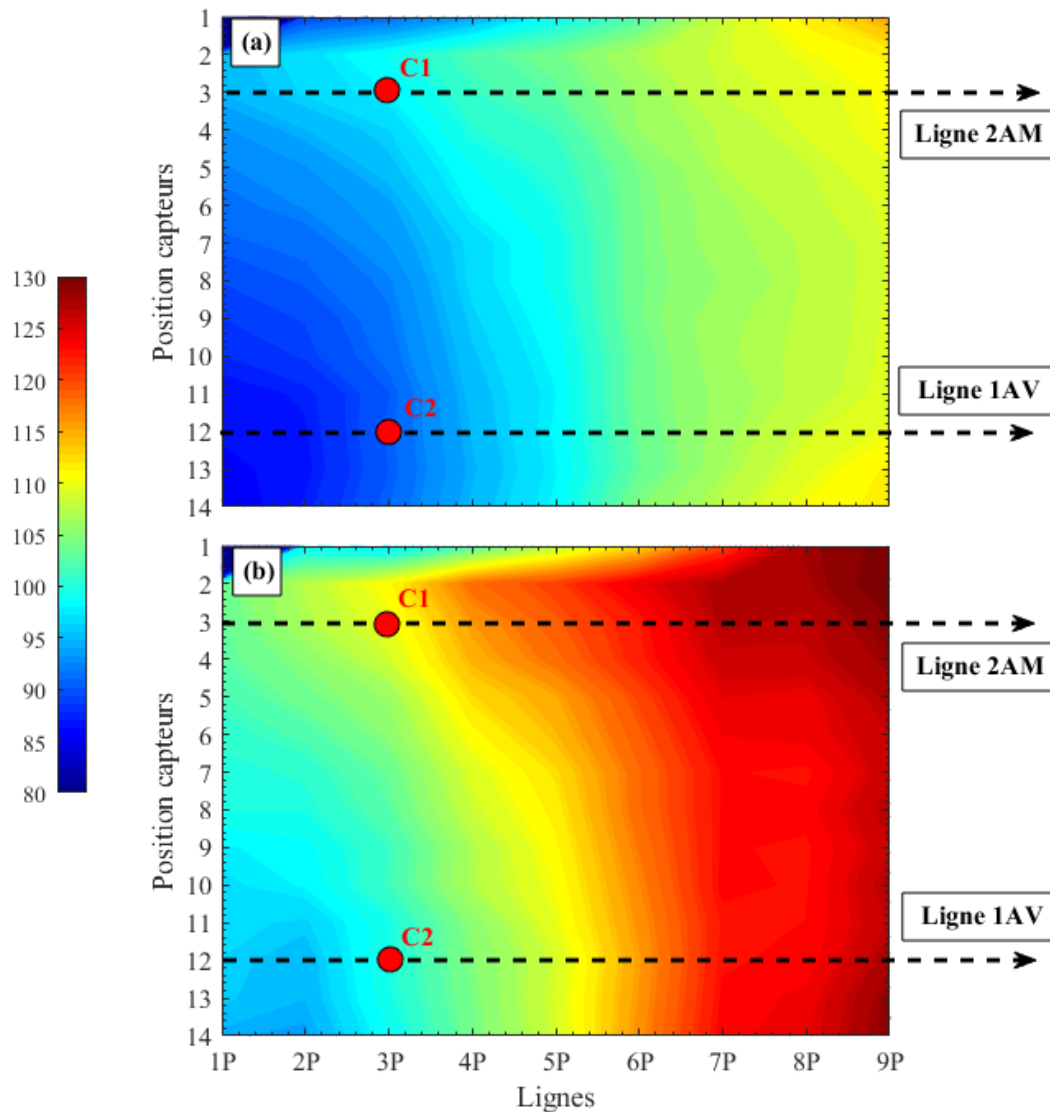


Figure 8.11. Contours des vitesses de groupe calculées à (a) 25 et (b) 35 Hz à l'aide de la GST. Les lignes pointillées indiquent la position des lignes 1AV et 2AM et les cercles rouges indique la position des capteurs C1 et C2. L'échelle à gauche montre les valeurs de vitesse de groupe associées aux couleurs des contours.

8.4 Autoroute 40, Trois-Rivières

Au mois de novembre 2017, des relevés MMASW ont été effectués sur un ponton situé sur l'autoroute 40 près de Trois-Rivières (fig. 8.12). Deux séries de relevés sismiques avec la configuration perpendiculaire ont également été réalisées sur ce ponton.

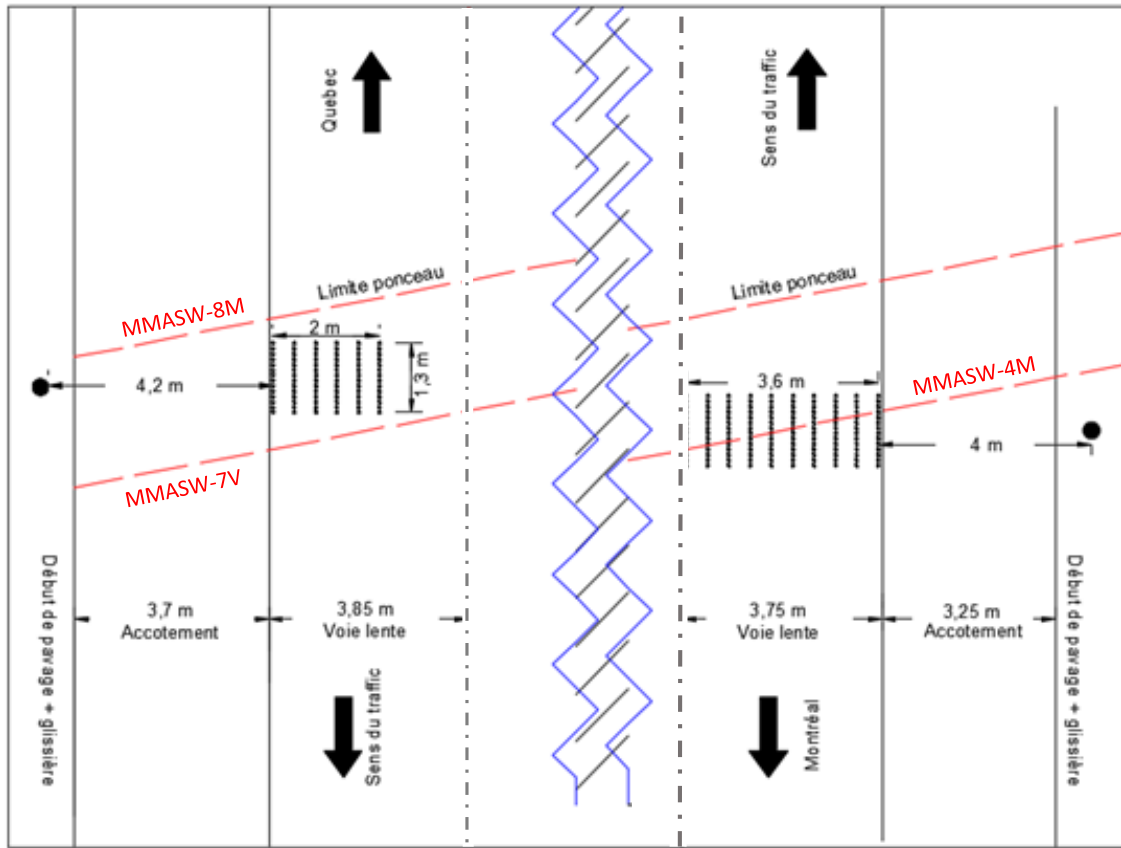


Figure 8.12. Localisation des relevés perpendiculaires, A-40, ponton P-12600, Ligne-Ligne = 0.4 m, Capteur-Capteur = 0.1 m, échelle : 12:1.

Le ponton, identifié P-12600, est situé à 6.5 m de profondeur, est une structure de béton constituée de trois cellules circulaires de 2,4 m de diamètre chacune formant une large structure de 8 m d'envergure. Les différents relevés, situés sur les limites du ponton et par-dessus le ponton, avaient pour but de détecter l'existence de zones de faiblesses, de cavités et de vérifier l'intégrité du sol avoisinant le ponton.

Comme illustré à la figure 8.12, la première série d'essais perpendiculaires a été effectuée sur la voie lente de l'autoroute 40 direction Est. Au total, 6 lignes de 14 capteurs espacées de 0.4 m en été réalisées comme le montre le tableau 8.1. La zone couverte par les relevés se situe par-dessus le toit du ponton qui est délimité par la ligne MMASW-7V (entre PM+1.8 et PM+3.8, fig. 8.15a) et par la ligne MMASW-8M (entre PM+1.85 et PM+3.85, fig. 8.15b) des relevés MMASW, au niveau de la voie lente direction Est.

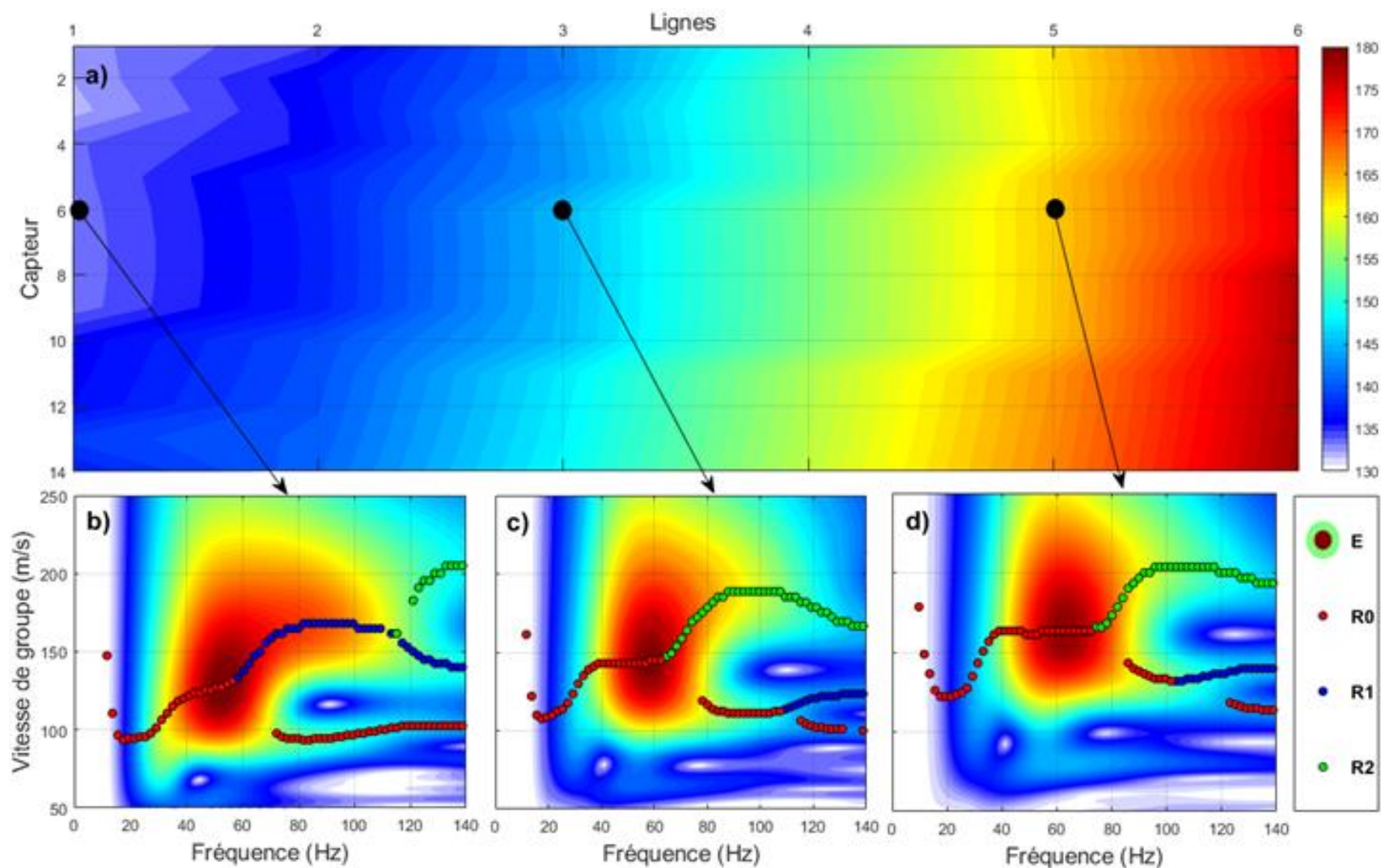


Figure 8.13. a) Tomographie en vitesse de groupe calculée à 50 Hz à l'aide de la GST obtenue avec la première série de relevés perpendiculaires, A-40 direction Est, ponton P-12600. Énergie et courbes de dispersions (fréquence-vitesse de groupe) des modes R0, R1 et R2 calculées avec la GST à partir de l'accélération verticale du sol mesurée par différents capteurs localisés sur la tomographie, b) Capteur 6-Ligne 1 (C6-L1), c) C6-L3 et d) C6-L5

La figure 8.13a montre la tomographie en vitesse de groupe calculée à 50 Hz. Comme le montre la figure 8.13a, l'augmentation de la vitesse de groupe est relativement uniforme le long des relevés ce qui témoigne d'un remblai uniforme. Cette augmentation uniforme est due, entre autres, à la méthode d'analyse utilisée qui consiste à analyser les signaux enregistrés par chaque capteur individuellement à partir de la source, contrairement à la méthode MMASW qui considère un ensemble de 16 capteurs pour le calcul des vitesses. Les zones quadrillées en pointillées rouge sur la figure 8.15a et 8.15b correspondent aux PM des lignes MMASW-7V et MMASW-8M qui interceptent les lignes de la première série. Les tomographies en vitesse d'ondes de cisaillement obtenues avec la méthode MMASW (fig. 8.15a et 8.15b) indiquent l'absence d'anomalie ou de cavité. Ceci concorde avec les observations effectuées à partir des relevés de la première série de lignes perpendiculaires. Le choix de visualiser la tomographie en vitesse de groupe (fig. 8.13a) à 50 Hz peut être justifié en analysant l'énergie et les courbes de dispersions (fréquences-vitesse de groupe) des accélérations mesurées à travers les relevés (figure 8.13b, c et d). À l'aide de ces trois graphiques, il est possible de constater que l'énergie contenue entre 40 Hz et 60 Hz vibre sur un seul mode, appelé R0. C'est donc dans cet intervalle de fréquence que la vitesse de groupe doit être analysée afin d'éviter que l'énergie de différents modes ne vienne affecter les vitesses calculées. Également, l'intervalle de fréquence dans lequel le mode R0 domine (40-60 Hz), contient des ondes se propageant à des fréquences (longueurs d'onde) affectées par l'ensemble du sol recouvrant le ponceau permettant ainsi la détection d'une anomalie qui serait située dans cette couche de sol. Au-delà de cet intervalle, les modes supérieurs (R1, R2,...) apparaissent d'une manière aléatoire, rendant l'analyse impossible sans effectuer de séparation de mode. L'étendue de cet intervalle, propre à chaque structure, est reliée à la profondeur du ponceau, la nature du sol en dessus du ponceau, ainsi que la nature et l'épaisseur de la couche de revêtement rigide (Tremblay, 2018). L'identification de cet intervalle est donc une étape majeure pour pouvoir correctement porter un jugement quant à l'intégrité du sol au voisinage d'un ponceau. À travers les autres études de cas qui vont suivre, cet aspect ainsi que l'effet de sélectionner des fréquences au-delà de cet intervalle seront montrés.

