

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Département de génie civil

Faculté des sciences appliquées

**APPLICATION DE LA MÉTHODE MASW POUR
LA DÉTECTION DE ZONES DE FAIBLESSE
SOUS LES CHAUSSÉES**

Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées

Spécialité : Géotechnique environnementale

Houssem Eddine SFAXI

RÉSUMÉ

Le but de ce document est d'appliquer une méthode entièrement développée à l'Université de Sherbrooke appelée Modal-Analysis-of-Surface-Waves (MASW) afin de détecter les zones de faiblesses sur les structures de chaussées telles que les cavités causées par infiltration de sol dans les vieux ponceaux par exemple. Cette méthode d'investigation sismique utilise l'enregistrement rapide des ondes de surface comme base de données. À partir d'essais in-situ non intrusifs, la méthode permet d'obtenir un profil des ondes de cisaillement en fonction de la profondeur.

La première partie est consacrée à l'état des connaissances sur les ondes et les différentes méthodes géophysiques de caractérisation des pavages. Elle comprend la théorie de propagation des différentes ondes (compression, cisaillement et de surface); les modèles théoriques de calcul de la vitesse des ondes de cisaillement pour les sols granulaires et argileux; les différentes méthodes sismiques présentement utilisées sur les pavages en ingénierie.

La deuxième partie explique de façon approfondie la méthode MASW : son historique, l'équipement nécessaire et le cheminement typique d'un essai. Elle présente aussi une nouvelle configuration pour la méthode MASW afin de mieux l'adapter à la reconnaissance des structures des chaussées. Il s'agit d'une excitation à côté du pavage au lieu du dessus.

La troisième partie résume les résultats de différentes études numériques visant d'abord à minimiser au maximum l'effet de la couche de pavage sur le profil de vitesses des ondes de cisaillement des couches inférieures et ensuite à détecter et à localiser la présence de zones de faiblesse. Une correction de la courbe de dispersion a été envisagée permettant de réduire l'effet de la couche de pavage sur les couches sous-jacentes.

Enfin, la quatrième partie présente les résultats obtenus pour deux sites ayant fait l'objet d'une reconnaissance avec la méthode MASW sur les structures de chaussée.

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été mené au laboratoire de mécanique des sols du département de génie civil de l'Université de Sherbrooke. Je tiens tout particulièrement à remercier mon directeur de mémoire, monsieur Guy Lefebvre, professeur titulaire au département, pour m'avoir accueilli au sein de son groupe de recherche, pour son soutien, ses conseils judicieux et ses encouragements. Je le remercie également de la confiance qu'il m'a accordée au cours de la réalisation de cette étude. À un homme remarquable, merci.

Je suis très reconnaissant envers monsieur Mourad Karray, docteur et attaché de recherche à l'Université de Sherbrooke, pour avoir suivis et éclairé avec intérêt mes travaux de maîtrise et surtout pour ses remarques avisées tout au long de ces deux années (*merci Mourad*).

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à tout le personnel du laboratoire de géotechnique, monsieur Jean Guy Lemelin pour son aide et la réalisation des essais et monsieur Éric Drouin pour les bons moments qu'on a passé ensembles. Je ne saurais oublier madame Nicole Laverdière, madame Marielle Beaudry et madame Nathalie Vallée pour leur grande serviabilité.

Je voudrais remercier toutes les personnes qui m'ont permis de passer deux années agréables. Je pense en particulier à Farouk, Abdellatif, Ziad et Saghir, pour leur amitié, leurs interventions dynamiques dans les moments difficiles, et tous les moments partagés en dehors du laboratoire.

Enfin, je remercie mes parents, mes grands parents, ma fiancée Wiem, mon frère Walid et mes sœurs, qui ont su tous me donner le support moral et la force à continuer de l'avant malgré la distance et l'éloignement.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	i
Remerciements.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures	vii
Liste des photos.....	x
Liste des tableaux.....	xi
Liste des symboles.....	xi
1. INTRODUCTION.....	1
2. PROPAGATION DES ONDES ÉLASTIQUES ET MÉTHODES DE MESURE... 4	
2.1 Introduction.....	4
2.2 Théorie de propagation des ondes.....	4
2.2.1 Les ondes de volume	4
a) Ondes de compression:.....	5
b) Ondes de cisaillement :	5
2.2.2 Valeurs typiques du coefficient de Poisson	7
2.2.3 Vitesses typiques des ondes de cisaillement	7
2.2.4 Modèles de prédiction des vitesses des ondes de cisaillement :	8
a) Modèles pour les sols granulaires	8
b) Modèles pour les sols cohésifs	10
2.2.5 Les ondes de surface	11
a) L'onde de Love.....	11
b) L'onde de Rayleigh	13
3. MÉTHODES DE MESURE DES ONDES DE CISAILLEMENT.....	17
3.1 La méthode du <i>cross-hole</i>	17

3.2	La méthode du <i>downhole</i>	18
3.3	La méthode de réfraction	20
3.4	Méthode sismique de réflexion	22
3.5	La méthode Steady-state	24
3.6	La méthode de surface SASW	24
3.7	Analyse multicanale des ondes de surface	27
3.8	La méthode de réfraction micro-secousses	27
3.9	Méthode d'analyse modale des ondes de surface (MASW).....	28
3.10	La méthode du déflectomètre.....	30
4.	CARACTÉRISATION DES CHAUSSÉES	31
4.1	Introduction	31
4.2	Historique	31
4.2.1	Les études de Jones	32
4.2.2	Les études de Henklom et Klomp	34
4.2.3	Les études de la WES et autres	35
4.2.4	Les études post-SASW	36
4.2.5	Adaptation de la méthode SASW aux chaussées et problèmes	37
4.3	Synthèse.....	40
5.	POSITION DU PROBLÈME ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	41
5.1	Généralités – position du problème.....	41
5.2	Sources et matériel utilisé	44
5.3	Cheminement typique d'un essai MASW	44
5.3.1	Prise de données	44

5.3.2 Traitement et analyse des données	46
5.3.3 Inversion - profil de vitesse.....	47
6. CARACTÉRISATION DES STRUCTURES DE CHAUSSÉES - SIMULATIONS.....	49
6.1 Introduction.....	49
6.2 Modélisation.....	49
6.3 Validation des résultats.....	52
6.4 Étude de cas	53
6.4.1 Cas 1.....	54
6.4.2 Analyse et interprétation - cas 1	55
6.4.3 Cas 2.....	58
6.4.4 Analyse et interprétation - cas 2	59
6.4.5 Effet de l'épaisseur du pavage.....	62
6.4.6 Effet de la vitesse du pavage.....	64
6.4.7 Détermination d'une fonction de l'accélération causée par le pavage..	65
7. CARACTÉRISATION DES STRUCTURES DE CHAUSSES AU DESSUS DES PONCEAUX – SIMULATIONS NUMÉRIQUES	74
7.1 Introduction.....	74
7.2 Simulations MASW – chaussée avec pavage.....	74
7.2.1 Structure de la chaussée	74
7.2.2 Source et capteurs	75
7.3 Analyse et interprétation des données	75
7.3.1 Profil 1.....	76
7.3.2 Profil 2.....	79
7.3.3 Profil 3.....	82

7.4 Conclusion.....	85
8. ÉTUDE DE CAS.....	86
8.1 Choix des sites.....	86
8.2 Résultats MASW au site de Sherbrooke	86
8.3 Résultats MASW au site de Sainte-Agathe.....	91
9. CONCLUSIONS	95
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	98
ANNEXE 1.....	A1
ANNEXE 2.....	A4
ANNEXE 3.....	A15
ANNEXE 4.....	A26
ANNEXE 5.....	A28
ANNEXE 6.....	A32
ANNEXE 7.....	A36
ANNEXE 8.....	A40
ANNEXE 9.....	A49
ANNEXE 10.....	A53
ANNEXE 11.....	A58

LISTE DES FIGURES

Figure 2. 1 Schématisation de l'onde P	5
Figure 2. 2 Schématisation de l'onde S.....	6
Figure 2. 3 Influence de différents facteurs sur le rapport de G/G_{\max}	10
Figure 2. 4 Valeurs de l'exposant k dans les équations du tableau 2.5.....	11
Figure 2. 5 Schématisation de l'onde de Love	12
Figure 2. 6 Dispersion de l'onde de Love	13
Figure 2. 7 Schématisation de l'onde de Rayleigh.....	14
Figure 2. 8 Rapport de vitesse des ondes élastiques	14
Figure 2. 9 Propriétés des ondes de Rayleigh	15
Figure 3. 1 Configuration typique d'un essai cross-hole	17
Figure 3. 2 Configuration typique d'un essai avec la méthode du downhole.....	19
Figure 3. 3 Configuration typique d'un essai avec la méthode de réfraction	20
Figure 3. 4 Configuration typique d'un essai avec la méthode de réflexion.	23
Figure 3. 5 Principe de la méthode Steady-state	24
Figure 3. 6 Dispositif de base.....	25
Figure 3. 7 Configuration d'un essai MASW	30
Figure 4. 1 Comparaison des courbes de dispersion théorique et expérimentale (Jones 1958)	33
Figure 4. 2 Résultats depuis une section expérimentale d'une chaussée ayant une couche d'asphalte supérieure.....	33
Figure 4. 3 Vitesse des ondes en fonction de la profondeur approximative (Henkelom et Klomp, 1962).....	35
Figure 4. 4 L'interprétation des données issues des études, de Nazarian et Stokoe. a) Courbe de dispersion b) Courbe d'inversion (Stokoe et Nazarian, 1983)	38
Figure 4. 5 Les courbes de dispersion (a) et inversion (b) (Nazarian 1984).....	39
Figure 5. 1 Courbe de dispersion de la simulation MASW avec excitation au dessus du pavage.	43
Figure 5. 2 Dispositif de base de la méthode MASW.....	45

Figure 5. 3 Enregistrement typique d'un capteur lors d'un essai MASW (distance : source - premier capteur = 2.8m; capteur - capteur = 0.2m)	46
Figure 5. 4 Trois signaux d'une même série MASW (distance : source - premier capteur = 2.8m; capteur - capteur = 0.2m).....	46
Figure 6. 1 Modélisation du problème de propagation des ondes de Rayleigh	51
Figure 6. 2 Validation des simulations réalisées à l'aide de FLAC.....	53
Figure 6. 3 Résultats des simulations effectuées à l'aide de FLAC - cas1 (V_s du pavage = 1200m/s).	57
Figure 6. 4 Différence en vitesse de phase en fonction de la longueur d'onde	58
Figure 6. 5 Les courbes de dispersion des simulations 9, 10, 11 et 12	59
Figure 6. 6 Comparaison des courbes de dispersion avec et sans pavage de la simulation 12	60
Figure 6. 7 Différence en vitesse de phase en fonction de la longueur d'onde de la simulation 12	61
Figure 6. 8 Effet de la distance source/ premier capteur et l'espacement entre les capteurs	62
Figure 6. 9 Effet de la distance source/premier capteur.....	63
Figure 6. 10 Effet de l'épaisseur du pavage	64
Figure 6. 11 Comparaison de l'effet de la vitesse du pavage.....	65
Figure 6. 12 Le décalage temporel des différentes simulations du cas 1 pour différentes fréquences (a : F=30 Hz, b : F=40 Hz, c : F=50 Hz, d : F=60 Hz, e : F=70Hz, f : F=80 Hz et g : F= 90 Hz)	68
Figure 6. 13 Le décalage temporel de la simulation 12 (cas 2) pour différentes fréquences.....	69
Figure 6. 14 Coefficients C	71
Figure 6. 15 Coefficients B	71
Figure 6. 16 Coefficients A	72
Figure 6. 17 Correction du profil de la simulation 14.....	72
Figure 6. 18 Correction du profil de la simulation 12 (cas2).....	73
Figure 7. 1 Représentation de la chaussée modélisée	74

Figure 7. 2 Comparaison des courbes de dispersion ainsi que des profils de vitesse des ondes de cisaillement pour les simulations du profil 1 avec et sans cavité.	77
Figure 7. 3 Courbes tomographiques du profil 1 : a) profil uniforme théorique, b) profil uniforme sans cavité déterminé à partir de la simulation et c) profil avec cavité.	78
Figure 7. 4 Comparaison des courbes de dispersion ainsi que des profils de vitesse des ondes de cisaillement pour les simulations du profil 2 avec et sans cavité.	80
Figure 7. 6 Comparaison des courbes de dispersion ainsi que des profils de vitesse des ondes de cisaillement pour les simulations du profil 2 avec et sans cavité.	83
Figure 8. 1 Localisation des essais MASW sur la sortie Boulevard Bourque – Chaînage 0+030.....	87
Figure 8. 2 Localisation des essais MASW sur l’autoroute 15 Nord –chaînages 0+500 – 0+560 – 0+620.....	88
Figure 8. 3. Configuration des essais MASW effectués sur la sortie Boulevard Bourque à Sherbrooke.	89
Figure 8. 4 Tomographie de vitesses des ondes de cisaillement déterminée sur la ligne 1 située au dessus du centre du ponceau au chaînage 0+030 sur la sortie Boulevard Bourque à Sherbrooke.....	89
Figure 8. 5 Tomographie de vitesses des ondes de cisaillement déterminée sur la ligne 2 située au dessus du centre du ponceau au chaînage 0+030 sur la sortie Boulevard Bourque à Sherbrooke.....	90
Figure 8. 6 Tomographie de vitesses des ondes de cisaillement déterminée sur : a) la ligne 1 du côté nord, b) la ligne 2, c) la ligne 3 et d) la ligne 4 du côté sud située sur l’autoroute 15 nord, chaînage 0+500 à 0+620.....	92
Figure 8. 7 Identification des zones de faiblesse sur l’autoroute 15 Nord – chaînages 0+500 – 0+560 – 0+620	94

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2. 1 Valeurs typiques du coefficient de Poisson (ν).....	7
Tableau 2. 2 Vitesses typiques des ondes de cisaillement (m/s) dans les différents sols (DOWRICK, 1987).....	7
Tableau 2. 3 Relations pour l'évaluation de G_{\max} ou V_s pour les sols granulaires	9
Tableau 2. 4 Comparaison des valeurs de V_s	10
Tableau 2. 5 Relations pour l'évaluation de V_s pour les sols cohésifs	11
Tableau 6. 1 Propriétés du milieu considéré	52
Tableau 6. 2 les profils types utilisés dans les simulations (cas 1)	54
Tableau 6. 3 Les premières simulations considérées (cas 1)	54
Tableau 6. 4 Récapitulation des deuxièmes simulations du cas 1.....	55
Tableau 6. 5 les profils types utilisés dans les simulations (cas 2)	58
Tableau 6. 6 Les premières simulations considérées (cas 2)	59
Tableau 6. 7 Les simulations de l'effet de l'épaisseur de la couche du pavage.....	63
Tableau 6. 8 Les coefficients de l'équation 6.3 pour les différentes simulations	70
Tableau 7. 1 Caractéristiques des trois profils.	75

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Unité	Description
A, B, C	-	Constantes
e	-	Indice des vides
E	-	Module de Young
F, f	Hz	Fréquence
G	-	Module de cisaillement équivalent
G_{\max}	-	Module de cisaillement maximal (à petite déformation)
H	m	Epaisseur de la couche
I_d	-	Indice de densité
K_0	-	Pression des terres (σ'_h / σ'_v)
OCR	-	Rapport de surconsolidation
P	m/s	Vitesse de propagation de l'onde de Love
r	m	Distance des premiers capteurs à la source
t	s	Décalage temporel entre avec et sans pavage
V	m/s	Vitesse de propagation de l'onde
V_C	m/s	Vitesse de la couche
V_{gL}	m/s	Vitesse de groupe de l'onde de Love
V_p	m/s	Vitesse des ondes de compression
V_R	m/s	Vitesse de phase des ondes de Rayleigh
V_s	m/s	Vitesse des ondes de cisaillement
x	m	Distance source - capteur
x_0	m	Distance source – début du pavage
Z	m	Profondeur
[K]	-	Matrice de rigidité

[M]	-	Matrice masse
[V]	-	Matrice d'amortissement
ρ	kg/m ³	Masse volumique
σ'_h	kPa	Contrainte effective horizontale
σ'_m	kPa	Contrainte effective moyenne
σ'_v	kPa	Contrainte effective verticale
Δl	cm	Espacement entre les capteurs
λ	m	Longueur d'onde
ν	-	Coefficient de poisson
ϕ'	°	Angle de cohésion
ω	rd/s	Fréquence angulaire
ξ_{min}	-	Taux d'amortissement minimum
γ	-	Distorsion

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Au cours des dernières années, plusieurs affaissements et effondrements des chaussées, causées par de vieux ponceaux, ont été constatés sur les routes du Québec. En 2002, deux problèmes d'affaissements majeurs ont été constatés sur une même autoroute (la 40) à peine à une semaine d'intervalle, causant ainsi l'interruption de la circulation à plus qu'une voie.

Le 5 mai 2002, un premier affaissement d'un tuyau a provoqué la fermeture d'un tronçon de l'axe routier sur l'autoroute 40 (photo 1.1). L'accotement de l'autoroute s'était effondré et seule une couche d'asphalte soutenait les véhicules qui passaient sur l'autoroute (la presse canadienne du 6/05/2002).