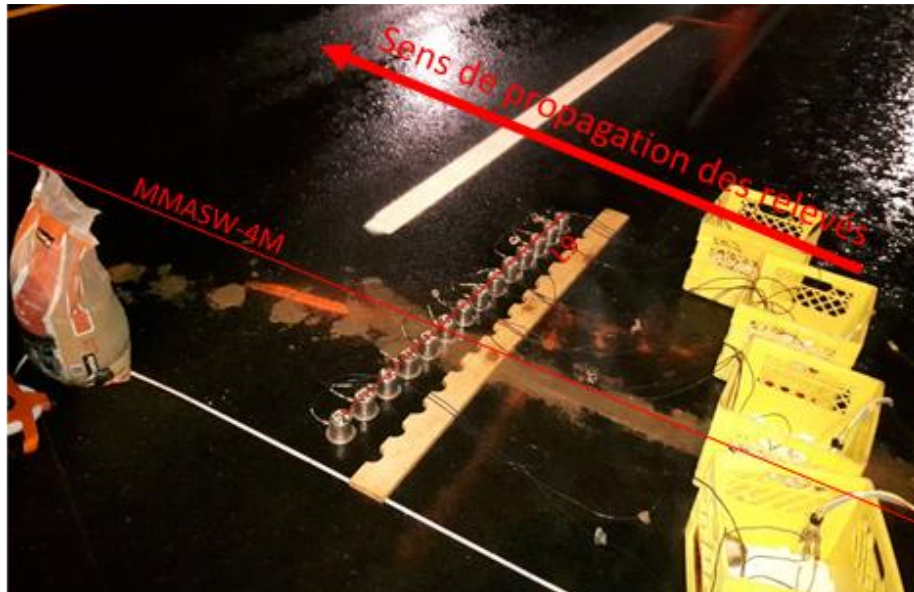


Figure 8.14. Deuxième série des relevés perpendiculaire, Autoroute 40, Direction Ouest.

La deuxième série de relevés perpendiculaires (fig. 8.12 et fig. 8.14) s'étant de l'accotement jusqu'à la voie lente de la direction ouest de l'autoroute 40. Comme le montre le tableau 8.1, cette série est constituée de 10 lignes espacées de 0.4 m qui sont composées de 14 capteurs espacés de 0.1 m couvrant ainsi 4.68 m². Cette série de relevés intercepte la limite amont du ponceau, donc la ligne MMASW-4M, en biais (fig. 8.12 et fig. 8.14).

La figure 8.15c montre la tomographie des vitesses d'onde de cisaillement de la ligne MMASW-4M. Cette tomographie suggère la présence d'un remblai plutôt compétent ne présentant aucun signe d'une anomalie. La zone quadrillée en rouge sur la figure 8.15c (entre PM+0.1 et PM+3.7, fig. 8.15c) représente la partie des relevés de la ligne MMASW-4M qui croise la deuxième série de relevés telle qu'illustrée sur la figure 8.12 et la figure 8.14. La tomographie des vitesses de groupe calculées à 30 Hz à l'aide de la GST obtenue avec la deuxième série de relevés perpendiculaires illustrée à la figure 8.16e nous permet d'en arriver au même verdict que la tomographie des vitesses des ondes de cisaillement de la ligne MMASW-4M (fig. 8.15c). C'est à dire, que le remblai ne contient aucune anomalie. En analysant individuellement les signaux enregistrés par différents accéléromètres à travers les 10 lignes de la deuxième série (Figure 8.16a, b, c et d), un intervalle ne contenant qu'un seul mode de propagation allant de 20 Hz jusqu'à 40 Hz a été identifié.

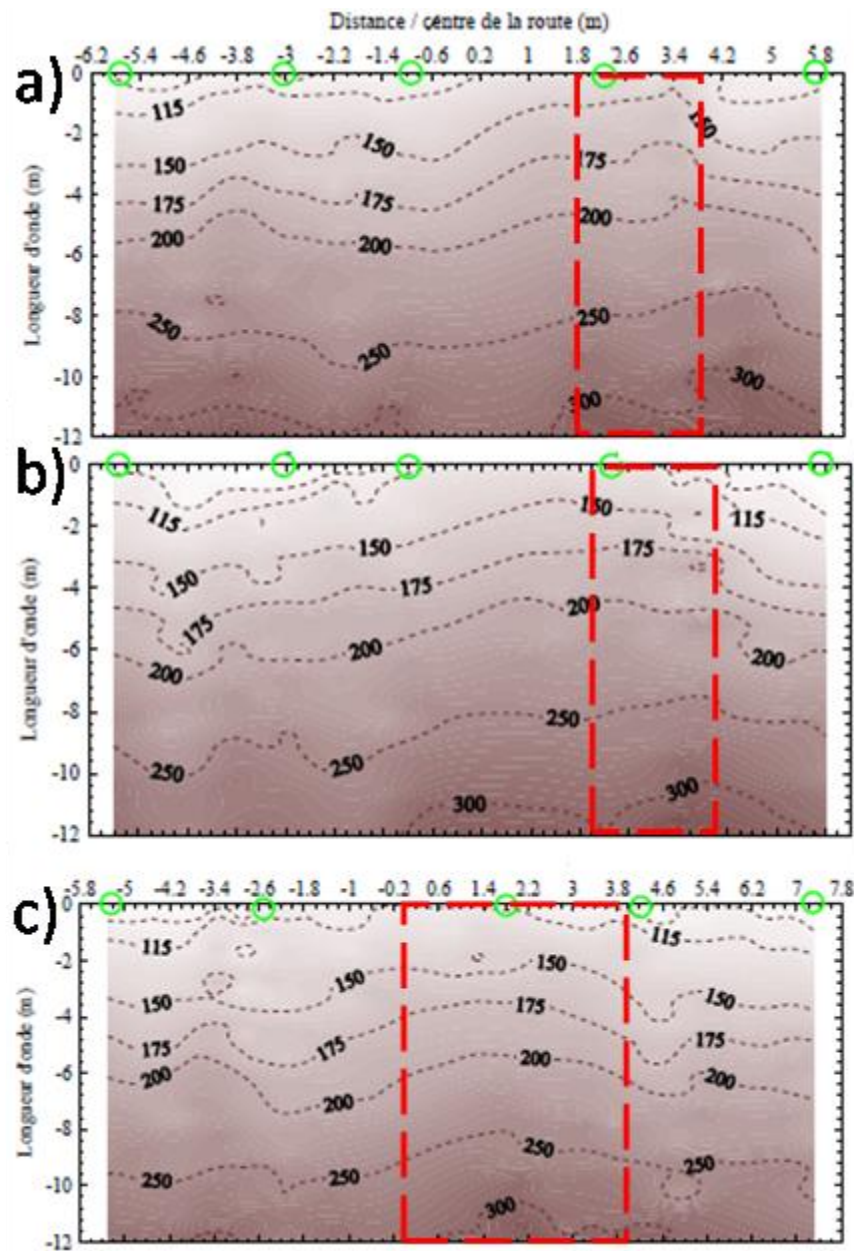


Figure 8.15. Tomographie des vitesses des ondes de cisaillement obtenue avec la méthode MMASW, A40 Direction Est, le long, a) des lignes 5V-7V, b) des lignes 6M-8M, c) des lignes 2M-4M.

Il est à noter que puisque l'ensemble du sol recouvrant le ponton affecte la propagation des ondes se propageant dans cet intervalle, les tomographies de vitesse de groupe obtenues dans ce dernier sont similaires à celle présentée à la figure 8.16e et montrent un accroissement uniforme et homogène des vitesses de groupe le long des relevés. Ce phénomène est associé à un remblai ne présentant aucun signe de la présence d'anomalies.

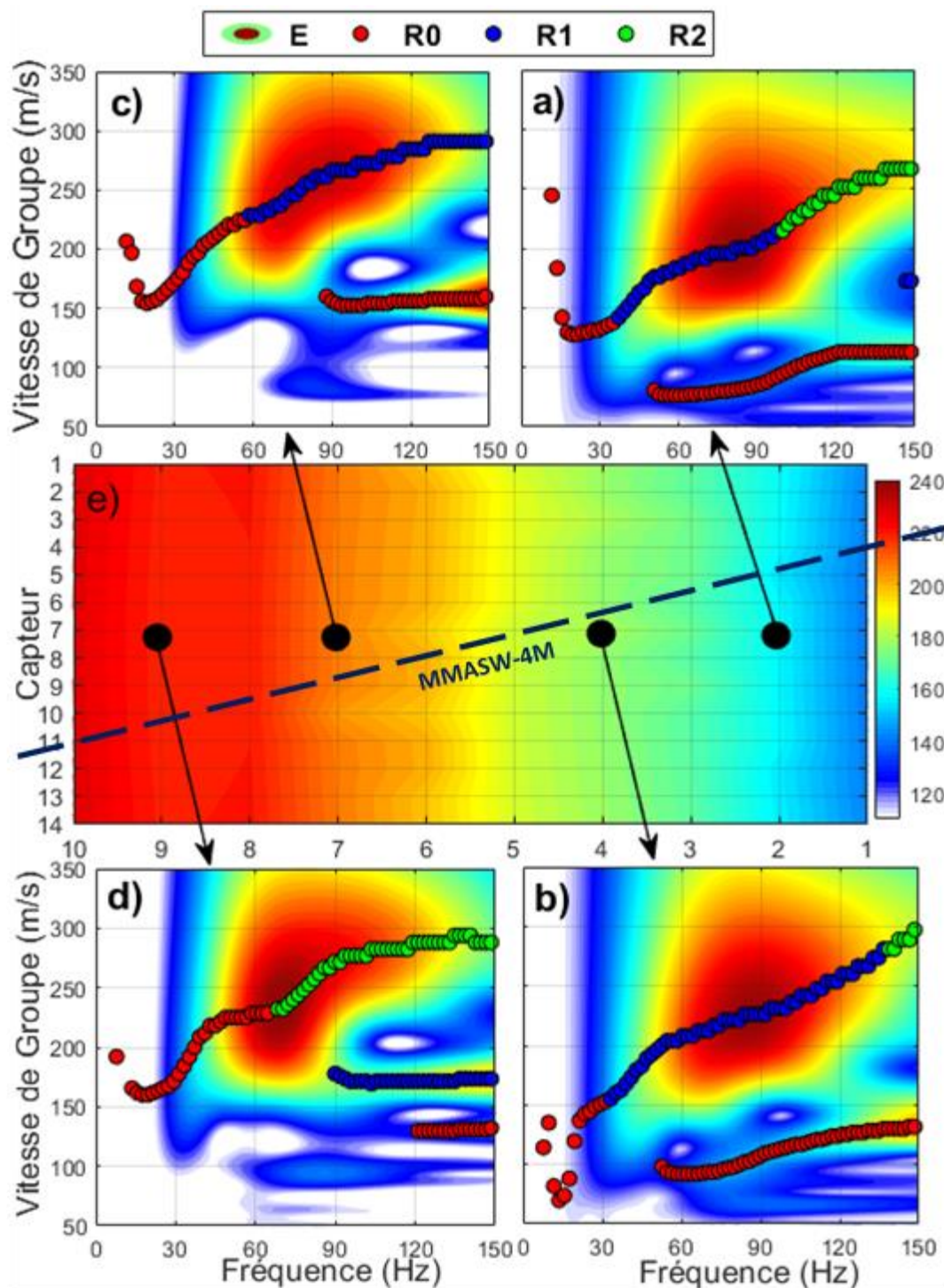


Figure 8.16. e) Tomographie des vitesses de groupe calculée à 30 Hz à l'aide de la GST obtenu avec la deuxième série de relevés perpendiculaires, A-40 direction Ouest, ponton P-12600, ainsi que l'énergie et courbes de dispersions (fréquences-vitesse de groupe) des modes R0, R1 et R2 calculées avec la GST à partir de l'accélération verticale du sol mesurée par les capteurs localisés sur la tomographie, a) C7-L2, b) C7-L4 et c) C7-L7 et d) C7-L9.

8.5 Autoroute 20, Drummondville

Au mois de mai 2018, une série de 12 lignes en configuration perpendiculaire (tableau 8.1) ainsi que des relevés MMASW ont été effectués sur le ponceau 6548-0 localisé sur l'autoroute 20 à Drummondville (fig. 8.17. Ces lignes sont situées par-dessus le ponceau, au niveau de l'accotement de la direction ouest de la chaussée.). Le ponceau, d'un diamètre de 0.9 m, est localisé à une profondeur de 10 m sous la chaussée. La source, qui est placée sur la surface du sol, est décalée de 3.4 m de la première ligne. Les 12 lignes perpendiculaires sont délimitées par la ligne 1 et la ligne 2 des relevés MMASW. La ligne MMASW-1 intercepte les 12 lignes de la configuration perpendiculaire au niveau du capteur C12, alors que la ligne MMASW-2, les intercepte au niveau du capteur C2 tel qu'illustré à la figure 8.17.

Les tomographies des vitesses de groupe présentent beaucoup de variabilité dans l'intervalle de fréquence allant de 15 Hz à 30 Hz, tel qu'illustré à la figure 8.19a à 25 Hz. Cet intervalle de fréquences dont les vitesses de propagation pourront être analysées a été sélectionné suite à l'analyse individuelle de la distribution d'énergie et de la dispersion des vitesses de groupe calculées à partir des différents signaux mesurés le long des relevés (fig. 8.19c et fig. 8.19d). Comme le montre la Figure 8.19c et d, dans l'intervalle de 15 à 30 Hz, seul le mode R0 domine. Les tomographies des vitesses d'onde de cisaillement le long des lignes MMASW-2 et MMASW-1, illustrées à la figure 8.18a et 8.18b respectivement, indiquent la présence d'anomalie au voisinage du PM-7 le long de la ligne MMASW-2 (fig. 8.18a). La présence d'une zone décompactée a été confirmée par le forage F-05 (localisé sur les figures 8.18a et 8.19a), indiquant des valeurs de N de 3 à 4 allant jusqu'à 1 partir de 8m de profondeur (Annexe A). En plus de la présence d'anomalies, les tomographies des vitesses des ondes de cisaillement (fig. 8.18a e b) montrent l'existence d'une assez grande variabilité des vitesses de propagations des ondes de cisaillements à travers le remblai. Il est donc intéressant de remarquer que la tomographie en vitesse de groupe de la figure 8.19a indique également une grande variation de la vitesse de groupe le long de la zone investiguée.

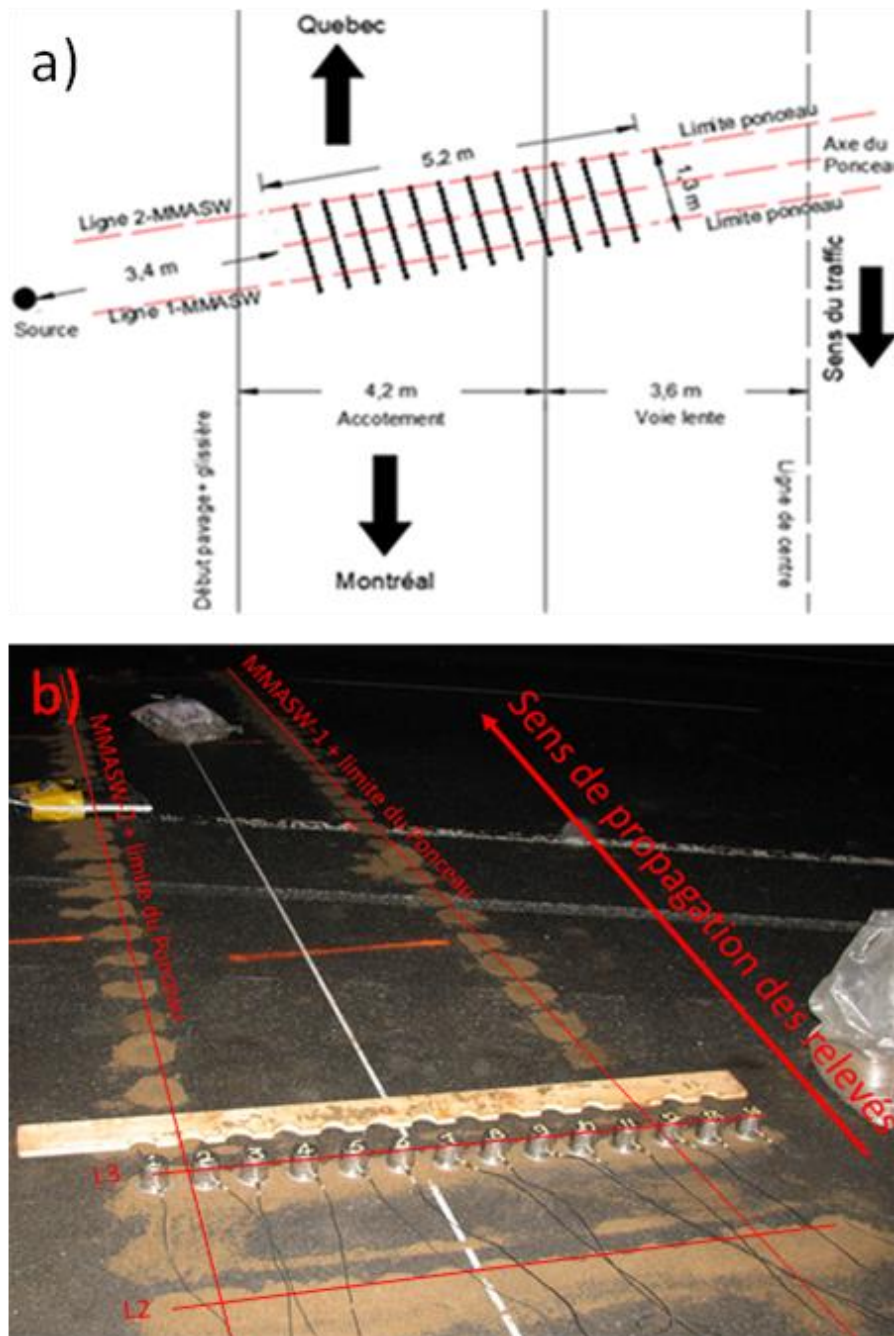


Figure 8.17. a) Localisation des relevés perpendiculaires, A-20, ponceau 6548-0, échelle : 17:1. b) Relevés perpendiculaires, Autoroute 20, Direction Ouest.