Photo 1. 1 Effondrement de l'autoroute 40 le 05/05/2002

Le tuyau de tôle qui se trouvait sous le pavé s'était en effet affaissé. Dû au niveau du fleuve Saint-Laurent assez élevé à cet endroit, une forte corrosion a miné les bords du tuyau, qui s'est alors effondré.

Le même genre d'incident s'était produit un peu plus tôt, à quelques centaines de mètres de l'endroit. Dans ce cas, le tuyau ne s'était pas complètement effondré. Une

seule voie avait été fermée. Une réparation temporaire de la chaussée avait alors été effectuée.

Le 12 mai 2002, un autre effondrement de la chaussée est survenu sur la même autoroute 40. Cette fois, les deux voies ont dû être bloquées en direction est, en raison d'un trou important qui s'était formé sous le pavage (dalle de béton), à la droite de la route, à quelques mètres du pont de la rivière Batiscan. Un joint dans un tuyau de tôle n'était pas étanche, si bien que le sable s'était infiltré à l'intérieur du tuyau développant une cavité à l'extérieur.

Pour éviter que d'autres événements du genre se produisent dans des zones propices à la corrosion des tuyaux ou à la formation de cavités, il serait fort intéressant d'avoir un moyen efficace permettant de les prévoir. Le ministère des Transports du Québec a donc mandaté l'université de Sherbrooke pour examiner si les essais MASW permettent de détecter la présence de zones de faiblesse ou de cavités au voisinage de ponceaux existants. Ces essais, sont basés sur la vitesse de propagation des ondes de surface et sont réalisés entièrement à partir de la surface de la chaussée, sans forage ou intrusion. Ces essais MASW s'inscrivent à l'intérieur d'un programme mené par le ministère des Transports du Québec en vue de développer une méthode pour détecter sans intrusion les zones molles et les cavités en dessous des pavages, d'où le but de cette étude. L'étude a donc pour objectifs :

- ✓ de vérifier l'applicabilité de la méthode MASW à la détection des cavités en dessous des pavages,

- ✓ de développer une nouvelle configuration qui permet une meilleure investigation en profondeur des structures de chaussées,

- ✓ d'établir à l'aide de simulations numériques les différents paramètres influençant le comportement des ondes de Rayleigh traversant la chaussée,

Les chapitres 2, 3 et 4 passent en revue les principaux éléments reliés à la caractérisation des structures de chaussées par le biais des ondes sismiques. Le chapitre 2 traite des phénomènes de propagation des ondes et les modèles de

prédiction des vitesses des ondes de cisaillement pour les différents types de sol (granulaires et cohésifs). Le chapitre 3 présente les principales méthodes sismiques de caractérisation in-situ et fait état des différentes applications pouvant avoir recours à ce genre de méthode. Le chapitre 4 présente une synthèse des principales méthodes et théories utilisées dans le domaine d'investigation des structures de chaussée afin de mieux établir les principaux objectifs de recherche.

Le chapitre 5 présente les différentes étapes de la méthode MASW depuis la prise de données jusqu'à l'obtention des profils de vitesse (inversion).

Le chapitre 6 présente une étude numérique détaillée (simulations), en utilisant une nouvelle configuration MASW (excitation à coté du pavage), pour caractériser les structures de chaussée. Il permet ainsi de mieux comprendre l'effet de la couche de pavage sur les résultats en les comparant avec des profils sans pavage. Il propose aussi une procédure de correction qui pourra être utilisée afin de retrouver le profil sans pavage en partant des essais avec pavage.

Le chapitre 7 introduit la notion de cavités en dessous des pavages en présence des ponceaux. En effet, il présente les résultats de simulations effectuées à l'aide de la nouvelle configuration. En partant de plusieurs cas (différents profils de vitesse des ondes de cisaillement), les cavités ont pu être localisées d'une façon assez bonne.

Le chapitre 8 présente deux études de cas réels, comme appui à l'utilisation de la nouvelle configuration MASW sur les pavages.

CHAPITRE 2

PROPAGATION DES ONDES ELASTIQUES ET METHODES DE MESURE

2.1 INTRODUCTION

De façon simple, la propagation d'une onde dans le sol peut se décrire comme suit : l'impulsion de départ va "pousser" des particules élémentaires, qui vont "pousser" d'autres particules et reprendre leur place. Ces nouvelles particules vont "pousser" les particules suivantes et reprendre leur place, et ainsi de suite.

Les vibrations engendrées dans un sol se propagent dans toutes les directions. On distingue les ondes de volume qui traversent le sol et les ondes de surface qui se propagent parallèlement à sa surface. Leur vitesse de propagation et leur amplitude sont modifiées par les structures géologiques traversées. Les signaux enregistrés sont la combinaison d'effets liés à la source, aux milieux traversés et aux instruments de mesure (Nataf et Sommeria, 2000).

Ces ébranlements, qui se déplacent sous forme d'ondes, traversent le sol et donnent des indications importantes sur sa constitution.

2.2 THÉORIE DE PROPAGATION DES ONDES

2.2.1 Les ondes de volume

Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé, et d'une manière générale elle augmente avec la profondeur.

On distingue :

a) ondes de compression:

- Les ondes P, ou ondes primaires, sont appelées aussi ondes de compression ou ondes longitudinales (figure 2.1). Le déplacement du sol, qui accompagne leur passage, se fait par dilatation et compression successives, parallèlement à la direction de propagation de l'onde. Elles sont les plus rapides et sont enregistrées en premier sur un sismographe. Elles sont responsables du grondement sourd que l'on peut entendre au début d'un tremblement de terre.

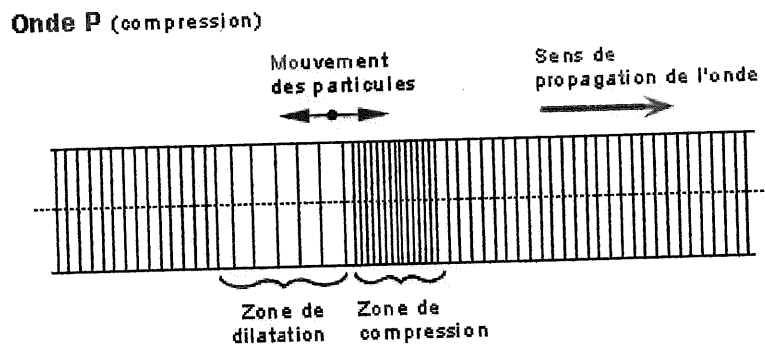


Figure 2. 1 Schématisation de l'onde P

b) ondes de cisaillement :

- Les ondes S ou ondes secondaires sont appelées aussi ondes de cisaillement ou ondes transversales (figure 2.2). À leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides. Leur vitesse est plus lente que celle des ondes P, elles apparaissent en second sur les sismographes.

Onde S (cisaillement)

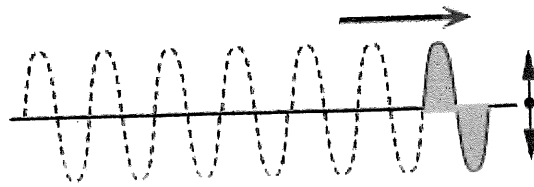


Figure 2. 2 Schématisation de l'onde S

Les ondes de volume se propagent un peu comme les rayons lumineux : elles peuvent être réfléchies ou réfractées, c'est-à-dire déviées à chaque changement de milieu. Elles peuvent ainsi suivre des trajets très complexes à l'intérieur du milieu de propagation. Leur temps de parcours dépend de ce trajet, elles n'arrivent pas toutes en même temps au même endroit.

La vitesse de l'onde de cisaillement (S) dépend du module de cisaillement (G) et de la masse volumique (ρ). Cependant, la vitesse des ondes de compression dépend non seulement du facteur de compressibilité (k), mais aussi du module de cisaillement (G). 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 (Karray, 1999).

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 2.8) :

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{1-\nu}{1/2-\nu}} \quad (2.1)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda+2G}{\rho}} \quad \text{et} \quad V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.2)$$

$$\text{avec} \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{dans le domaine élastique} \quad (2.3)$$

λ et G sont en MPa,

V_p et V_s en m/s ,

et ρ représente la masse volumique totale du sol en kg/m^3 .

L'onde de cisaillement est presque inexistante dans un milieu où ν est de l'ordre de 0,5, comme l'eau par exemple. La vitesse des ondes de compression est dans ce cas de l'ordre de 1500 m/s (Karray, 1999).

2.2.2 Valeurs typiques du coefficient de Poisson

Le coefficient de Poisson est essentiellement fonction du type de matériau et de sa densité. Plus le sol est dense plus le coefficient de Poisson augmente jusqu'à une limite située autour de 0,4. Pour les sols saturés qui ne changent pas de volume lors d'un chargement non drainé, la valeur de ν est proche de 0,5. Des valeurs typiques de ν , déterminées à l'aide de méthodes sismiques, sont données au tableau 2.1.

Tableau 2. 1 Valeurs typiques du coefficient de Poisson (ν)

Type de matériau	ν (d'après Sharma et coll., 1990)	ν (d'après Davidovici, 1985)
Argile saturée	0,4 à 0,5	0,5
Argile non saturée	0,1 à 0,3	
Argile moyenne	---	0,4 à 0,45
Argile sablonneuse	0,2 à 0,3	0,35 à 0,4
Silt	0,3 à 0,35	---
Sable, sable graveleux	0,3 à 0,4	0,25 à 0,3
Sable silteux, sable argileux	---	0,3 à 0,35
Roche	0,1 à 0,4	---
Béton	0,15	---

2.2.3 Vitesses typiques des ondes de cisaillement

Le tableau 2.2 présente plusieurs valeurs typiques des ondes de cisaillement en fonction de la profondeur.

Tableau 2. 2 Vitesses typiques des ondes de cisaillement (m/s) dans les différents sols (DOWRICK, 1987)

Material	Profondeur		
	3-20 m	21-50 m	> 50 m
<i>Loose Sand saturated</i>	60	-	-
<i>Fluvial sand</i>	60	100	125
<i>Clay</i>	60	200	300
<i>Silt</i>	60	-	-
<i>Silty clay</i>	60	240	-
<i>Marshland</i>	80	-	-
<i>Reclaimed land, recent</i>	50	100	-
<i>Sandy clay</i>	100	250	-
<i>Gravel, loose</i>	100	300	600
<i>Fine sand saturated</i>	110	-	-
<i>Medium Sand, uniform grading</i>	100	140	-
<i>Tertiary moist clay</i>	130	-	-
<i>Clay mixed with sand</i>	140	-	-
<i>Loam</i>	150	200	-
<i>Dense sand</i>	160	-	-
<i>Saturated medium sand</i>	160	-	-
<i>Argillaceous sand</i>	170	-	-
<i>Gravel with stones</i>	180	-	-
<i>Clay, saturated</i>	190	-	-
<i>Medium sand with fines</i>	190	-	-
<i>Clayey sand with gravel</i>	200	-	-
<i>Medium sand in situ</i>	220	220	-
<i>Marl</i>	220	-	-
<i>Dry clay</i>	220	-	-
<i>Compacted clay fill</i>	240	-	-
<i>Dry loess</i>	260	-	-
<i>Puddled clay heavily compacted</i>	-	320	-
<i>Coarse gravel tightly packed</i>	420	-	-
<i>Medium gravel</i>	-	330	-
<i>Quartz sand stone</i>	-	-	780
<i>Atlantic muck, ooze</i>	-	-	1000 - 1500
<i>Hard sandstones (Mesozoic)</i>	-	-	1200
<i>Tuffaceous sand stone</i>	-	-	2000
<i>Concrete</i>	-	-	2200
<i>Mesozoic shales</i>	-	-	2350
<i>Granite (intact)</i>	-	-	2700
<i>Limestone (palaeozoic)</i>	-	-	3340
<i>Clay-slate (palaeozoic)</i>	-	-	3610

2.2.4 Modèles de prédiction des vitesses des ondes de cisaillement :

a) Modèles pour les sols granulaires

Aux faibles amplitudes ($\gamma \leq 10^{-3}$), les déformations sont conditionnées par le module tangent ou de cisaillement maximum G_{\max} qui dépend, pour un sol donné, de

l'indice des vides (e) ou de la densité (I_d) et de la contrainte effective moyenne σ'_m . Il existe dans la littérature un grand nombre de relations, pour différents types de sols granulaires, qui relient le module G_{\max} ou V_s ($G_{\max} = \rho V_s^2$) à ces deux paramètres (e et σ'_m) ou à la résistance à la pénétration standard (SPT, caractérisant la densité). Le tableau 2.3 résume quelques-unes des relations les plus couramment utilisées.

Aux moyennes et aux grandes amplitudes ($\gamma > 10^{-3}$), le rapport G/G_{\max} varie modérément en fonction de la contrainte effective verticale (σ'_v , figure 2.3 c) et faiblement avec la variation de K_0 et de ϕ' (figure 2.3 a et b). Il faut voir que G/G_{\max} est également influencé par l'indice des vides dont l'effet le plus important est déjà inclus dans le module de cisaillement maximal (G_{\max}).

Tableau 2. 3 Relations pour l'évaluation de G_{\max} ou V_s pour les sols granulaires

Auteur(s)	Type de sol	V_s (m/s)	Limites de e
Hardin et Richard (1963)	sable à grains arrondis	$2626 \sqrt{\frac{(1.17 - e)^2}{\rho(1 + e)}} \sigma_m^{1/4}$	$0,35 \leq e \leq 0,85$
	sable à grains anguleux (sable de concassage)	$1797 \sqrt{\frac{(1.17 - e)^2}{\rho(1 + e)}} \sigma_m^{1/4}$	$0,60 \leq e \leq 1,30$
Hardin et Richard (1963)	Till	$(111 - 51e) \sigma_m^{1/4}$	$0,30 \leq e \leq 0,80$
Seed et Idriss (1970)	Sable	$365.5 \sqrt{\frac{(I_d + 25)}{\rho}} \sigma_m^{1/4}$	-
Robertson et coll. (1995)	sable d'Ottawa	$(115 - 78.2e) \sigma_m^{0.26}$	$0,56 \leq e \leq 0,90$
Kim et Novak (1981)	sols granulaires	$1255 \sqrt{\frac{(2.97 - e)^2}{\rho(1 + e)}} \sigma_m^{1/4}$	-
Sykore et Stokoe (1983)	sols granulaires	$107.1N^{0.27}$	-

Note : σ' est exprimée en kPa, ρ en kg/m³ et N en nombre de coups par pi.

À titre d'exemple pour un sol à grains arrondis, d'une densité de 1800 kg/m³ (dépôt naturel assez lâche) et sous une contrainte effective moyenne de 180 kPa, le tableau

2.4 montre une comparaison entre les différentes formules de calcul de V_s pour différentes valeurs de e .

Tableau 2. 4 Comparaison des valeurs de V_s

Auteur(s)	e	V_s (m/s)
Hardin et Richard (1963)	0.4	331.8
	0.6	294.5
	0.8	257.1
Robertson et coll. (1995)	0.4	-
	0.6	262.6
	0.8	202.3

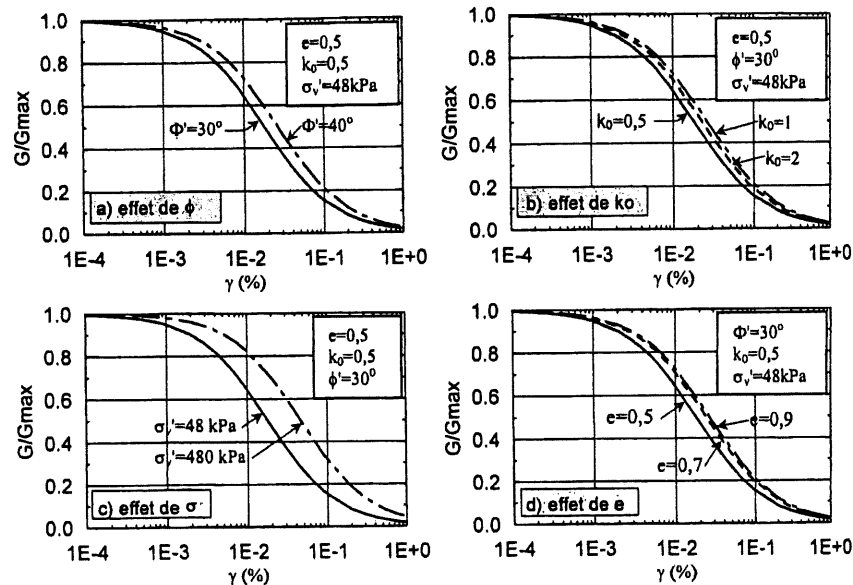


Figure 2. 3 Influence de différents facteurs sur le rapport de G/G_{max} (Vucetic et Dorby, 1991)

b) Modèles pour les sols cohésifs

La dynamique des sols a vu se développer plusieurs modèles théoriques qui permettent d'évaluer la vitesse de propagation des ondes de cisaillement pour les sols cohésifs. Dans les dépôts argileux, il est généralement accepté que la vitesse des ondes de cisaillement varie surtout en fonction de la contrainte effective moyenne (σ'_m), de l'indice de plasticité (I_p), du degré de surconsolidation (OCR) et de l'indice des vides

(e). Plusieurs relations ont été proposées dans la littérature pour l'évaluation de V_s . Quelques-unes de ces relations sont données au tableau 2.5. Dans ces relations, l'exposant k varie avec l'indice de plasticité tel qu'illustré par la figure 2.4.