Les zones où se trouvent des contrastes de vitesses importants sur la tomographie des vitesses de groupe (fig. 8.19a), soit L2, L4 et L9, ont été rapportées sur les tomographies des vitesses des ondes de cisaillement (fig. 8.18) dans le but de pouvoir comparer les deux approches.

La discordance dans la localisation des zones problématiques identifiées à l'aide des tomographies des vitesses des ondes de cisaillement (MMASW, figure 8.18), et la tomographie des vitesses de groupe (figure 8.19), peut être expliquée par les différences qui existent entre les deux approches. Premièrement, tel qu'expliqué dans le chapitre 4, la méthode proposée est, jusqu'à ce stade du projet, basée sur les vitesses de groupe calculées individuellement à chaque capteur à partir de la source. L'analyse s'effectue dans l'intervalle de fréquence où un seul mode de propagation domine le signal. Cependant, bien que ce mode soit le plus souvent associé au mode R0, il est également possible, dans certaines conditions, que ce mode soit en réalité un mélange entre le mode R0 et un/des modes supérieurs. Néanmoins, la présence de modes supérieures n'empêche en rien la détection d'anomalies dans le sol, puisque ces derniers, tout comme le mode R0, sont affectés par la présence d'une anomalie.

Lorsque la méthode MMASW est utilisée, une grande emphase est placée sur l'identification de chacun des modes de propagations puisque l'identification de chacun d'eux est nécessaire pour réaliser le processus d'inversion permettant le calcul des vitesses des ondes de cisaillements. Pour les vitesses de groupe, la présence d'anomalies dans le sol peut, dépendamment de la fréquence où les vitesses sont calculées, avoir comme effet son augmentation ou sa diminution. Cela explique pourquoi les tomographies en vitesses de groupe peuvent présenter beaucoup de variabilités en présence d'une anomalie (fig. 8.19a) contrairement aux tomographies réalisées au-dessus de remblais ne contenant pas d'anomalies (fig. 8.11, fig. 8.13a, fig. 8.16 et fig. 8.21a et b) où l'accroissement des vitesses de groupe est uniforme le long des relevés.

Les tomographies en vitesse de groupe sont calculées à partir de l'information contenue dans chacun des capteurs individuellement. Cette approche a été adoptée pour rehausser la réponse locale enregistrée par chaque capteur, puisqu'avec la méthode MMASW, un total de 16 capteurs sont utilisés simultanément pour le calcul des vitesses. Bien que cela permette une meilleure résolution pour la séparation des modes, cela cause également une perte de résolution en ce qui attrait à la localisation de la présence d'une cavité le long du profil investigué.

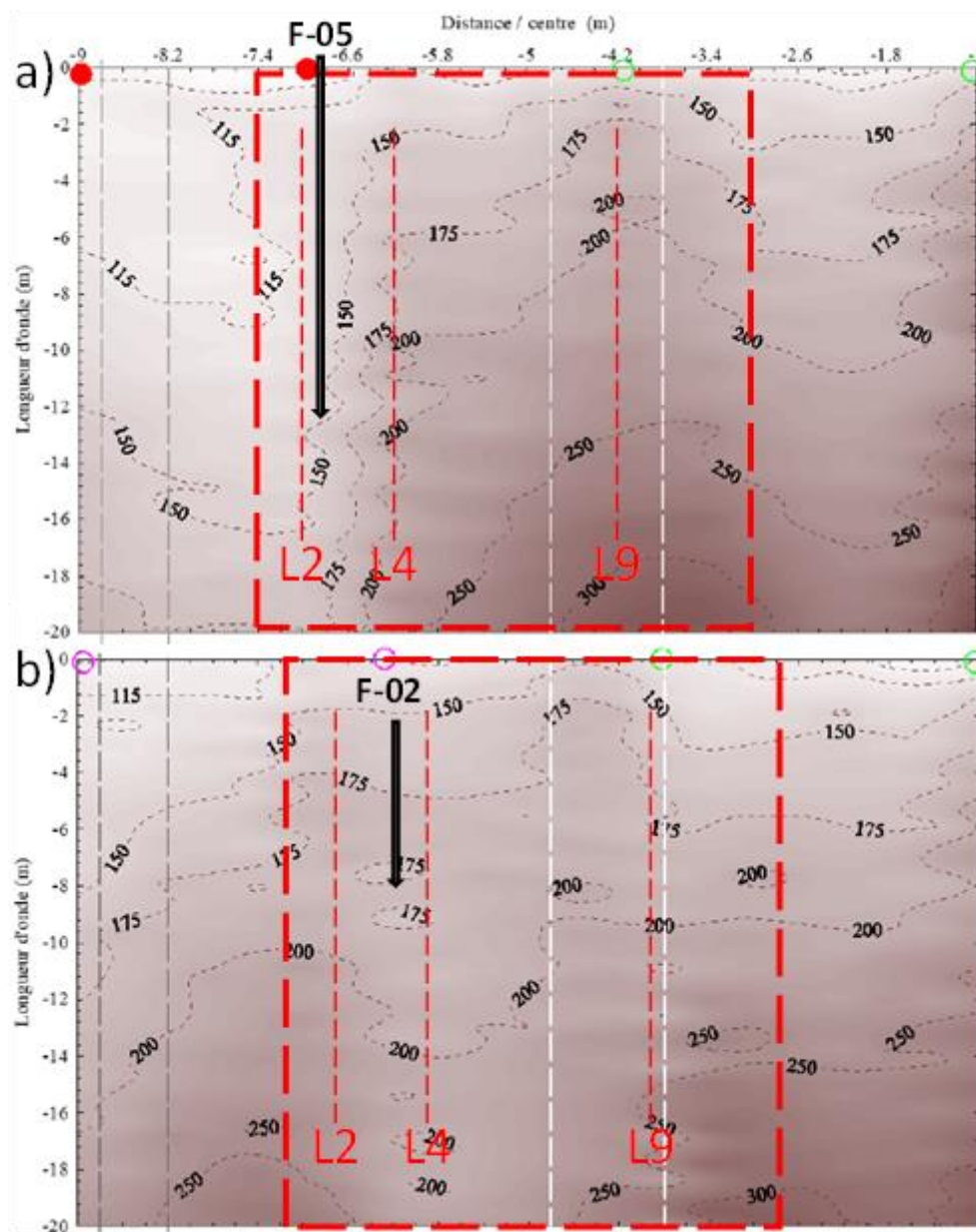


Figure 8.18. Tomographie des vitesses des ondes de cisaillement, entre PM-1 et PM-9 le long des lignes a) MMASW-2 et l'emplacement du forage F-05, b) MMASW-1 et l'emplacement du forage F-01, ainsi que le croisement des lignes MMASW avec les relevés perpendiculaires quadrillés en pointillés rouge.

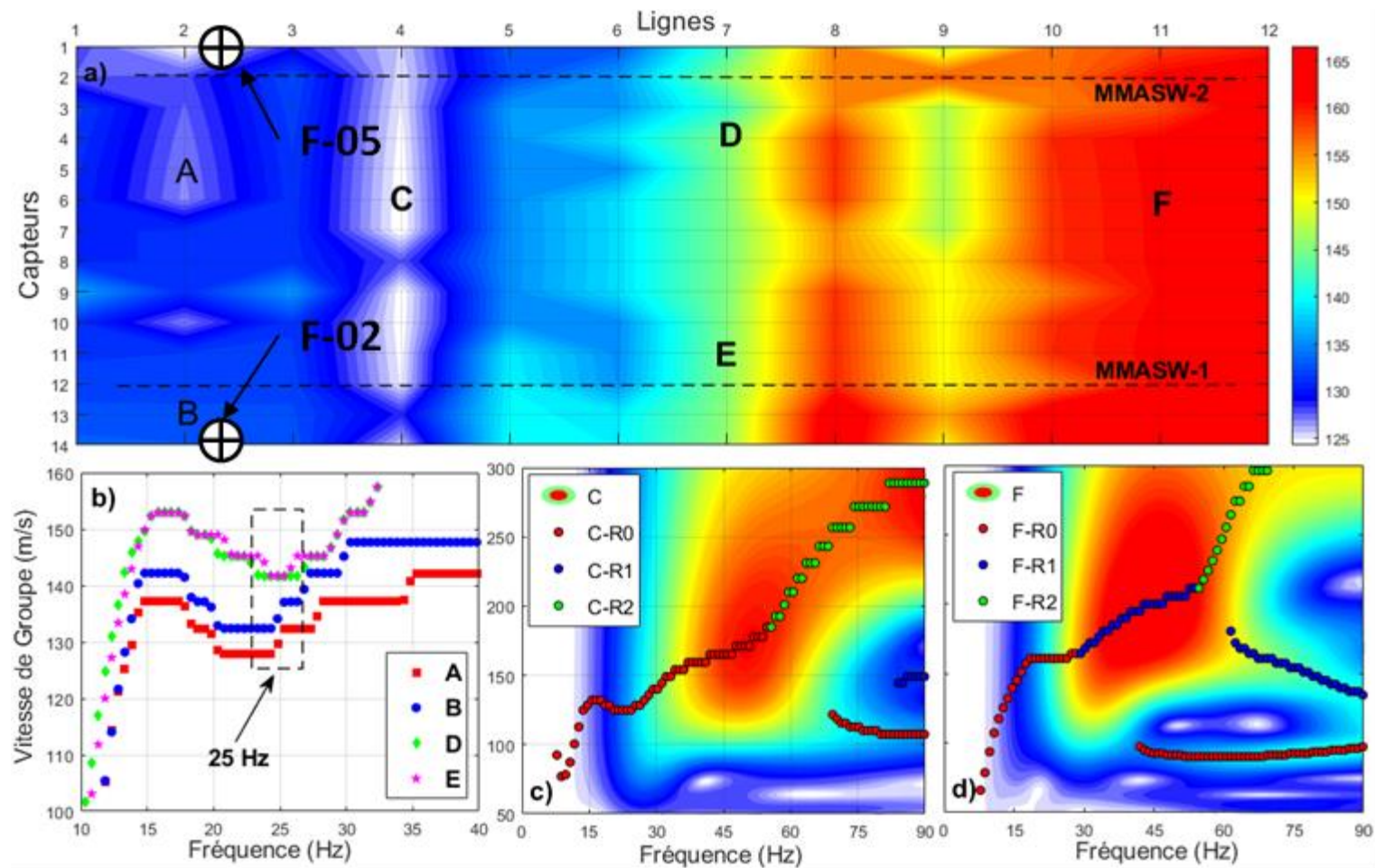


Figure 8.19. a) Tomographie des vitesses de groupe calculées à 25 Hz à l'aide de la GST obtenu les relevés perpendiculaires, A-20, direction Ouest, ponceau 6548-0, et les tracés des lignes MMASW-1 et 2, ainsi que l'emplacement des forages F-05 et F-02. Énergie et courbes de dispersions (fréquences-vitesse de groupe) des modes R0, R1 et R2 calculées avec la GST à partir de l'accélération verticale du sol mesurée par les capteurs localisés sur la tomographie, c) point C : C6-L4, d) point F : C6-L11, b) ainsi que la dispersion des vitesses de groupe du mode R0 des points A, B, D et E localisés sur a).

8.6 Autoroute 50, Gatineau

Au mois de septembre 2018, des relevés sismiques ont été réalisés pour vérifier l'intégrité du sol au voisinage du ponceau RTS 0050-01-070 situé sur l'autoroute A50 entre Montée Paiment et Labrosse. Ce ponceau est un TTOG de 1.8 m de diamètre, qui a été rempli par du béton maigre et qui se situe à 15 m de profondeur. Des relevés MMASW ainsi qu'une série de 14 lignes en configuration perpendiculaire localisée entre les lignes MMASW-1 et MMASW-2 ont été réalisés (fig. 8.20 et tableau 8.1). Les lignes perpendiculaires, délimitées par les lignes MMASW-1 et MMASW-2, sont localisées par-dessus le ponceau (le capteur 4 de chaque ligne est situé sur l'axe de l'ouvrage, fig. 8.20) et couvrent l'entièreté de l'accotement et une partie de la voie lente de la direction est d'autoroute 50.

L'analyse individuelle de la distribution d'énergie et des vitesses de groupe calculées le long des relevés montre que dans l'intervalle de fréquence de 20 à 50 Hz seul le mode R0 est présent. Ce phénomène est illustré à travers les accélérations mesurées aux points A et B (fig. 8.21), correspondant aux positions C3-L3 et C3-L12, respectivement. Tel qu'illustré dans la figure 8.21a et b, dans l'intervalle allant de 20 Hz à 50 Hz, les tomographies des vitesses de groupe présentent une variation de vitesses typiques d'un remblai autoroutier ne présentant aucun signe d'anomalies. Cependant, au-delà de 50 Hz, la Figure 8.21c, montre que les variations des vitesses ne sont plus constantes. Ce comportement est cependant causé par la présence de modes supérieurs à 60 Hz (fig. 8.21d et e) et n'est pas associé à une hétérogénéité dans le sol. En effet, à 60Hz, le mode R0 domine les signaux (fig. 8.20d), jusqu'au niveau de la ligne 7. Après la ligne 7, c'est plutôt le mode R1 qui domine les signaux provoquant un changement rapide de vitesse qu'on observe dans la figure 8.20c.

À ce stade de projet, malgré l'absence des tomographies des vitesses des ondes de cisaillement, il est possible de conclure qu'il s'agit d'un remblai uniforme sans anomalies dans la zone couverte par les relevés. Toutefois, on ne peut pas exclure l'existence d'anomalie à l'extérieur de ce volume.

Finalement, comme le montre la figure 8.21, la sélection de la fréquence utilisée pour l'analyse de la vitesse de group est une étape importante de l'analyse.