Tableau 2. 5 Relations pour l'évaluation de V_s pour les sols cohésifs

Auteur(s)	Type de sol	V_s (m/s)	Limites de e
Hardin et Black (1969)	argile	$(103,6 - 34,93e)OCR^{k/2}\sigma_m^{1/4}$	-
Kim et Novak (1981)	argile et silt	$(73,03 - 33,86e)OCR^{k/2}\sigma_m^{1/4}$	$0,40 \leq e \leq 1,40$
Andersons (1974)	Argile	$(76,74 - 31,28e)OCR^{k/2}\sigma_m^{1/4}$	$? \leq e \leq 1,30$

Note : σ' est exprimée en kPa, ρ en kg/m^3 et N en nombre de coups par pi.

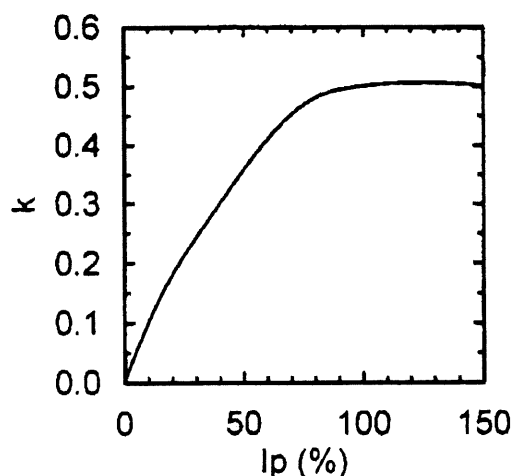


Figure 2. 4 Valeurs de l'exposant k dans les équations du tableau 2.5

2.2.5 Les ondes de surface

Elles sont moins rapides que les ondes de volume mais leur amplitude est généralement plus forte. On peut distinguer :

a) L'onde de Love (figure 2.3):

Le déplacement est essentiellement le même que celui des ondes S sans mouvement vertical. Les ondes de Love provoquent un ébranlement horizontal (figure

2.5) qui est la cause de nombreux dégâts aux fondations des édifices durant les séismes.

Onde L (de Love) (cisaillement)

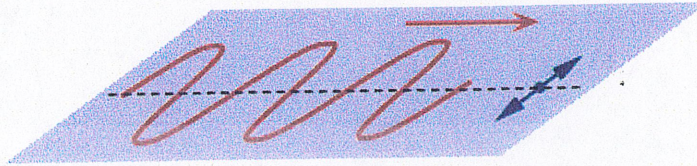


Figure 2. 5 Schématisation de l'onde de Love

L'onde de Love est une onde guidée formée par interférence constructive d'ondes S réfléchies totalement dans une couche de vitesse V_1 surmontant un demi-espace de vitesse $V_2 > V_1$. La réflexion sur la surface libre se fait sans déphasage, celle sur l'interface avec un déphasage χ (incidence dans la couche supérieure). La vitesse de propagation de l'onde de Love est la vitesse apparente horizontale des ondes S dans la couche. Elle dépend de la fréquence (dispersion). Les différents modes propres qui peuvent s'établir verticalement dans la couche (mode fondamental et harmoniques n) correspondent à des incidences différentes des ondes S rebondissant dans la couche, donc à des courbes de dispersion distinctes. Les longueurs d'onde des modes propres incluant un déphasage χ à la réflexion sont réduites d'une longueur correspondant à un angle de $\chi/2$ à l'aller comme au retour (WHITE J.E., 1965).

La vitesse de l'onde de Love peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\operatorname{tg} \frac{H_w \sqrt{1 - p_2 V_{12}}}{V_1} = \frac{\rho_2 V_2 \sqrt{p_2 V_{22} - 1}}{\rho_1 V_1 \sqrt{1 - p_2 V_{12}}} \quad (2.4)$$

Où $\omega = 2\pi f$: pulsation

H = épaisseur de la couche

p = vitesse apparente horizontale de l'onde S (vitesse de propagation de l'onde de Love).

La relation de dispersion est décrite par l'équation (2.5) :

$$\omega(p_n) = \frac{\left(\text{Arctg} \frac{\rho_2 V_2 \sqrt{p_2 V_{22}^2 - 1}}{\rho_1 V_1 \sqrt{1 - p_2 V_{12}^2}} + n\pi \right) V_1}{H \sqrt{1 - p_n^2 V_1^2}} \quad (2.5)$$

La vitesse de groupe des ondes de love est de la forme :

$$V_{gL} = \frac{1}{dk/d\omega} = \frac{1}{p + \omega dk/d\omega} \quad (2.6)$$

Avec $k = (2\pi/\lambda)e$, où e est la direction de propagation

Quelques modes de Love sont représentés sur la figure 2.7, pour le cas suivant (WHITE J.E., 1965) : $V_1 = 2000$ m/s, $V_2 = 2600$ m/s et $H = 100$ m.

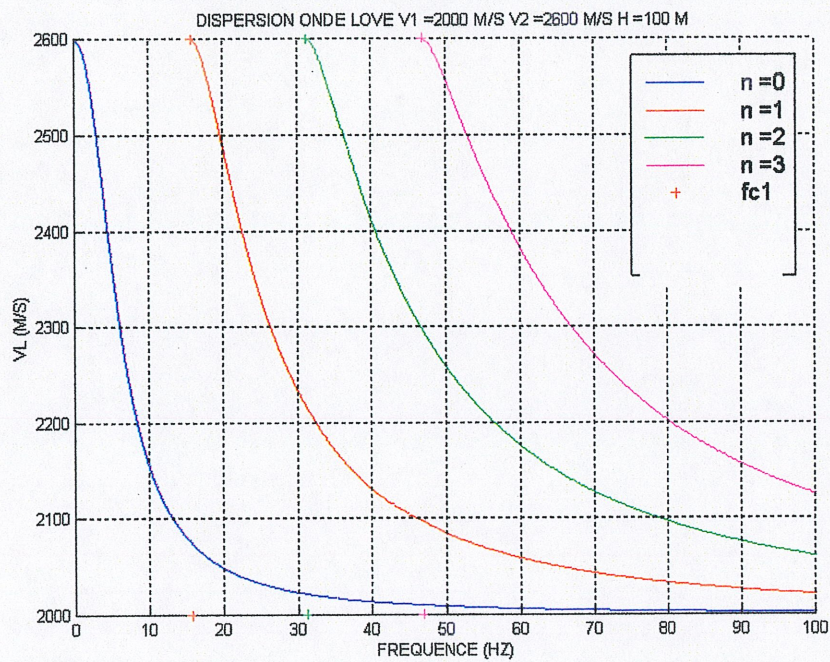


Figure 2. 6 Dispersion de l'onde de Love

$n = 0$ est le mode fondamental et $n = 0, 1$ et 2 sont des modes supérieurs.

b) L'onde de Rayleigh (figure 2.4).:

Le déplacement est complexe, assez semblable à celui d'une particule portée par une vague, un mouvement à la fois horizontal et vertical, elliptique, en fait.

Onde de Rayleigh

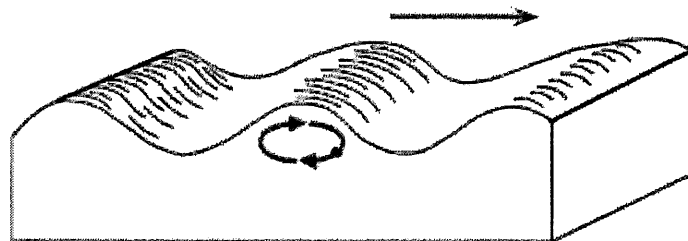


Figure 2. 7 Schématisation de l'onde de Rayleigh

Les ondes de Rayleigh se propagent avec une vitesse (V) légèrement inférieure à celle des ondes de cisaillement (V_s). Cette vitesse varie en fonction du coefficient de Poisson (Figure 2.8) et elle est indépendante de la fréquence dans un milieu homogène élastique et isotrope. Dans ce cas, l'onde est dite non dispersive.