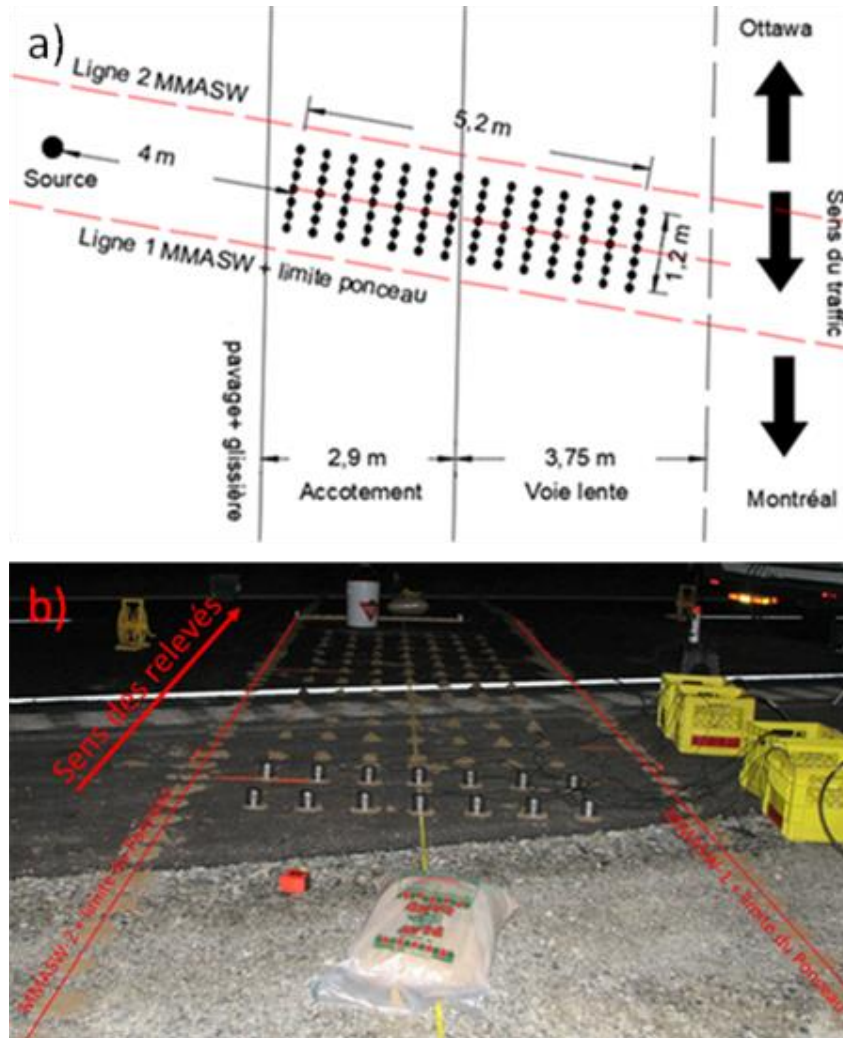


Figure 8.20. a) Localisation des relevés perpendiculaires, A-50, ponceau RTS 0050-01-070, échelle : 17:1. b) Relevés perpendiculaires, Autoroute 50, Direction Est.

En effet, en plus d'avoir à identifier l'intervalle fréquentiel où un seul mode de propagation est présent, à l'intérieur de cet intervalle, les fréquences correspondent à différentes longueurs d'onde. Il est important de savoir que ces longueurs d'onde se propagent généralement à des profondeurs égales ou plus grandes que la profondeur du ponceau. Les vitesses calculées à partir des plus basses fréquences reflètent donc la condition de tout le sol se trouvant autour et même en dessous du ponceau. En contrepartie, plus la fréquence augmente et que la longueur d'onde diminue, plus la profondeur de sol investigué est faible. Afin de détecter la présence d'une anomalie locale qui serait située juste au-dessus d'un ponceau, il est donc préférable de sélectionner une fréquence d'analyse se trouvant assez près du point de chevauchement entre les différents modes.

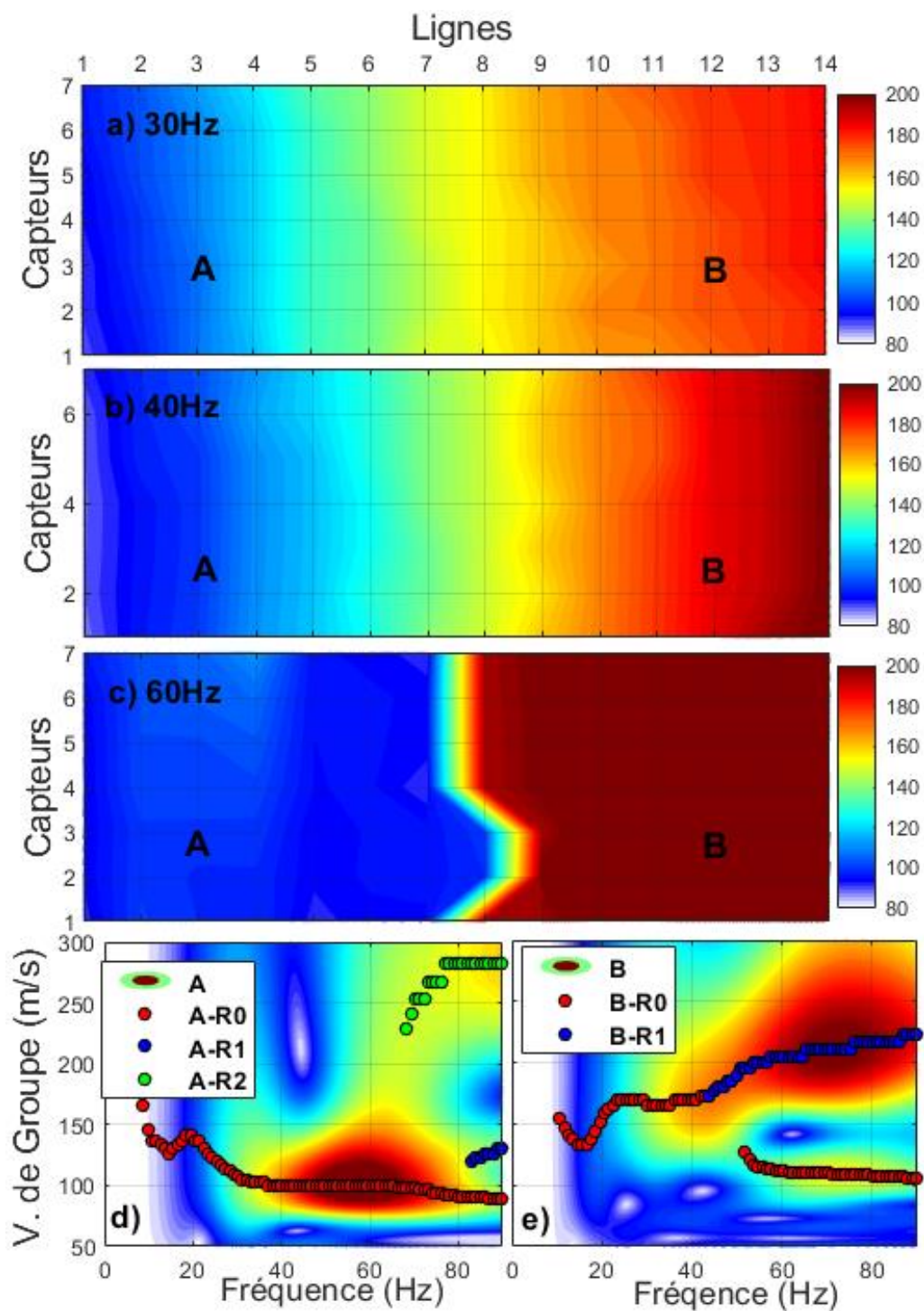


Figure 8.21. Tomographies des vitesses de groupe obtenues à l'aide de la GST des relevés perpendiculaires, A-50, direction est, pontceau RTS 0050-01-070, calculées à : a) 30 Hz, b) 40 Hz, c) 60 Hz, ainsi que la distribution d'énergie et courbes de dispersions (fréquences-vitesse de groupe) des modes R0, R1 et R2 calculées avec la GST à partir de l'accélération verticale du sol mesurée par les capteurs localisés sur la tomographie aux : a) point A, C3-L3 et b) point B, C3-L12.

8.7 Conclusion

Le chapitre 8 a permis de montrer que la configuration perpendiculaire permet le calcul de tomographies en vitesses de groupe en 2D et 3D du volume de sol investiguée. Une seule tomographie en 3D a cependant été présentée dans ce chapitre puisque ce type de tomographies est difficile à observer sans l'aide d'un ordinateur (une tomographie 3D sur support numérique adéquat pourrait être fourmis à la demande). Par rapport à la configuration habituellement utilisée lors des essais MMASW, la configuration perpendiculaire a comme avantages principaux de permettre une acquisition plus rapide des données ainsi que de permettre le calcul de tomographies le long de différents plans et d'obtenir une vision plus globale de l'état du sol avoisinant les structures inspectées. Il est à noter que la nouvelle configuration adoptée permettra aussi d'utiliser l'interprétation MMASW traditionnelle sans avoir besoin de refaire d'autres essais.

À l'aide des 5 études de cas présentées dans ce chapitre, il a été montré que les vitesses de propagation du mode R0 des ondes de Rayleigh calculées à l'aide de la méthode proposée (GST) sont compatibles avec celles calculées avec la méthode MMASW. L'analyse des données recueillies lors de ces études de cas a permis de conclure que les résultats obtenus à l'aide de la nouvelle méthode d'investigation sont similaires à ceux obtenus à l'aide de la méthode MMASW conventionnelle. Finalement, ce chapitre a également montré l'importance de bien sélectionner les fréquences qui seront utilisées pour le calcul des tomographies en vitesse de groupe.

CHAPITRE 9 : SITE EXPÉRIMENTAL

La complexité à modéliser les mécanismes de propagation des vibrations dans des sols hétérogènes comprenant des anomalies et la taille des remblais routiers du MTQ rendent la modélisation numérique un outil très lourd et difficile à mettre en œuvre pour l'étude de la propagation des ondes élastiques. C'est donc pour ces raisons qu'une emphase particulière a été mise dans ce rapport sur l'étude des signaux recueillis sur de vrais sites. Dans le but de valider les résultats obtenus à l'aide des simulations numériques et du modèle réduit de l'UdeS (chapitres 5-6-7), les résultats obtenus à l'aide de la méthode proposée dans ce rapport ont été comparés avec les résultats obtenus à l'aide de la méthode MMASW pour différent ponceau du MTQ (chapitre 8). Le chapitre 8 a permis de montrer que bien qu'il existe des différences entre les résultats obtenus avec la méthode proposée et la méthode MMASW, il existe généralement une bonne concordance entre les deux méthodes.

En effet, la méthode proposée a été en mesure d'identifier la présence d'anomalies dans le même remblai routier que la méthode MMASW. Afin de permettre une évaluation encore plus précise du potentiel de la méthode d'inspection présentée dans ce rapport,

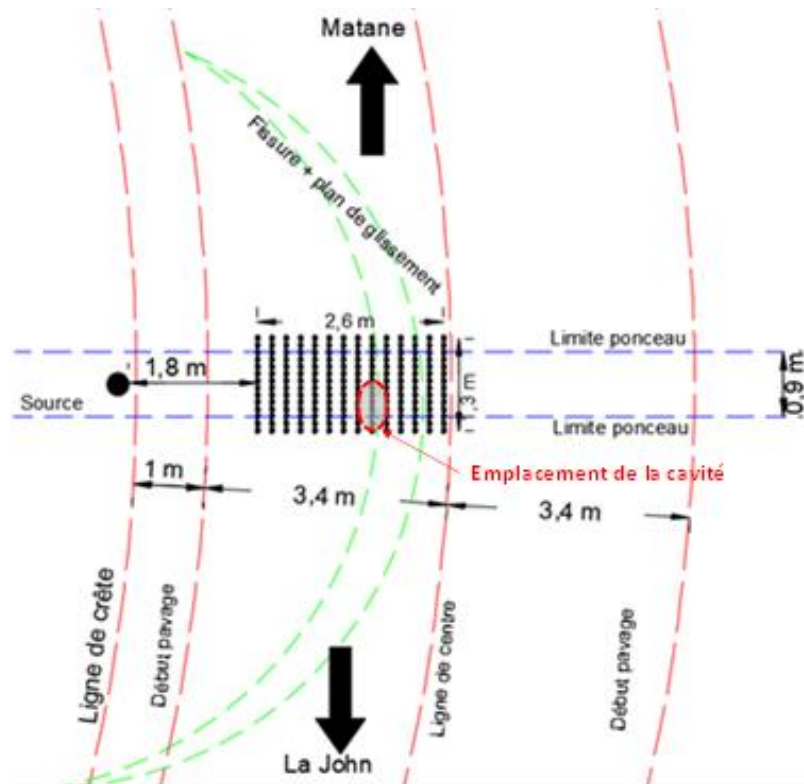


Figure 9.1. Localisation des relevés perpendiculaires, Chemin de la réserve faunique, Saint René de Matane, ponceau ref 15479, échelle : 17:1.

le MTQ, en collaboration avec le sous-centre de service de Matane, nous a permis, lors de l'été 2018, d'avoir accès à un ponceau se trouvant sous un remblai routier près de Matane (fig. 9.1, fig. 9.2). Ce ponceau, en fin de vie, est situé sur le chemin de la réserve faunique de Saint René de Matane (Annexe B). Grâce au MTQ, ce site a pu être utilisé comme site expérimental pour étudier l'effet d'une cavité créée volontairement entre le ponceau et le revêtement rigide de la route, sur le champ d'accélération mesuré en surface. Deux séries de relevés perpendiculaires, couvrant l'emplacement de la cavité (fig. 9.2.b), ont été effectuées avant et après sa création. La route inspectée se trouve sur un ancien glissement de terrain lent dont le cercle de rupture passe par le talus de la montagne en amont de la route et ressort dans la rivière en aval. Dans les débris du glissement, plusieurs dislocations ont eu lieu suite à une rupture progressive dont les fissures en surface sont visibles à la figure 9.2a. Ces mouvements de sol ont mené au sectionnement et à l'apparition une entaille dans le ponceau métallique de type TTOG présent sous la chaussée (fig. 9.2.c). Ce ponceau est de 1 m de diamètre et est situé à 1.5 m de profondeur par rapport à la surface.



Figure 9.2. a) Vue globale du site expérimental de saint-René-de-Matane. b) Emplacement des relevés par rapport aux fissures visibles dans le pavé. Notez que les 14 capteurs se trouvent le long de la ligne 9. c) Entaille du ponceau provoquée par le glissement de la voie inspectée, et à travers laquelle la cavité a été créée, d) déchirement du géotextile, et création de la cavité par prélèvement du sol.

À partir de cette entaille, qui est de 0.2 m de largeur, une cavité a été créée en prélevant le sol se trouvant directement par-dessus le ponceau. Avant de procéder à la création de la cavité, 14 lignes en configuration perpendiculaire ont été relevées de façon à couvrir toute la voie investiguée. Un espacement de 0.2 m entre les lignes et un espacement de 0.1 m entre les capteurs ont été utilisés, couvrant ainsi une superficie de 3.38 m². La zone couverte par les relevés intercepte le ponceau (longitudinalement), la cavité (au niveau des lignes 8 et 9) et ce qui semble être des plans des dislocations dans les débris du glissement (visibles en surface à travers des fissures présentes dans l'asphalte (fig. 9.2a)). Une distance de 1.8 m sépare la source de la première ligne de capteurs comme le montre la Figure 9.1. Après avoir effectué la première série de relevés, un accès direct dans le ponceau a permis de créer une cavité au niveau de l'entaille de 0.2 m présente dans le ponceau. La cavité, plutôt sphérique, de 0.3 m de hauteur, a été créée en prélevant du sol au niveau de l'entaille du ponceau (fig. 9.2d). Une deuxième série de relevés a par la suite été réalisée exactement aux mêmes emplacements que la première série (fig. 9.2b).

L'analyse des accélérations mesurées le long des relevés avant et après la création de la cavité a permis de constater qu'en dessous de 70 Hz un seul mode « R0 » domine. La valeur de 70 Hz, plus élevée que toutes les autres études de cas exposés au chapitre 8, est due, entre autres, à la faible profondeur du ponceau, localisé à 1.5 m, comparativement aux autres cas. Au-delà de cette valeur, un chevauchement de mode se produit. Ceci est visible à travers les distributions d'énergie et les dispersions des vitesses de groupe obtenues en analysant les accélérations mesurées avant et après la création de la cavité à différents endroits dans la zone investiguée (fig. 9.3). En effet, en dessous de 70 Hz, pour le mode R0, il existe une différence entre les vitesses de groupe calculées avant (fig. 9.3a) et après la création de la cavité (fig. 9.3b) et cette différence est plus importante entre 50 et 65 Hz (fig. 9.3c).

À l'aide des figures 9.3a et b, il est possible de remarquer qu'au-delà de 70 Hz, là où un chevauchement de mode se produit, il existe également une différence importante entre les vitesses de groupe des modes supérieures « R1 » avant et après la création de la cavité. Comme illustré par ces deux figures, la présence de la cavité affecte également les distributions d'énergies des ondes élastiques.

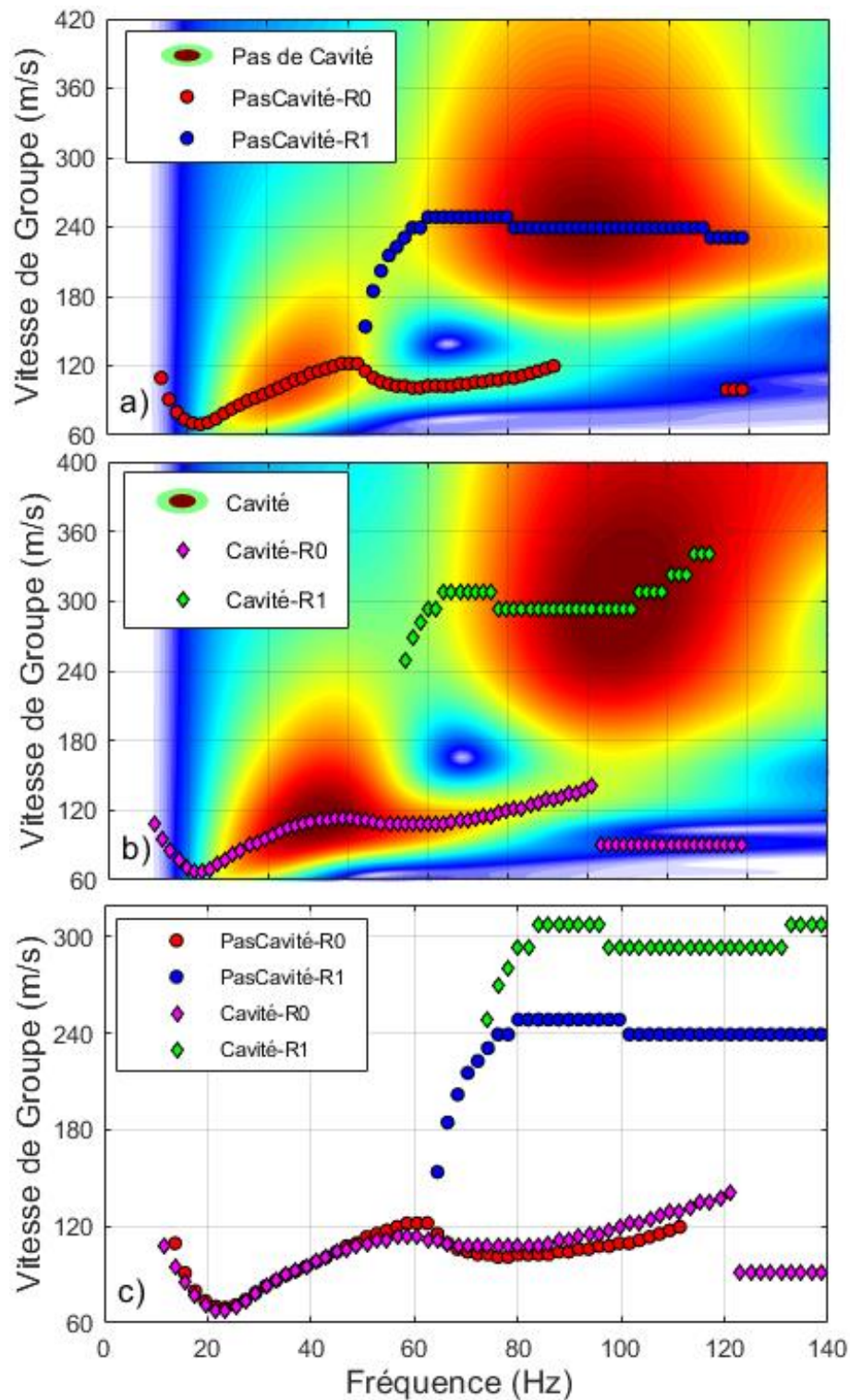


Figure 9.3. Énergies et courbes de dispersions (fréquences-vitesse de groupe) des modes R0, R1 calculées avec la GST à partir des accélérations verticales du sol mesurées au capteur C11-L8 sur l'emplacement de la cavité, a) avant la création de la cavité, b) après la création de la cavité, et c) comparaison entre les courbes de dispersion R0 et R1 avant et après la création de la cavité.

Outre avec le modèle réduit de l'UdeS (chapitre 6), l'influence de ces deux phénomènes a cependant été peu étudiée dans ce projet puisqu'ils sont difficiles à reproduire numériquement et que pour les étudier, il est nécessaire de connaître exactement la position et le type d'anomalie présente dans le sol. Néanmoins, à partir des résultats obtenus dans ce chapitre et le chapitre 6, il semble que l'étude de ces phénomènes présente un potentiel intéressant pour la détection des cavités.

La figure 9.4 illustre les tomographies obtenues de 30 à 70 Hz toutes les 10 Hz avant la création de la cavité (fig. 9.4a, b, c, d et e) et après la création de la cavité (fig. 9.4f, g, h, i et j). L'emplacement de la cavité est délimité par des ellipses rouges en pointillées sur les figures 9.3f, g, i et j. Comme le montre la Figure 9.4, même avant la création de la cavité, il existe des différences de vitesses importantes dans la zone couverte par les relevés. Ces différences de vitesses indiquent que les propriétés mécaniques du sol autour du ponceau n'étaient pas homogènes même avant la création de la cavité. Cette conclusion est plausible vu le glissement de terrain progressif qui a créé de multiples plans de rupture visibles à la surface du pavé (fig. 9.2b). Les lignes pointillées rouges présentes dans les tomographies à gauche de la figure 9.4 indiquent l'endroit où un changement brusque de la vitesse de groupe se produit. Plus la fréquence augmente, plus ce changement de vitesse se produit à une position éloignée de la source et donc plus près du centre de la route. Puisqu'une augmentation de la fréquence correspond à une diminution de la longueur d'onde, il est possible que la position des lignes pointillées rouges soit reliée à la présence d'un volume de sol remanié au-dessus d'un plan de rupture situé sous la chaussée. En effet, selon cette hypothèse, en s'approchant de la position des fissures visibles dans le pavé à partir de la position de la source, ce plan de rupture s'approcherait de plus en plus de la surface comme l'illustre la figure 9.5. Pour cette raison, à basses fréquences ou pour de grandes longueurs d'onde, les ondes traversent le plan de rupture plus près de la source même si ce dernier est plus profond à cet endroit. Plus la fréquence augmente, ou plus la longueur d'onde diminue, plus les ondes n'atteignent le plan de rupture qu'à une plus grande distance de la source là où le plan de rupture se rapproche de la surface. Selon cette hypothèse, pour les ondes se propageant essentiellement au-dessus du plan de rupture, les vitesses de groupe calculées seraient plus élevées que pour les ondes se propageant à travers et en dessous du plan.

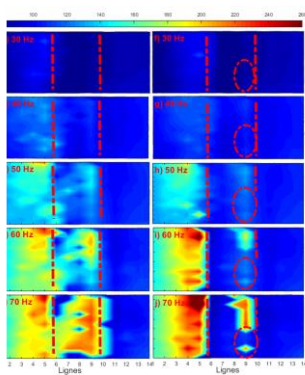


Figure 9.4. Tomographies des vitesses de groupe calculées à l'aide de la GST obtenues avec relevés perpendiculaires effectués sur le site expérimental de saint-René-de-Matane avant la création de la cavité à : a) 30 Hz, b) 40 Hz, c) 50 Hz, d) 60 Hz et e) 70 Hz, où les traits en pointillé vertical rouge correspondent à différents éventuels plans de dislocation interceptés à différentes profondeurs (donc différentes longueurs d'onde, donc différentes fréquences, et après la création de la cavité à : f) 30 Hz, g) 40Hz, h) 50 Hz, i) 60 Hz et j) 70 Hz, où l'emplacement de la cavité est marqué par le cercle en pointillé rouge.

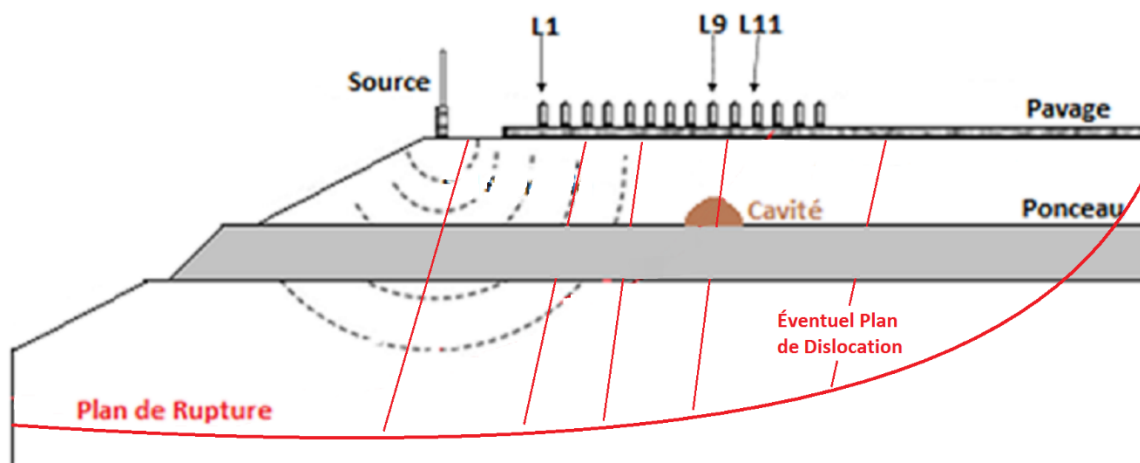


Figure 9.5. Schéma approximatif d'une coupe à travers la route suivant l'axe du ponceau montrant la position possible du plan de rupture en profondeur et des éventuels plans de dislocation. La position des lignes est visible par rapport aux fissures sur la figure 9.2.

Suite à la création de la cavité, la distribution des variations des vitesses de groupe a changé le long des tomographies (fig.9.4a, b, c, d et e comparées à fig. 9.4f, g, h, i et j). Une importante diminution de vitesse est observée au voisinage de la cavité localisée sur les tomographies f, g, h, i et j de la figure 9.4. La diminution de la vitesse induite par la présence de la cavité (fig. 9.4h et i) apparaît à partir de 50 Hz et continu jusqu'à 70 Hz ce qui correspond à l'intervalle identifié à l'aide de la figure 9.3. Au-delà de cette valeur, et donc pour des longueurs d'onde plus courtes, l'effet de la cavité se manifeste sous forme de réflexion d'énergie donc d'accélération des vitesses (fig. 9.3a et b). Le chevauchement de mode qui se produit au-delà de 70 Hz rend l'utilisation de cette énergie et des vitesses difficiles à utiliser lors de l'analyse des accélérations, sans au préalable, démêler les modes.

La présence des plans de dislocation, qui agissent, à priori, comme des réflecteurs, est déduite à travers l'apparition des fronts d'onde réfléchis (lignes en pointillé sur la figure 9.4). Ces fronts d'onde viennent camoufler la signature de la cavité et compliquer sa détection. Pour ce site expérimental, la présence des dislocations et les conditions non contrôlées du sol constituant le remblai (pas représentatif d'un remblai routier usuel) rendent la détection de la position de la cavité difficile.

À l'aide des résultats obtenus sur le site de Matane, il a été démontré que les tomographies en vitesse de groupe d'un remblai autoroutier non uniforme contenant des anomalies, des

ruptures ou des zones de contraste de densité, présentent des irrégularités et des sauts de vitesses très importants. Cela fait contraste aux résultats obtenus sur un remblai routier uniforme dépourvu de cavité/anomalie où l'accroissement des vitesses de groupe est uniforme le long des relevés : Hypothèse principale de l'outil de diagnostic rapide proposé à l'issue de cette étude.

CHAPITRE 10 : CONCLUSION ET CHEMINEMENT DU PROJET

10.1 Retour sur les objectifs du projet et conclusions

Ce rapport final fait état des progrès réalisés dans le projet sur l'amélioration de l'identification des cavités sous les routes et développement d'un outil de diagnostic rapide pour l'usage du MTQ. L'amélioration des méthodes d'investigation non intrusives pour la détection d'anomalie en dessous des routes et autoroutes passe par une meilleure compréhension des complexités des ondes qui se propagent dans un milieu constitué de plusieurs éléments de rigidités et de géométries différentes. Elle passe aussi par une maîtrise, pour une meilleure application, des méthodes de traitement des signaux. Ce rapport présente en partie un bilan des méthodes existantes qui ont un potentiel de détecter des cavités souterraines. Un recensement qui a permis de constater que les ondes sismiques ou élastiques sont les plus adaptées pour la détection des cavités en dessous des remblais routiers surtout en présence de ponceaux. Le rapport présente aussi les outils de traitement disponibles pour une exploitation optimale des données recueillies sur le terrain. Cet élément joue un rôle majeur dans le succès ou non à développer des outils de diagnostics performants.

Il apparaît clair qu'il existe des méthodes modernes de traitement de signal qui permettent de résoudre avec une grande précision les problèmes liés à la propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu complexe. Des exemples ont été présentés dans ce rapport pour démontrer ces propos. Une nouvelle approche d'analyse qui consiste à analyser les signaux de manière indépendante dans le domaine temps-fréquence afin de produire des cartes d'isocontours permettant de mieux apprécier la variation de la vitesse dans l'espace-temps était adoptée et adaptée pour l'outil de diagnostic proposé dans ce projet.

Avec les modèles numériques et expérimentaux développés et élaborés lors de ce projet, une étude exhaustive de la signature sur un champ d'accélération à la surface de chaque composante d'une structure ponceau/sol/pavage/anomalie a été entreprise. Malgré la complexité d'une telle réponse, l'étude qui consiste à analyser individuellement chacune des composantes a permis de mieux cerner le problème de propagation d'onde dans un remblai routier en présence du ponceau et de poser les bonnes hypothèses avec lesquelles les signaux collectés sur terrain doivent être analysés. Cette étude a permis de confirmer que la présence d'un revêtement rigide a tendance à accélérer le front d'onde sans toutefois altérer la capacité à caractériser le sol en profondeur permettant ainsi la détection des anomalies à condition que la source sismique soit placée directement sur le sol. Les capteurs peuvent cependant être placés sur le pavage.

Le ponceau, quant à lui, semble agir comme réflecteur qui réfléchit une partie des ondes en surface impliquant une contribution plus importante des modes supérieurs des ondes de Rayleigh à certaines fréquences. Cependant, sa présence le long de la chaussée inspectée et à une profondeur plus ou moins constante permet de reconnaître assez facilement sa signature.

La réponse d'une anomalie s'avère être un peu plus complexe. Dépendamment de sa géométrie et de sa nature, une anomalie ralentit certaines ondes à certaines fréquences d'une manière localisée dans son voisinage. En effet, les analyses indiquent clairement que les vitesses de groupe diminuent en présence d'une cavité, mais seulement dans l'intervalle de fréquence dans lequel un seul mode domine, puisqu'au-delà de cet intervalle, l'énergie est réfléchie sur des modes plus supérieurs et les vitesses de groupe sont accélérées. Convenablement identifier cet intervalle est primordial pour correctement effectuer une inspection.

À l'issue des études et constatations faites avec le modèle physique réduit et les modèles numériques, les hypothèses formulées ont permis le développement d'un outil de diagnostic rapide donc le protocole expérimental est schématisé à la figure 10.1. L'outil propose, en cas de besoin, de procéder à des relevés en configuration perpendiculaire. À noter que les relevés en configuration perpendiculaire sont plus longs à exécuter que les relevés en configuration parallèle, mais permettent la collecte de plus d'informations. Ces informations supplémentaires pourront être utilisées, dépendamment du besoin et du cas étudié, tel qu'expliquer dans le protocole expérimental de la figure 10.1 et dans le tableau 10.2, où une comparaison entre le nouvel outil de diagnostic et la méthode MMASW est exposée.