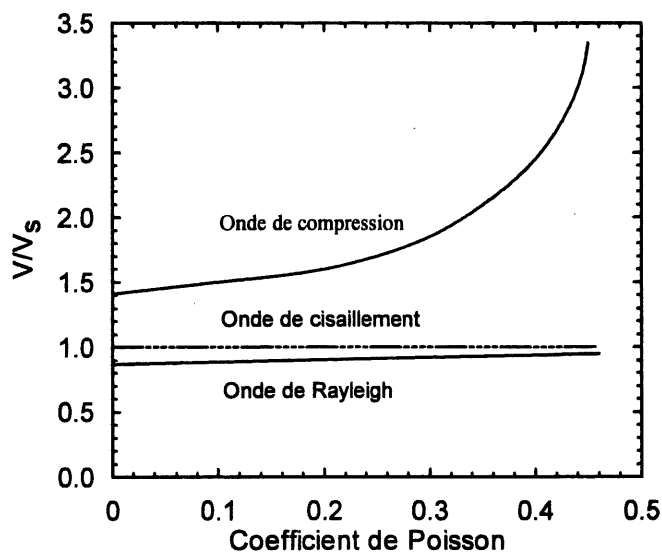


Figure 2. 8 Rapport de vitesse des ondes élastiques en fonction du coefficient de Poisson

Dans un demi espace homogène et isotrope, 67% de l'énergie d'une source vibrant verticalement se propage en une onde de surface dite de Rayleigh, 26% en une onde de cisaillement (S) et 7% en une onde de compression (P)(Miller et Pursey, 1955). A la surface du sol, l'amortissement géométrique de l'onde de surface a un

ordre de grandeur de $\frac{1}{\sqrt{r}}$ et celui des ondes de volume, S et P en $\frac{1}{r^2}$ où r est la distance à la source (Aki et Richards, 1980). Cet aspect énergétique montre que les ondes de surface vont être relativement faciles à générer et à mesurer.

L'amplitude des ondes de surface décroît exponentiellement avec la profondeur (Figure 2.9). Elles sont donc adaptées à l'étude des couches superficielles. D'autre part, la profondeur de pénétration des ondes de surface augmente avec la longueur d'onde λ et ne dépasse pas quelques longueurs d'onde.

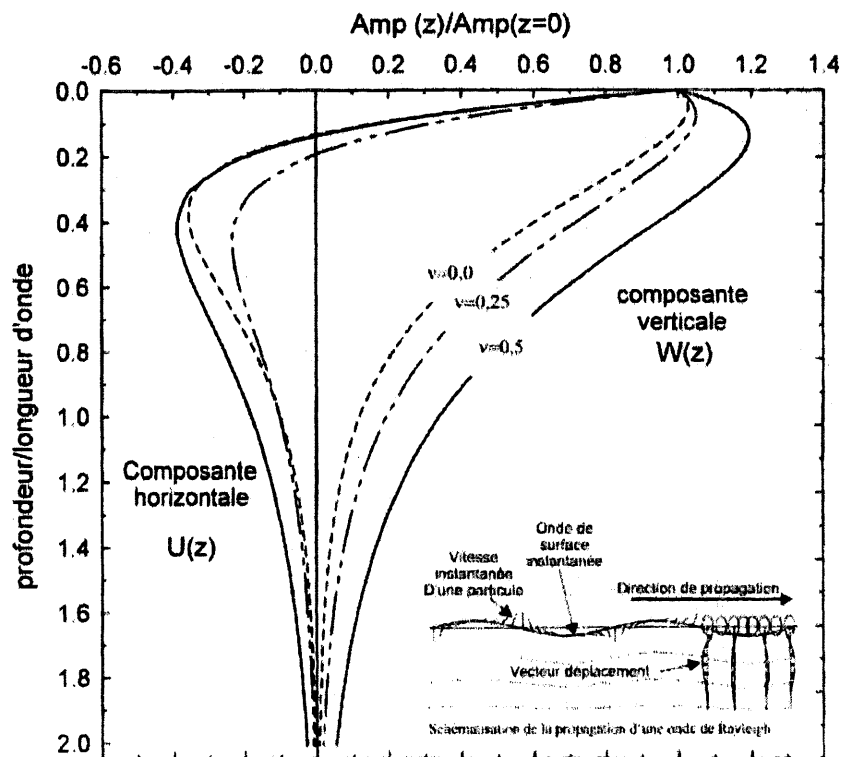


Figure 2. 9 Propriétés des ondes de Rayleigh (Karray, 1999)

Si un milieu est par exemple stratifié, la vitesse de phase V_R (la vitesse de déplacement des surfaces équiphasés) des ondes de surface sera fonction de la fréquence f . C'est ce phénomène, appelé dispersion, qui est mis à profit dans les méthodes de reconnaissance.

Dans un modèle stratifié, la vitesse de phase des ondes de Rayleigh dépend de la vitesse des ondes S et des ondes P, de la densité et de la hauteur de chacune des couches. La vitesse des ondes S, V_s , est le paramètre le plus sensible.

CHAPITRE 3

METHODES DE MESURE DES ONDES DE CISAILLEMENT

3.1 La méthode du *cross-hole*

Cette méthode utilise des tubes de forage bien cimentés au sol à reconnaître. Une source permet de créer des ondes préférentielles à une profondeur connue. Des géophones, installés fermement aux tubes, enregistrent le temps d'arrivée des ondes (S ou P) et permettent de calculer la vitesse de propagation des ondes à un endroit précis. L'opération est recommencée pour chaque profondeur désirée afin d'obtenir un profil des vitesses représentatif du sol en place (figure 3.1). De façon générale, ce sont les ondes de cisaillement qui servent à l'enregistrement (BALLARD (1976), WOODS (1986)).

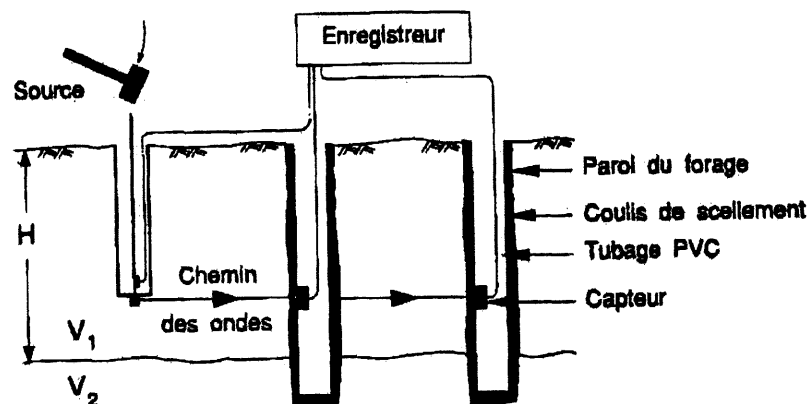


Figure 3. 1 Configuration typique d'un essai *cross-hole*

La méthode du *cross-hole* possède l'avantage d'obtenir un profil des vitesses précis en fonction de la profondeur. Aussi, les sources utilisées permettent un contrôle des ondes sismiques générées, à savoir les ondes de compression ou les ondes de cisaillement, ce qui facilite le choix des géophones.

Le désavantage majeur de l'essai consiste à l'utilisation d'au moins deux forages: deux si la source est munie d'un déclencheur automatique, trois autrement. Le temps et le coût consacrés à ces opérations peuvent représenter un inconvénient majeur. Parfois, ces intrusions dans le site destiné à l'analyse ne sont pas désirées (routes, barrages, etc.). Un autre désavantage vient de l'inclinaison possible des forages: des géophones, placés dans des tubes non parallèles, peuvent mener à des calculs de vitesses erronés. Ceci s'explique soit par une distance en profondeur différente de celle à la surface, soit par une mauvaise orientation des géophones résultant de l'inclinaison. Enfin, un problème de réfraction d'ondes peut survenir entre les différents tubes de forage lorsque les ondes de cisaillement sont utilisées.

En résumé, la méthode du *cross-hole* est efficace pour l'obtention des profils de vitesse dans la plupart des sites. Elle permet un bon contrôle de la profondeur. Elle est bien connue malgré le fait qu'elle nécessite l'utilisation de forages, ce qui demande temps et argent.

3.2 La méthode du *downhole*

Comparativement au *cross-hole*, la méthode du *downhole* ne nécessite qu'un seul forage. Une source, placée en surface, permet une génération préférentielle des ondes (S ou P) dépendant de l'orientation des géophones placés à l'intérieur du tube de forage. La figure 3.2 présente l'essai sismique du *downhole*. L'analyse des données n'est pas directe et nécessite certains calculs avant d'obtenir des résultats valables. AULD (1977) et MOK (1987) expliquent quatre différentes techniques permettant d'arriver à un profil de vitesses en fonction de la profondeur.

La simplicité et la facilité d'utilisation des sources en surface représente le principal avantage de cette méthode par rapport à celle du *cross-hole*. En effet, dans un essai *cross-hole*, la source d'excitation est située dans un tube de forage, elle doit donc être de petite dimension et par conséquent, elle est limitée en énergie pour ne pas briser le forage. Ici, aucune limitation n'est imposée et de grandes énergies peuvent

être induites dans le milieu de façon à créer de fortes impulsions facilement repérables par les géophones.