Tableau 10.1. Comparaison entre la méthode MMASW et la nouvelle méthode proposée à l'issue de ce projet

Méthode Aspect	La méthode MMASW	La nouvelle méthode
Temps de collecte de données pour une voie	De 3 à 4 heures, dépendamment du cas.	Plus lent (+1h) par rapport à MMASW. Les signaux recueillis peuvent cependant être utilisés par la méthode MMASW en cas de doute (si plus de 16 lignes ont été réalisées).
Tomographie en vitesse de groupe	La vitesse de groupe est principalement utilisée pour filtrer les signaux	Développée pour analyser séparément la vitesse des ondes pour chacun des capteurs. Dans ce cas, la vitesse de groupe calculée est plus précise.
Tomographie en vitesse de phase	Développée pour un nombre minimum de 16 capteurs pour chaque profil	Développée pour analyser séparément la vitesse des ondes pour chacun des capteurs. Dans ce cas, la vitesse de phase calculée est moins précise.
Temps d'analyse pour une voie	De 6 à 8 heures, dépendamment du cas.	Une heure d'analyse, facilité et rapidité de (1) l'identification de l'intervalle de fréquence ou seul un mode domine et de (2) produire les cartes de contours.
Compétences requises pour procéder à l'analyse	Connaissances et expertise avancées en dynamiques des sols et traitement de signal	Connaissances élémentaires, avoir été initié et avoir pris en main l'outil d'analyse

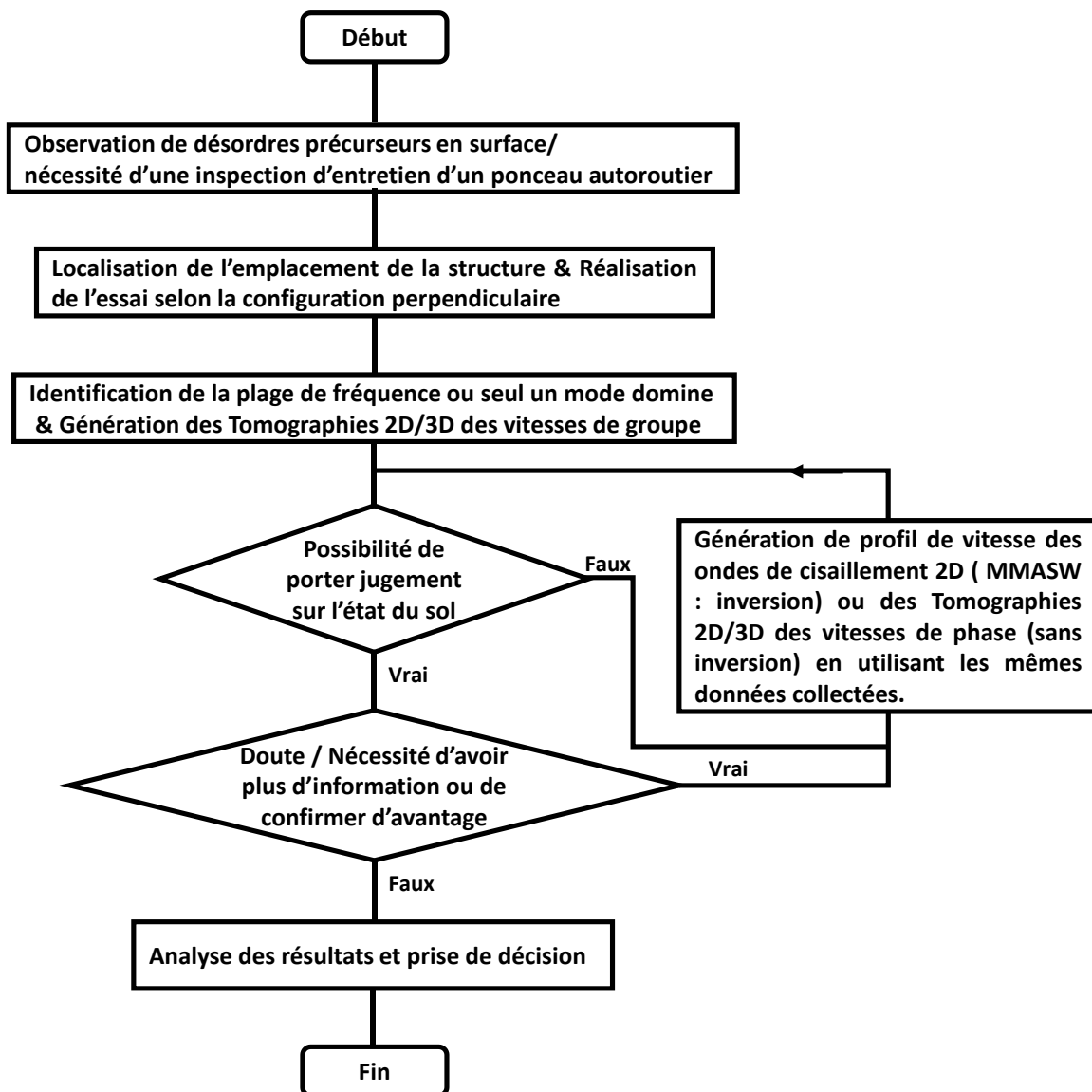


Figure 10.1. Protocole expérimental de l'outil de diagnostic rapide des pontons proposé au MTQ à l'issue de cette étude.

Lors de l'analyse des signaux, la première étape consiste à identifier (à l'aide de la représentation vitesse-fréquence calculée avec la GST) la plage de fréquences où un seul mode domine. Cette plage de fréquences dépend de la profondeur du ponton et de l'état du sol tel qu'il été démontré avec les modèles analytiques et numériques et les 5 études de cas exposées au chapitre 8. Une fois ces fréquences identifiées, la génération de tomographie des vitesses de groupe à ces fréquences permet d'apprécier l'état du sol en place. En cas d'obtention de tomographie présentant un accroissement des vitesses de groupe uniforme et homogène le long des relevés, le remblai est jugé sain, uniformément dense et ne présentant pas des anomalies. Dans le cas contraire, une tomographie avec des

sauts de vitesse et des irrégularités, serait une indication d'un remblai non uniforme présentant des anomalies et des contrastes de densité. La vitesse de groupe est sélectionnée comme premier critère de jugement afin de détecter la présence ou l'absence d'anomalie puisque ce paramètre est facile à obtenir à faible coût de calcul avec la GST et ne requière pas de grande d'expertise en traitement de signal, contrairement à la vitesse de phase. Calculer la vitesse de groupe individuellement pour chaque capteur en considérant la distance source-capteur vient alléger encore plus le calcul et permet de rehausser la signature des anomalies et des sauts de densité. Cela fait contraste avec les méthodes multicapteurs et les méthodes intercapteurs qui permettent généralement de mieux identifier les différents modes de propagation des ondes de Rayleigh (très important pour le processus d'inversion) mais qui en contrepartie ont tendance à étaler la signature d'une anomalie à travers le nombre de capteurs considérés pour le calcul d'un profil. Cela peut avoir pour effet de compliquer la localisation d'une anomalie dans l'espace.

Il est à noter que la méthode proposée est potentiellement plus efficace quand la surface couverte par les relevés est plus large. En effet, l'élargissement de la surface couverte par les relevés permet de pouvoir comparer les zones susceptibles de présenter des anomalies (donc au voisinage du ponceau) avec un plus grand volume de sol (loin du ponceau) ce qui a pour effet de faciliter l'identification de zones de faibles vitesses sur une carte de contour en cas de présence d'anomalie.

Tel qu'il été expliqué dans le protocole expérimental, un des avantages majeurs de la nouvelle approche est de pouvoir utiliser les mêmes données initialement recueillies en configuration parallèle pour procéder à d'autres analyses ou à des analyses MMASW en cas de besoin.

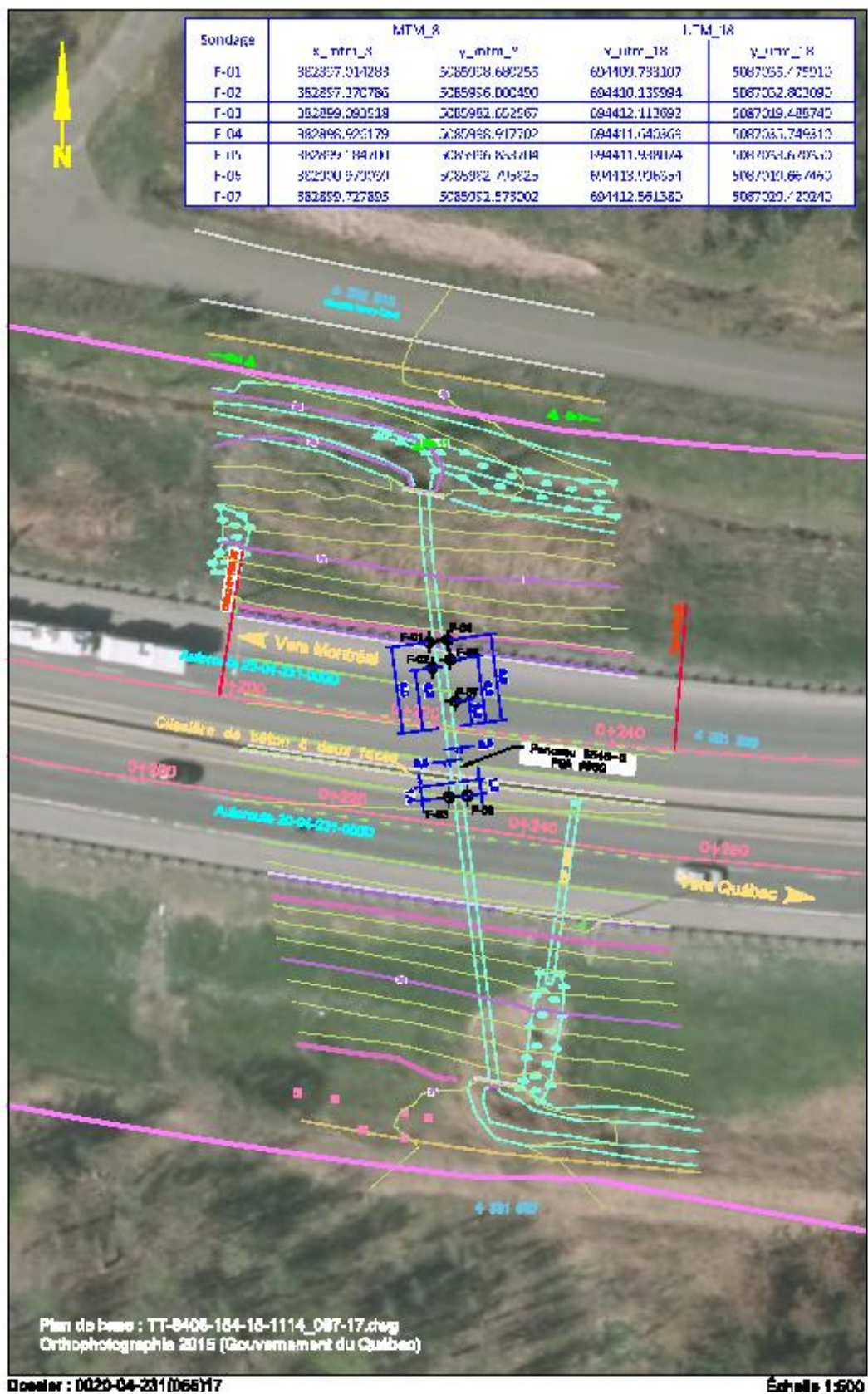
Pour démontrer le potentiel de la nouvelle configuration, sa faisabilité sur terrain, pouvoir la mettre à l'épreuve et apprécier la qualité des résultats qu'elle fournit, 5 études de cas ont été menées le long de ce projet. À travers ces études de cas, il a été montré que les vitesses de propagation du mode R0 des ondes de Rayleigh calculées à l'aide de la méthode proposée (GST) sont compatibles avec celles calculées avec la méthode MMASW conventionnelle (voir tableau 10.1 pour comparer entre les deux méthodes). L'analyse des données recueillies lors de ces études de cas a permis de conclure que les résultats obtenus à l'aide de la nouvelle méthode d'investigation sont similaires à ceux obtenus à l'aide de

la méthode MMASW conventionnelle et les deux méthodes rendent le même verdict quant à l'état du remblai inspecté (dans la zone couverte par les relevés, voir tableau 8.1 pour comparer entre le verdict rendu par les deux méthodes pour les 5 études de cas).

10.2 Travaux futurs et cheminement du projet

À ce stade du projet, il est important de mettre à l'épreuve la robustesse de l'approche proposée. Cela pourra être fait en réalisant d'autres études de cas sur différentes configurations de remblais routiers recouvrant des ponceaux. L'étude d'une plus grande variété de remblais routiers ayant différentes géométries, natures et états de sol, de pavage et de ponceau permettra de définir les forces et les faiblesses de l'outil de diagnostic proposé. Dans le futur, il sera question d'incorporer la vitesse de phase et la distribution d'énergie dans l'outil de diagnostic après avoir étudié numériquement et expérimentalement l'effet d'une anomalie sur ces deux paramètres. Afin de mieux comprendre la signature des anomalies sur les modes supérieurs d'onde de Rayleigh et sur leur distribution d'énergie, il sera nécessaire d'effectuer de nouveaux essais qui seraient préférablement réalisés sur un/des sites expérimentaux à échelle réelle et à conditions contrôlées (connaissance préalable de l'emplacement exact de la cavité et état du sol avoisinant le ponceau et la cavité). Les objectifs de ces essais seraient d'étudier les effets du type d'anomalie (vide versus zone décompactée), l'emplacement de la cavité par rapport au ponceau et l'étendue de la réponse d'une anomalie à la surface. Ceci permettrait de mieux comprendre les mécanismes des réflexions/atténuations qui gouvernent la réponse d'une anomalie pour pouvoir, par la suite, selon l'issue de l'étude, incorporer ces aspects dans l'outil de diagnostic, pour le rendre plus fiable et plus polyvalent et capable de confirmer ou non l'existence d'une anomalie, sa nature et sa localisation.