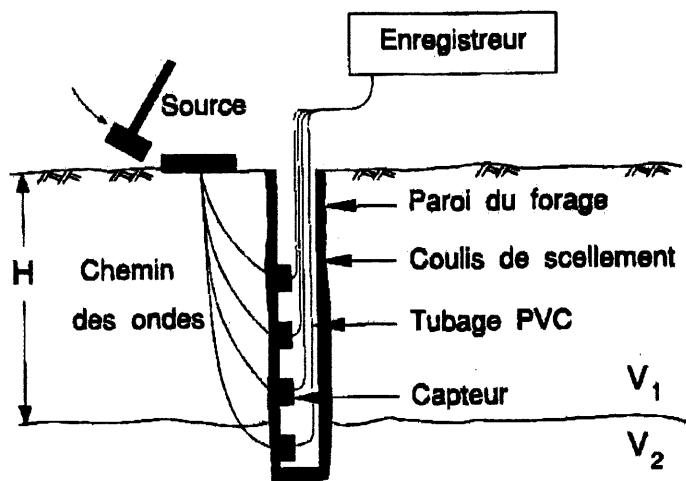


Figure 3. 2 Configuration typique d'un essai avec la méthode du *downhole*.

Les désavantages discutés pour le *cross-hole*, concernant le temps et le coût du forage ainsi que son inclinaison possible, se retrouvent également avec l'utilisation de cette méthode. De plus, l'atténuation des ondes avec la profondeur représente aussi un désavantage car elle empêche parfois la prise de données à de grandes profondeurs. Un problème de réfraction peut être rencontré avec cette méthode. En effet, les ondes de compression sont capables de voyager à l'intérieur du forage et peuvent arriver aux géophones avant celles se propageant à l'intérieur du sol destiné à l'analyse. Les données alors obtenues mènent à une fausse analyse du profil des vitesses. Finalement, les techniques d'analyses des données sont plutôt complexes.

Une autre technique, celle du *uphole*, utilise la même configuration, à l'exception de la source et des géophones: ceux-ci sont inversés, soit la source dans le tube de forage et les géophones en surface. Elle possède les mêmes désavantages que le *downhole* en plus d'avoir une source à l'intérieur du forage. Elle n'est pratiquement pas utilisée en ingénierie (Heisey J. S., 1982).

3.3 La méthode de réfraction

La méthode sismique de réfraction a été la première à être introduite dans le domaine de l'ingénierie. Elle s'adapte bien aux reconnaissances préliminaires et à la détection du roc. La figure 3.3 représente schématiquement un essai de réfraction sismique.

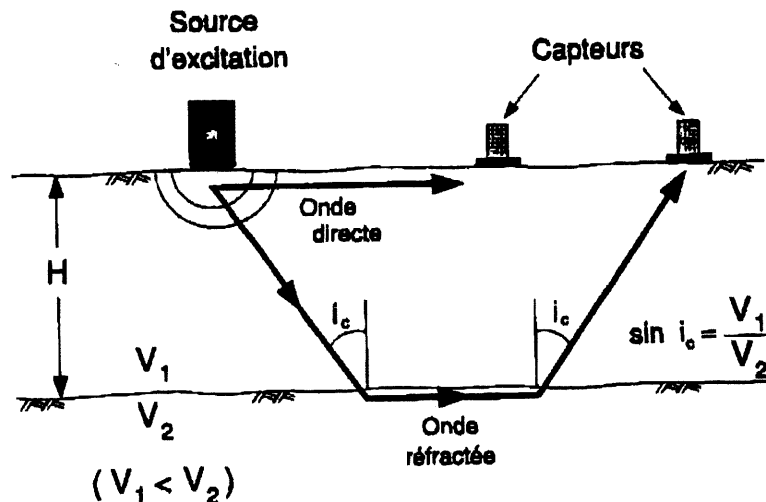


Figure 3. 3 Configuration typique d'un essai avec la méthode de réfraction

Cette méthode se base sur l'enregistrement des ondes de volume, généralement les ondes de compression et rarement les ondes de cisaillement. Pour générer ces ondes, les sources d'excitation les plus utilisées varient entre de grosses masses (faibles profondeurs de reconnaissance) jusqu'aux explosifs (grandes profondeurs).

Elle permet de mesurer la vitesse de propagation des ondes à l'intérieur d'un milieu. Lorsqu'il existe des couches superposées, une des ondes émises lors d'une explosion va rencontrer la première surface de discontinuité sous un angle tel qu'elle va être réfractée horizontalement, en se propageant à la limite supérieure de la couche sous-jacente. En se déplaçant, elle réémet vers la surface de nouvelles ondes réfractées, qui pourront être captées par des sismographes. Connaissant les temps mis par l'onde réfractée et l'onde directe (c'est-à-dire l'onde qui va directement de la source sismique vers le capteur sans être ni réfléchi ni réfractée) pour se propager, on peut

calculer la vitesse de cette propagation dans le premier et le deuxième milieu ainsi que l'épaisseur de la première couche. Pour une autre valeur de l'angle d'incidence, le rayon sismique ne sera pas réfracté horizontalement mais pénétrera dans la deuxième couche et sera réfracté horizontalement lorsqu'il rencontrera une deuxième interface. En suivant le même principe, on peut, de proche en proche, calculer la vitesse de propagation des ondes et l'épaisseur pour de nombreux milieux, la limite étant liée à la puissance de la charge explosive.

Plusieurs avantages ont favorisé l'utilisation de cette méthode en génie civil. La facilité d'exécution de l'essai constitue un de ces avantages. Lors de la prise de données, toutes les mesures sont effectuées en surface et ne nécessitent aucun forage. Aussi, la détection de l'onde enregistrée est simplifiée par le fait que cette méthode se base sur l'arrivée de la première onde à chaque géophone. Enfin, la simplicité de la prise de données et de l'analyse des résultats constitue un autre avantage.

D'un autre côté, la méthode de réfraction présente quelques inconvénients majeurs qui limitent son utilisation. Le plus important de ces désavantages réside dans son incapacité à repérer une couche ayant une vitesse de propagation inférieure de celle de la couche supérieure. De tels profils n'offrent pas, pour les couches molles, d'ondes de réfraction. Il devient donc impossible d'analyser les profils de route, de remblais sur sols mous, de sols gelés, d'argiles avec une couche raide en surface, etc. L'impossibilité de repérer de petites épaisseurs de sol constitue un autre inconvénient. Cette situation est due au fait que les ondes de réfraction de la couche mince arrivent presque en même temps que celle de la couche suivante. Aussi, le fait que l'onde émise se propage au voisinage des interfaces ne permet pas d'obtenir une valeur moyenne de la vitesse pour la couche considérée. Enfin, sachant que l'eau affecte l'onde de compression, tous les sols saturés possèdent une vitesse de compression minimale gouvernée par la vitesse de propagation de l'onde dans l'eau (Allen et coll. 1980).

3.4 Méthode sismique de réflexion

La méthode sismique de réflexion a d'abord été développée pour les explorations pétrolières. Aujourd'hui, elle est employée régulièrement pour la reconnaissance des fonds sous marins (Hunt 1984) et la réalisation des profils de sol. Cette méthode utilise des ondes de volume et de préférence des ondes de compression.

On réalise des profils sismiques qui permettent de mettre en évidence les surfaces de discontinuité (c'est-à-dire l'interface entre deux milieux différents) présentes dans le sous-sol. Cette technique est utilisée lorsqu'on veut obtenir des informations de détail sur une structure donnée, par exemple quand, dans l'industrie pétrolière, on cherche à détecter des pièges à hydrocarbures. Pour établir un tel profil, on place une source sismique (explosif, masse jetée au sol) à la surface du terrain que l'on veut étudier. Lorsque les ondes rencontrent une surface de discontinuité, elles sont réfléchies. Lorsqu'elles reviennent à la surface, elles sont captées par des géophones disposés à intervalles réguliers suivant une ligne (figure 3.4).

L'opération de déclenchement d'une source sismique est répétée en plusieurs endroits de la ligne, puis à l'aide des données recueillies, on reconstitue la géométrie de la surface de discontinuité dans son ensemble.

Les surfaces détectées ne se comportent pas vraiment comme des miroirs, car elles ne réfléchissent pas la totalité des ondes incidentes. Une partie des ondes émises continue son chemin et atteint d'autres discontinuités situées plus en profondeur qui, par le même procédé, peuvent être détectées.

La méthode sismique de réflexion peut également être pratiquée en mer. On utilise alors comme capteurs des hydrophones reliés les uns aux autres par une ligne traînant derrière le bateau. La source sismique est en général un canon à air.

Les avantages de cette méthode sont nombreux. Les essais s'effectuent à partir de la surface et ne nécessitent aucune intrusion dans le sol.

La méthode de réflexion demande une distance entre les géophones plus faible que la méthode sismique de réfraction, réduisant ainsi l'aire nécessaire à la prise de données.