ANNEXE A : LOCALISATION ET RAPPORTS DES SONDAGE F-02 ET F-05



RAPPORT DE SONDAGE

Localisation générale: Autoroute 20 Drumondville

Dossier: 0020-04-231(055)17

Sondage: F-02

Endroit: Autoroute 20 ouest 6,3 m du centre

Date du sondage: 2018-10-09

Profondeur totale 9,76 m

Coordonnées (m): 5086001,00 m (Y)
MTM NAD83 (Zone: 8) 82899,00 m (X)

Élévation: 100,00 m (Z)
(Fixé à 100.0)

[illegible]

Transport régional des matériaux du Québec RAPPORT DE SONDAGE															
Localisation générale: Autoroute 20 Drumondville					Dossier: 0020-04-231(055)17					Sondage: F-05					
Endroit: Autoroute 20 ouest 6.9 m. du centre.					Date du sondage: 2018-10-12					Profondeur totale: 9,76 m					
					Coordonnées (m): MTM NAD83 (Zone: 8)					Élévation: 100,00 m (Z) (Fixé à 100,0)					
Prof. (p)	Élév. (m)/ Prof. (m)	Piézo- métrie	COUPE GÉOLOGIQUE		ÉCHANTILLONS							ESSAIS			
			Description stratigraphique	Code	État	Prof. (m)	Type-No Calibre	Sous-échant.	Récep. (%)	N RQD	N coups	Description des échantillons	Observations de chantier	Essai de pénétration 25 50 75	Scissomètre 50 100 150
	100,00		Surface du terrain naturel												
	0,00		Enrobé bitumineux.												
	99,70														
	0,30		Gravier, traces de silt et sable, gris.			0,30	CF-01 B		71		8-9	Gravier, traces de silt et sable, gris.			
	99,39		Sable, traces de silt et gravier, brun, compact.			0,61	CF-02 B		70	18	4-9-9-11	Sable, traces de silt et gravier, brun, compact.			
	0,61														
1	98,78		Sable, un peu de gravier, traces de silt, rougeâtre, compact.			1,22	CF-03 B		49	11	4-5-6-7	Sable, un peu de gravier, traces de silt, rougeâtre, compact.			
	1,22														
5	98,17		Gravier, traces de silt et sable, rougeâtre, compact.			1,83	CF-04 B		49	13	4-6-7-7	Gravier, traces de silt et sable, rougeâtre, compact.			
	1,83														
2	97,56		Sable graveleux, traces de silt, rougeâtre, compact.			2,44	CF-05 B		44	19	5-8-11-9	Sable graveleux, traces de silt, rougeâtre, compact.			
	2,44														
	96,95		Sable, traces de silt et gravier, gris, compact.			3,05	CF-06 B		51	12	4-7-5-5	Sable, traces de silt et gravier, gris, compact.			
	3,05														
	96,34		Sable, traces de silt, gris-brun, lâche.			3,66	CF-07 B		46	4	2-2-2-2	Sable, traces de silt, gris-brun, lâche.			
	3,66														
4	95,73		Sable, traces de silt et gravier, gris-brun, lâche.			4,27	CF-08 B		49	4	1-2-2-2	Sable, traces de silt et gravier, gris-brun, lâche.			
	4,27														
	95,12		Sable, traces de silt, gris brun, lâche.			4,88	CF-09 B		57	5	2-2-3-2	Sable, traces de silt, gris brun, lâche.			
	4,88														
	93,90		Sable, traces de silt, gris brun, lâche.			5,49	CF-10 B		82	4	2-2-2-4	Sable, traces de silt, gris-brun, lâche.			
	6,10														
	93,29		Sable, traces d'argile et silt, gris, lâche.			6,10	CF-11 B		66	5	1-2-3-7	Sable, traces d'argile et silt, gris, lâche.			
	6,71														
7	91,46		Sable, traces de silt et gravier, gris-brun, compact.			7,32	CF-12 B		82	16	6-8-8-7	Sable, traces de silt et gravier, gris-brun, compact.			
	8,54														
	91,46		Sable silteux, traces d'argile et gravier, gris, très lâche.			7,93	CF-13 B		69	9	3-4-5-2	Sable, traces de silt et gravier, brun, lâche.			
	8,54														
	91,46		Sable silteux, traces d'argile et gravier, gris, très lâche.			8,54	CF-14 B		85	4	2-2-2-2	Sable silteux, traces d'argile et gravier, gris, très lâche.			
	8,54														
9	90,24		Sable silteux, traces de gravier, gris, très lâche.			9,15	CF-15 B		82	3	1-1-2-2	Sable silteux, traces de gravier, gris, très lâche.			
	9,76														
	90,24		FIN DU FORAGE				CF-16 B		95	1	1-0-1-0	Sable silteux, traces de gravier, gris, très lâche.			
	9,76														
	10														
	35														

Remarques:

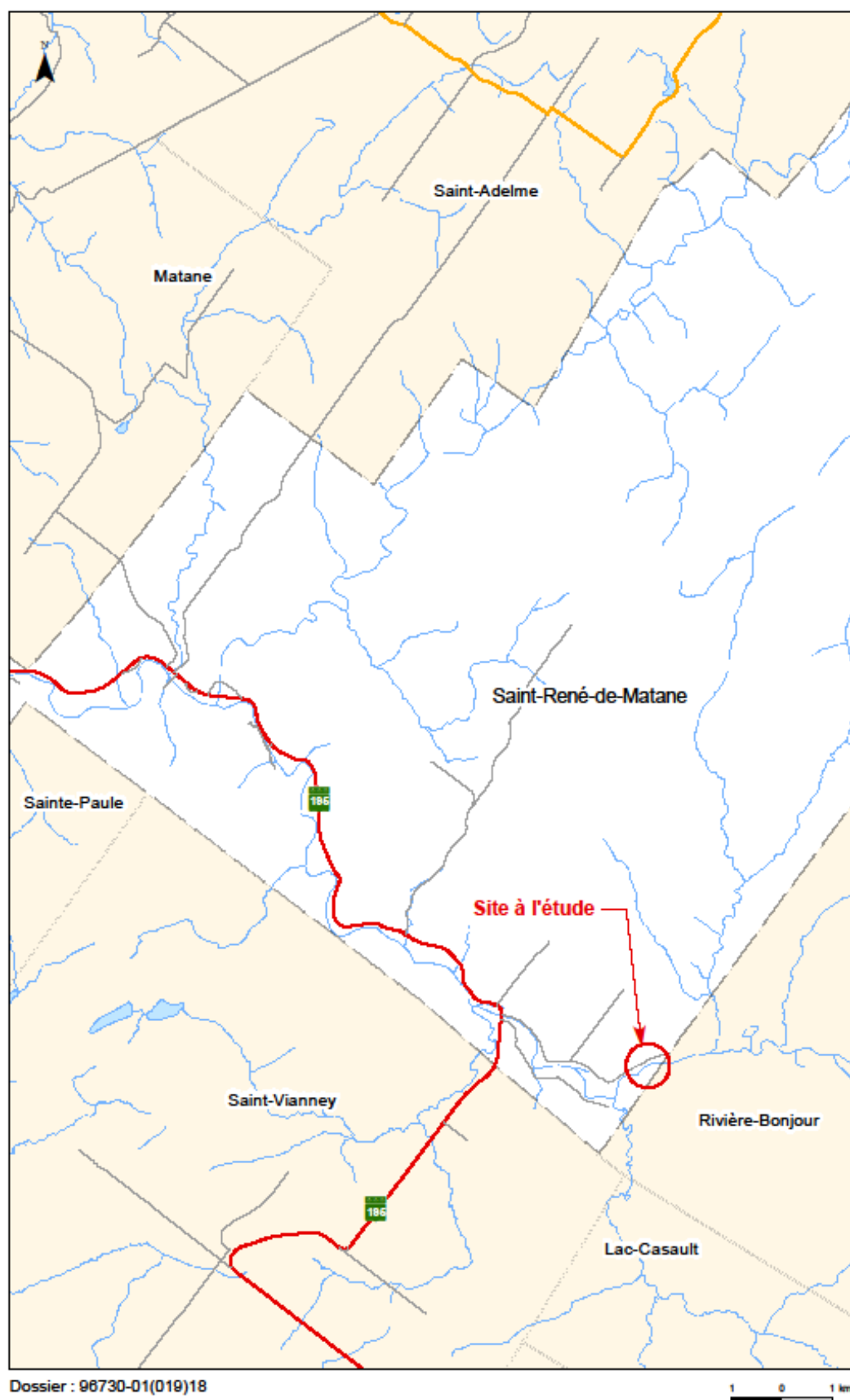
 Technicien: Jacques Hamel

Type de sondage: Tarière
 Équipement de forage: Diedrich D-50 Explora
 Type de marteau: Automatique
 Date du rapport: 2018-10-16 05:17:50

Vérifié par:

Approuvé par:

ANNEXE B : LOCALISATION DU SITE EXPÉRIMENTALE DE SAINT RENÉ DE MATANE



RÉFÉRENCES

Achenbach, J. D. (1976). Wave propagation in elastic solids. *North-Holland Publishing Company, New York, second edition.*

Aki, K. et Richard, P.G. 2002. Quantitative Seismology. 2nd ed. University Science Books, Sausalito, CA.

Amin, M. G. Jakonovic, B. Zhang, Y. D. et Ahmad, F. 2015. A sparsity-perspective to quadratic time-frequency distributions, *Digit. Signal Processing*, vol. 46, pp. 175–190.

Assous, S. et Boashash, B. 2012. Evaluation of the Modified S-transform for Time-frequency Synchrony Analysis and Source Localisation, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 49.

Athanasopoulos, G.A., Pelekis, P.C., Anagnostopoulos, G.A. 2000. Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from field measurements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19 (4), pp. 277-288.

Auger, F. et Flandrin, P. 1995. Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method, *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 43, no. 5, pp. 1068–1089.

Auger, F. Flandrin, P. Lin, Y. McLaughlin, S. Meignen, S. Oberlin, T. Wu, H. 2013. Time-frequency reassignment and synchrosqueezing: An overview, *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 30, no. 6, pp.32 -41.

Ballard, R. F. (1964) Determination of Soil Shear Moduli at Depth by in-situ Vibratory Techniques, Miscellaneous Paper No 4-691, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Ms, É.U.

Ballard, R. F., Casagrande, D. R. (1966) Dynamic Foundation Investigation TAA-2A, Radar site, Cape Kennedy, Florida, Wes, Misc. Paper No 4-878, Feb.

Ballard, R. F., Casagrande, D. R. (1967) Dynamic Foundation Investigation Roi-Namur, Kwajalein Atoll, Marshall Islands, Wes, Misc. Paper No 4-858, Nov.

Baraniuk, R.G. et Jones, D. L. 1993. A signal-dependent time-frequency representation: Optimal kernel design, *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 41, pp. 1589-1602.

Biot, M. A. (1962) Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Solid, *Journal of applied physics*, Vol. 33, pp. 1482---1498.

Boashash, B. 1992a. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal. Part I: Fundamentals, *Proc. IEEE* 80 (1992) 520–538.

Boashash, B. 1992b. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal. Part II: Algorithms and applications, *Proc. IEEE* 80 (1992) 540–568.

Boashash, B. 1992c. Time–Frequency Signal Analysis — Methods and Applications (Longman-Cheshire, Melbourne and John Wiley Halsted Press, New York, 1992).

Boashash, B. 2015. Time-Frequency Signal Analysis and Processing — A Comprehensive Reference (Academic Press).

Boore, D.M. (1972). Finite difference methods for seismic wave propagation in heterogeneous materials. *Methods in computational Physics*, vol. 11, pp. 1.

Butler, D.L., 1980. Evaluation of geophysical methods for cavity detection at the WES cavity test facility. U.S. Army Eng. Waterways Exp. St., Tech. Rep. GL-804, p.125.

Burridge, R., Alterman, Z. (1972). The Elastic Radiation from an Expanding Spherical Cavity. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 30 (4), pp. 451-477.

Chai, H. Y., Phoon, K. K. Goh, S. H. et Wei, C. F. 2012 Some theoretical and numerical observations on scattering of Rayleigh waves in media containing shallow rectangular cavities: *J. Appl. Geophys.*, 83, 107–119.

Chai, H.Y. Goh, S.-H. Phoon, K.-K. Wei, C.F. 2013. Effects of source and cavity depths on wave fields in homogeneous half spaces: *Journal of Applied Geophysics*, 93, pp. 52-59.

Chen, S.S. Donoho, D.L. et Saunders. M. A. 2001. Atomic decomposition by basis pursuit, *SIAM Rev.*, 43(1), 129–159.

Cohen, L. 1995. *Time-Frequency Analysis: Theory and Applications*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

Costello, S.B. Chapman, D.N. Rogers, C.D.F. Metje, N. 2007. Underground asset location and condition assessment technologies. *Tunnelling and Underground Space Technology*, volume 22, p. 524–542.

Dahlin, T. Zhou, B. 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with ten electrode arrays. *Geophysical Prospecting* 52 (5), 379–398.

Daniels, D.J. 2004. *Ground Penetrating Radar*, 2e edition, The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 456 p.

Davis, J.L. et Annan, P. 1989. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, volume 37, p. 531-551.

Debremaecker, J. C. (1958) Transmission and Reflection of Rayleigh Waves at Corners, *Geophysics*, Vol. 23, p. 253---266.

Dobrin, M. B (1951) Dispersion in seismic surface waves, *Geophysics*, 16, 63---80.

Ewing, W.M. Jardetzky, W.S. et Press, F. 1957. *Elastic Waves in Layered Media*. McGraw-Hill, 380 p.

Farooq, M. Park, S. Song, Y.S. Kim, J.H. Tariq, M. Abraham, A.A. 2012. Subsurface cavity detection in a karst environment using electrical resistivity (er): A case study from yongweol-ri, South Korea: *Earth Sciences Research Journal*, 16 (1), pp. 75-82.

Foti, S. Lai, C. Rix, G. Strobbia, C. 2014. Surface wave methods for near-surface site characterization. CRC Press.

Flandrin, P. 1999. Time-Frequency/Time-Scale Analysis, Academic Press, San Diego, CA.

Flandrin, P. Goncalvès, P. 1996. Geometry of Affine Time–Frequency Distributions, Applied and Computational Harmonic Analysis, Volume 3, Issue 1, Pages 10-39

Flandrin, P. Auger, F. et Chassande-Mottin, E. 2003. Time-frequency reassignment: From principles to algorithms: in Applications in TimeFrequency Signal Processing, edited by A. Papandreou-Suppappola CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 179–203.

Flandrin, P. Borgnat, P. 2010. Time–frequency energy distributions meet compressed sensing. IEEE Trans. Signal Process., 58, pp. 2974–2982

Garotta, R. 2000. Shear Waves from Acquisition to Interpretation, Distinguished Instructor Series, volume 3. SEG, Tulsa.p. 450-462.

Ganji, V., Gucunski, N., Maher, A. (1997). Detection of underground obstacles by SASW method - Numerical aspects. Journal of Geotechnical Engineering, 123 (3), pp. 212-219.

Gautman, P. Pant, S.R. et Ando, H. 2000. Mapping of Subsurface Karst Structure with Gamma Ray and Electrical Resistivity Profiles: a Case Study from Pokhara Valley, Central Nepal. Journal of Applied Geophysics 45, 2, 97-110.

Gibson, P.J. Lyle, P. et George, D.M. 2004. Application of Resistivity and Magnetometry Geophysical Techniques for Near-Surface Investigations in Karstic Terranes in Ireland. Journal of Cave and Karst Studies, 66, 2, 35-38.

Graff, K. F. (1975). Wave motion in elastic solids. *Dover Publications, New York*.

Grandjean, G., Leparoux, D. (2004) The potential of seismic methods for detecting cavities and buried objects: Experimentation at a test site. Journal of Applied Geophysics, 56 (2), pp. 93-106.

Griffiths, D.H. Turnbull, J. Olayinka, A.I. 1990. Two dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array. First Break 8 (4), 121–129.

Grochenig, K. 2001. Foundations of time-frequency analysis, Birkhauser.

Gucunski, N. Ganji, V. Maher, M.H. 1995. Effects of obstacles on Rayleigh wave dispersion obtained from the SASW test. Soil Dynam Earthquake Eng 15(4):223–31.

Gucunski, N. Ganji, V. Maher, M.H. 1996. Effects of obstacles on Rayleigh wave dispersion obtained from the SASW test. Soil Dynam Earthquake Eng 15(4):223–31.

Gucunski, N., Ganji, V., Maher, M.H. (1995). Effects of obstacles on Rayleigh wave dispersion obtained from the SASW test. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 15, pp. 223-231.

Gucunski, N., Shokouhi, P. (2005). Surface wave analysis using wavelet transforms. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP, 1, pp. 658-659.

Hack, R. 2000. Geophysics for slope stability. Surveys in Geophysics, volume 21, numéro 4, p. 423-448.

Hardin, B. O. (1961) Study of Elastic Wave Propagation and Damping in Granular Materials, Ph. D. dissertation, Univ. of Florida, Aug. pp. 207.

Hardin, B. O., Richard, F. E., Jr., (1963) Elastic Wave Velocities in Granular Soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 89, No SM1, pp. 33--65

Haskell, N. A. (1953) The Dispersion of Surface Waves in Multi Layered Media, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 43, p. 17---43.

Heisey, J. S. (1982) Determination of in situ Shear Waves Velocity From Spectral-Analysis-of-Surface-Waves, Thèse de maîtrise, Université, du Texas Austin, Texas, U. S. A., 300 p.

Heukelom, W., Foster, C. R., (1960) Dynamic Testing of Pavement, Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 86, No SM-1, p. 1---28.

Hlawatsch, F. et Boudreaux-Bartels, G.F. 1992. Linear and quadratic time frequency signal representations. IEEE Signal Processing Mag., vol. 9, no. 2, pp. 21--67.

Hlawatsch, F. Flandrin, P. 1992. The Interference Structure of the Wigner Distribution and Related Time-Frequency Signal Representations. In the Wigner Distribution Theory and Applications in Signal Processing. W. Mecklenbrauker. Ed. North Holland Elsevier Science Publishers.

Huang, N. E. Shen, Z. Long, S. R. Wu, M. C. Shih, H. H. Zheng, Q. Yen, N.C. Tung, C. C. et Liu, H.H. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis: Proc. Roy. Soc. London A, vol. 454, pp. 903--995.

Huang, N.E. Wu, Z. Long, S.R. Arnold, K.C. Blank, K. et Liu, W. 2009. On Instantaneous Frequency, World Scientific. Advances in Adaptive Data Analysis, Vol. 1, No. 2. pp 177-229.

Hutchinson, D. J. Phillips, C. Cascante, C. G. 2002. Risk considerations for crown pillar stability assessment for mine closure planning: J. Geotech. Geol. Eng., 20, 41--64.

Iatsenko, D. McClintock, P.V.E. Stefanovska, A. 2015a. Linear and synchrosqueezed time-frequency representations revisited: Overview, standards of use, resolution, reconstruction, concentration, and algorithms. Digital Signal Processing: A Review Journal, 42, pp. 1-26

Iatsenko, D. McClintock, P.V.E. Stefanovska, A. 2015b. *On the extraction of instantaneous frequencies from ridges in time-frequency representations of signals*, submitted to IEEE Signal Proc. [preprint: arXiv:1310.7276]

Itasca. (2012). FLAC3D: fast Lagrangian analysis of continua in 3 Dimension user's guide. Itasca consulting group Inc., Minneapolis, Minnesota, 2012.

Jokanovic, B. Amin, M. 2015. Sparsity and concentration measures for optimum quadratic time-frequency distributions of Doppler signals. *IEEE Radar Conference (RadarCon)*, Arlington, VA, 2015, pp. 1211-1215

Jones, R. (1962). Surface wave techniques for measuring elastic properties and thickness of roads: theoretical development. *British Journal of Applied Physics*, 13, pp. 21-29.

Jones, D.L. Baraniuk, R.G. 1995. An adaptive optimal-kernel time–frequency representation, *IEEE Trans. Signal Process.* 43 (10) 2361–2371.

Karray, M. 1999. Utilisation de l'analyse modale des ondes de Rayleigh comme outil d'investigation géotechnique in situ, Thèse de doctorat en génie civil, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec), Canada, 275p.

Karray, M. and Lefebvre, G. 2009a. Detection of cavities beneath pavements by modal analysis of surface waves (Rayleigh waves) (MASW). *Canadian Geotechnical Journal*, 46 (4), pp. 424-437.

Karray, M., Lefebvre, G. 2009b. Techniques for mode separation in Rayleigh wave testing. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29 (4), pp. 607-619.

Karray, M., Lefebvre, G., Ethier, Y. et Bigras, A. 2010. Assessment of deep compaction of the peribonka dam foundation using "modal analysis of surface waves" (MASW). *Canadian Geotechnical Journal*, volume 47, numéro 3, p. 312-326.

Karray, M., M. N. Hussien, B. Paquet-Boucher, and Y. Ethier, 2016, Anomaly detection under roads by the Multi Modal Analysis of Surface waves (MMASW): Presented at the 69e Conférence Canadienne de géotechnique.

Krawczyk, C. M. Polom, U. Trabs, S. et Dahm, T. 2012. Sinkholes in the city of Hamburg-New urban shear-wave reflection seismic system enables high-resolution imaging of subsurface structures. *Journal of Applied Geophysics*, volume 78, p. 133-143.

Kolsky, H. (1963). *Stress waves in solids. Dover Publications Inc., New York.*

Kulesh, M. Holschneider, M. Diallo, M.S. Xie, Q. et Scherbaum, F. 2005. Modeling of wave dispersion using continuous wavelet transforms, *Pure and Applied Geophysics*, 162, 843–855

Loke, M. H. 2001. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. *Geotomo Software*, Malaysia.

Loke, M.H. Chambers, J.E. Rucker, D.F. Kuras, O. Wilkinson, P.B. 2013. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method: *Journal of Applied Geophysics*, Volume 95, Pages 135-156

Love, A.E.H. (1911). *Some problems of geodynamics*. Cambridge university press, Cambridge.

Luke, B. Calderón-Macías, C. 2008. Scattering of surface waves due to shallow heterogeneities : SEG Technical Program Expanded Abstracts, 27 (1), pp. 1283-1287.

Mallat, S. et Zhang, Z. 1993. Matching pursuits with time-frequency dictionaries, *IEEE Trans. Signal Process.*, 41(12), 3397–3415, doi:10.1109/78.258082.

- Mallat, S. 2008. *A Wavelet Tour of Signal Processing*, 3rd edn., Academic Press, Burlington.
- Marple, S.L.J. 1982. Frequency resolution of Fourier and maximum entropy spectral estimates, *Geophysics*, 47(9), 1303–1307.
- McMehan, G. A. et Yedlin, M. J. 1981. Analysis of dispersion waves by wave-field transformation. *Geophysics*. 46. 869-874.
- Miller, G.F., and Pursey, H. (1955). On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid. In *Proceedings of Royal society of London*, 1955, vol. 233 of A, pp. 55—59.
- Nasseri-Moghaddam, A. 2006. Study of the effect of lateral inhomogeneities on the propagation of Rayleigh waves in an elastic medium. Thèse de doctorat, Université de Waterloo, Canada, 299p.
- Nasseri-Moghaddam, A., Phillips, C., Cascante, G., Hutchinson, D.J. (2005.a). Detection of underground cavities using MASW test. *Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering*, 2005, pp. GC-270-1-GC-270-11
- Nasseri-Moghaddam, A., G. Cascante, and C. Phillips (2005.b). Use of Numerical Simulations to Explain SASW Field Measurements. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2005*: pp. 1075-1088.
- Nasseri-Moghaddam, A., Cascante, G., Hutchinson, J. (2005.c) A new quantitative procedure to determine the location and embedment depth of a void using surface waves. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 10 (1), pp. 51-64.
- Nasseri-Moghaddam, A. (2006). Study of the effect of lateral inhomogeneities on the propagation of Rayleigh waves in an elastic medium. Thèse de doctorat, Université de Waterloo, Canada, 299p.
- Nasseri-Moghaddam, A., Cascante, G., Phillips, C., Hutchinson, D.J. (2007). Effects of underground cavities on Rayleigh waves-Field and numerical experiments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27 (4), pp. 300-313.
- Nazarian, S., (1984) In-situ determination of elastic moduli of soil deposits and pavement systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves methode, Thèse de Doctorat en sciences appliquées, Université du Texas Austin, Texas, É. U., 452 p.
- Nazarian, S., Stokoe, K. H. (1985) In-situ determination of elastic moduli of pavement systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves methode (practical aspects), Research Report 368-1F, Center for Transportation Research, Universit, du Texas Austin, Texas, É. U., 161 p.
- Nyquist, J.E. Peake, J.S. Roth, M.J.S. 2007. Comparison of an optimized resistivity array with dipole–dipole soundings in karst terrain. *Geophysics* 72 (4), F139–F144.
- Papoulis, A. 1974. Ambiguity Function in Fourier Optics. *J. Opt. Soc. Am.* Vol. 64. Pp. 779-788.
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., 1999. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics* 64, 800– 808

Pilant, W. L., Knopoff, L., Schwab, F. (1964) Transmission and Reflexion of Surface Waves at a Corner, 3, Rayleigh Waves (experimental), Journal of Geophysical Research, Vol. 69, No2.

Pilant, W. L., Knopoff, L., (1964) Observations of Multiple Seismic Events, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 54, p. 19---39.

Pueyo-Anchuela, O. Casas Sainz, A.M. Soriano M.A. Pocoví Juan, A. (2009). Mapping subsurface karst features with GPR: results and limitations. Environ Geol 58:391–399.

Quirk, M. et Liu, B. (1983). On the Resolution of Autoregressive Spectral Estimation, IEEE ICASSP.

Richart, F. E. (1962) Foundations Vibrations, Transactions, American society of civil engineers, vol. 127, partie 1, p. 863-898.

Richart, F. E., Jr, Hall, J. R., Woods, R. D. (1970) Vibrations of soils and Foundations, Prentice Hall Inc., Englewoods Cliffs, New Jersey, 414p.

Roger, C.D.F. Chapman, D.N. Entwisle, D. Jones, L. Kessler, H. Metje, N. Mica, L. Morey, M. Pospisil, P. Price, S. Raclausky, J. Scott, H. Thomas, A.M. 2007. Predictive Mapping of Soil Geophysical Properties for GPR Utility Location Surveys, In Procs. 5th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, Granada, Spain, p. 27-29.

Rayleigh, J.W.S. (1885). On waves propagated along the plane surface of an elastic solid. In Proceedings of the London Mathematical Society, vol. 17, pp. 4—11.

Rix, G. J. 1988. Experimental Study Of Factors Affecting The Spectral-Analysis -Of- Surface-Waves Method, Thèse de doctorat, The University of Texas at Austin, Austin (Texas), USA.

Rix, Glenn J., Stokoe II, Kenneth H. (1989). Stiffness profiling of pavement subgrades, Transportation Research Record, (1235), pp. 1-9.

Roth, M.J.S. Mackey, J.R. Mackey, C. Nyquist, J.E. 2002. A case study of the reliability of multielectrode earth resistivity testing for geotechnical investigations in karst terrains, Engineering Geology, Volume 65, Issues 2–3, Pages 225-232

Roth, M.J.S. et Nyquist, J.E. 2003. Evaluation of Multi-Electrode Earth Resistivity Testing in Karst: Geotechnical Testing Journal, ASTM, 26, 167-178.

Ryden, N., Lowe, M.J.S. 2004. Guided wave propagation in three-layer pavement structures. Journal of the Acoustical Society of America, 116 (5), pp. 2902-2913

Santamarina, J.C., Lein, K.A., and Fam, M.A. (2001). Soils and waves. *John Wiley and Sons, LTD, England*.

Saydam, A.S. Duckworth, K. 1978. Comparison of some electrode arrays for their IP and apparent resistivity responses over a sheet like target: Geoexploration 16 (4), 267–289.

Schwenk, J.T., Sloan, S.D., Ivanov, J., Miller, R.D. (2015) Surface-wave methods for anomaly detection. Geophysics, 81 (4), pp. EN29-EN42.

Shao, G. Tsoflias, G.P. Li, C. 2016. Detection of near-surface cavities by generalized S-transform of Rayleigh waves, *Journal of Applied Geophysics*, Volume 129, June 2016, Pages 53-65.

Sheriff, R. E., Geldart, L. P. (1982) *Exploration Seismology*, Cambridge University Press, Volume 1.

Shokouhi, P., Gucunski, N., Maher, A. (2005). Dynamic signatures of cavities and buried objects obtained from surface wave testing. *Geotechnical Special Publication*, (130-142), pp. 1001-1015.

Sloan, S.D., Peterie, S.L., Miller, R.D., Ivanov, J., Schwenk, J.T., McKenna, J.R. (2015). Detecting clandestine tunnels using near-surface seismic techniques. *Geophysics*, 80 (5), pp. EN127-EN135.

Stanković, L. 2001 A measure of some time–frequency distributions concentration, *Signal Processing*, Volume 81, Issue 3, Pages 621-631

Stockwell, R.G. Mansinha, L. et Lowe, R.P. 1996. Localization of the complex spectrum: the S-transform, *IEEE Trans. Signal Proc.*, 44(4), 998-1001.

Stein, S., and Wysession, M. (2003). An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure. *Blackwell Publishing, Malden, MA, USA*.

Szalai, S. Szarka, L. 2008. On the classification of surface geoelectric arrays: Geophysical Prospecting 56 (2), 159–175.

Tary, J. B. Herrera, R. H. Han, J. and van der Baan, M. 2014a. Spectral estimation—What is new? What is next?, *Rev. Geophys.*, 52, 723–749.

Tary, J. B. Herrera, R. H. et van der Baan, M. 2014b. Time-Varying Autoregressive Model for Spectral Analysis of Microseismic Experiments and Long-Period Events, 196(1), 600–611, doi:10.1093/gji/ggt400.

Thakur, G. Brevdo, E. Fuckar, N. S. et Wu, H.-T. 2013. The synchrosqueezing algorithm for time-varying spectral analysis: Robustness properties and new paleoclimate applications. *Signal Process*, vol. 93, no. 5, pp. 1079–1094.

Thomson, W. T., (1950) Transmission of Elastic Waves Through a Stratified Solid Medium, *Journal of Applied Physics*, 21(2), p. 89-93.

Thomas, B. Roth, M.J.S. 1999. Evaluation of site characterization methods for sinkholes in Pennsylvania and New Jersey: *Engineering Geology*, Volume 52, Issues 1–2, March 1999, Pages 147-152, ISSN 0013-7952,

Tolstoy, I. 1973. *Wave Propagation*. McGraw-Hill International Series in the Earth and Planetary Sciences. 466 pp.

Tremblay, S.P. et Karray, M. 2014. Développement d’une procédure non intrusive basée sur la propagation des ondes élastiques pour l’évaluation de l’état des structures en béton enfouies du réseau de distribution d’Hydro-Québec. Rapport Interne, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec), Canada, 164p.

Tremblay, S.P. Karray, M. Chekired, M. Bessette, C. Jina, L. 2017. Inspection of the lids of shallowly buried concrete structures based on the propagation of surface waves. *Journal of Applied Geophysics*, Volume 136, Pages 19-34

Tremblay, S.P. 2017. Développement d'une procédure non intrusive basée sur la propagation des ondes élastiques pour l'évaluation de l'état des structures en béton enfouies du réseau de distribution d'Hydro-Québec. Thèse de doctorat en génie civil, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec), Canada, 313p.

Van Schoor, M. 2002. Detection of Sinkholes Using 2D Electrical Resistivity Imaging: *Applied Geophysics Journal*, 50, 4, 393-399.

Veen, M.V.D., Spitzer, R., Green, A., Wild, P., 2001. Design and application of a towed land-streamer system for cost-effective 2-D and pseudo-3-D shallow seismic data acquisition, *Geophysics*, 66, pp. 482-500

Vera Rodriguez, I. Bonar, D. Sacchi, M. D. 2012. Microseismic data denoising using a 3C group sparsity constrained time-frequency transform, *Geophysics*, 77, V21–V29.

Vermeer, G., 2002. 3D seismic survey design, SEG, Tulsa, OK

Victorov, I. A., 1958. The Effect of Surface Defects on the Propagation of Rayleigh Waves, *Soviet Physics, Doklady*, Vol 3, p. 304---306.

Ville, J. 1948. Théorie et Applications de la Notion de Signal Analytique. Câbles et Transmission. Vol.2 a. pp 61-74.

Xia, J. Nyquist, J.E. Xu, Y. Roth, M.J.S. Miller, R.D. 2007. Feasibility of detecting near-surface feature with Rayleigh-wave diffraction. *Journal of Applied Geophysics* 62, pp. 244–253.

Xu, Y. Xia, J. Miller, R.D. 2006. Quantitative estimation of minimum offset for multichannel surface-wave survey with actively exciting source. *J. Appl. Geophys.* 59, 117–125.

Yamashita, Y. Groom, D. Inazaki, T. et Hayashi, K. 2004. Rapid near surface resistivity survey using the capacitively-coupled resistivity system: OhmMapper. *Proceeding of 7th SEGJ International Symposium*, 292-295.

Yelf, R.J. 2007. Application of ground penetrating radar to civil and geotechnical engineering. *Electromagnetic Phenomena*, 7(1), 18.

Yu, H. Huang, Y. Guo, B. 2016. Near-surface fault detection by migrating back-scattered surface waves with and without velocity profiles: *Journal of Applied Geophysics*, Volume 130, Pages 81-90.

Zhou, W. F. Beck, B. F. et Adams, A. L. 2002. Effective Electrode Array in Mapping Karst Hazards in Electrical Resistivity Tomography: *Environmental Geology*, 42, 8, 922-928.

Zhu, J. Currens, J.C. Dinger, J.S. 2012. Challenges of using electrical resistivity method to locate karst conduits—a field case in the Inner Bluegrass Region, Kentucky. *Journal of Applied Geophysics* 75 (3), 523–530.