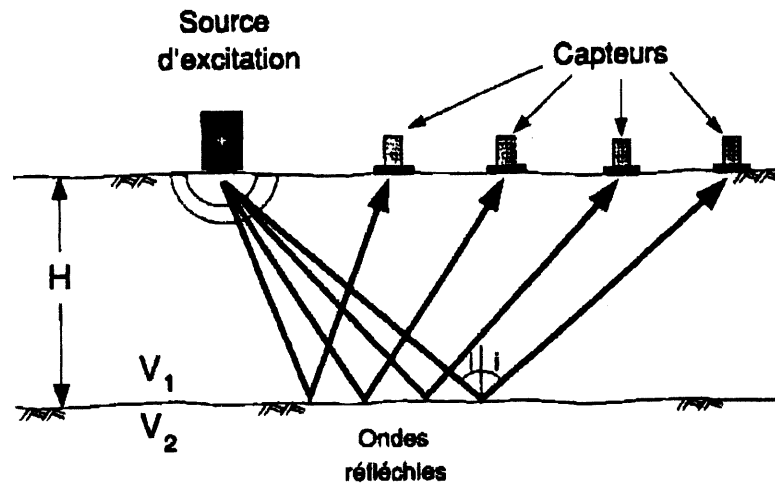


Figure 3. 4 Configuration typique d'un essai avec la méthode de réflexion.

Cette méthode présente aussi quelques désavantages. Souvent basée sur l'onde de compression, elle ne peut évaluer correctement un sol saturé car l'eau impose une vitesse minimale de près de 1500 m/s. Néanmoins, la plus grande difficulté rencontrée avec cette méthode réside dans son mode d'enregistrement; en effet, l'onde de réflexion arrive en deuxième, ce qui signifie que les géophones ont déjà subi une excitation par une première onde, soit l'onde directe. L'arrivée des ondes réfléchies peut donc être masquée par les vibrations antérieures. Cette remarque sera d'autant plus réelle lorsque plusieurs couches renverront des ondes de réflexion. Leur identification peut alors devenir difficile, voire impossible. Aussi l'identification des ondes réfléchies peut être très difficile lorsque le sol ne présente pas de couches très différentes les unes des autres, ce qui est souvent le cas dans la réalité.

3.5 La méthode *Steady-state*

La méthode *Steady-state* consiste à générer, à partir de la surface, une onde de Rayleigh monochromatique à une fréquence continue et à déterminer sa longueur d'onde (figure 3.5). Jones (1958) a utilisé un seul récepteur pour évaluer la longueur d'onde de l'onde de Rayleigh. Le récepteur est déplacé progressivement d'une certaine distance et les positions successives auxquelles les vibrations sont en phase avec celles du générateurs sont déterminées. Alors que Abbiss (1981) a utilisé deux récepteurs pour évaluer la longueur d'onde. Les deux capteurs sont placés à une distance connue sur une même ligne passant par la source. L'opération est effectuée pour plusieurs fréquences afin de déterminer le profil de vitesse de phase qui est utilisée pour déterminer le profil de vitesse des ondes de cisaillement (inversion). Dans la méthode *Steady-state*, l'inversion est effectuée de manière simple. Ainsi la vitesse des ondes de cisaillement est déterminée en multipliant la vitesse de phase par un facteur qui varie entre 1.05 et 1.15 en fonction du coefficient de Poisson, et la profondeur est approximée en multipliant la longueur d'onde par un autre facteur qui varie entre 0.33 et 1 dépendant du type de sol.

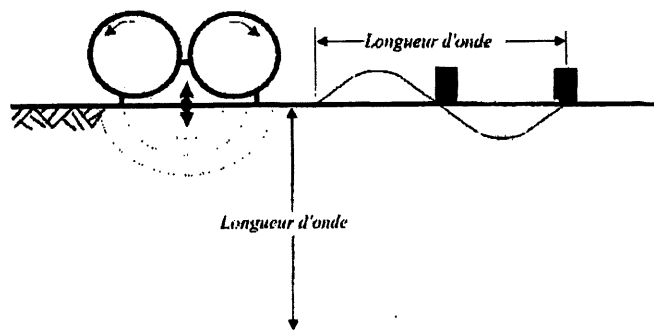


Figure 3. 5 Principe de la méthode *Steady-state*

3.6 La méthode de surface SASW

La méthode SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) a vu le jour aux États-Unis, dans les années 80, pour la reconnaissance des chaussées (Heisey et al., 1982 ; Nazarian S., et Stokoe I.K.H., 1985, 1986). Les progrès technologiques

combinés à des modèles analytiques performants conduisent à l'utilisation de sources impulsionnelles et à l'inversion des courbes de dispersion. A l'heure actuelle, sources entretenues ("Steady state"), sources commandées par ordinateur (Matthews et al., 1996) et sources impulsionnelles sont utilisées.

En pratique, dans la méthode SASW, la courbe de dispersion est obtenue à l'aide d'une source et de deux récepteurs (géophones ou accéléromètres). L'espacement des récepteurs, d , et leur éloignement de la source, L , dépendent des longueurs d'ondes considérées λ (figure 3.6).

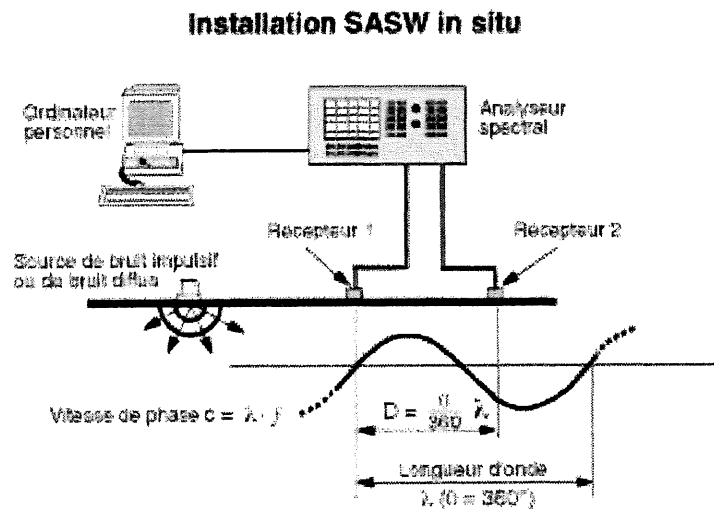


Figure 3. 6 Dispositif de base

Tokimatsu *et al* (1991) recommandent de suivre la règle suivante : $\lambda / 4 \leq L$ et $\lambda / 16 \leq d \leq \lambda$ Si la source est un pot vibrant, le déphasage ϕ entre les deux récepteurs est déterminé pour chaque fréquence successivement. Si la source est impulsionnelle, la phase de l'interspectre des signaux est utilisée. La vitesse de phase de l'onde de Rayleigh est reliée à f par l'expression

$$V_R(f) = 2\pi f d \quad (2. 7)$$

Différentes valeurs de L et d sont couvertes soit en conservant la même position de la source, soit en gardant le point milieu des deux récepteurs, commun à toutes les mesures.

Le principal défaut de ce dispositif expérimental est de négliger l'influence des modes supérieurs. Il est possible d'y remédier en utilisant les algorithmes de traitement du signal classiquement utilisés en physique du globe (Herrmann, 1986).

Le profil de rigidité le mieux ajusté est habituellement trouvé à l'aide de techniques de recherche ou d'optimisation, qui permettent de modifier automatiquement, dans le modèle théorique, l'épaisseur et le module des couches jusqu'à l'obtention d'une courbe de concordance. Les chercheurs de l'IRC* se servent d'une nouvelle technique de recherche appelée « algorithmes génétiques » afin d'optimiser la solution (Hunaidi O., 1998).

Les désavantages associés à cette méthode concernent surtout l'analyse. Les procédures complexes qui mènent aux résultats désirés ont, jusqu'à présent, limité l'utilisation de la méthode SASW. Les récents développements informatiques laissent croire qu'il sera bientôt possible de considérer la méthode SASW comme une méthode géophysique fiable et facile d'utilisation.

À l'université de Sherbrooke plusieurs travaux de recherche ont pu démontrer que la participation des modes supérieures des ondes de surfaces sont la plus grande source d'imprécision de la méthode SASW surtout lorsque les vitesses des ondes des différents modes sont élevées (cas des pavages) ou assez proches. Ainsi des améliorations ont été apportées à la méthode SASW donnant naissance à la méthode SASWp (Karray M. et Lefebvre G., 1997). Cette nouvelle méthode permet d'obtenir avec une grande précision des profil de vitesse des ondes de cisaillement et de déterminer les coefficients de Poisson des différentes couches constituant la structure du pavage. Les profils des modules dynamiques (G et E) sont donc déterminés sans hypothèse.

* Institut de Recherche en Construction du Canada à Ottawa

3.7 Analyse multicanale des ondes de surface

L'analyse multicanale des ondes de surface (MASW: Multichannel Analysis of Surface Waves), (Park et al., 1999) a été développée à la fin des années 90 par le Kansas Geological Survey en réponse aux imperfections de la méthode SASW en présence du bruit. Dans cette méthode, la source est placée à une distance égale à l'espacement entre le premier et le dernier capteur (configuration CMP : *Common-mid-point*). L'espacement entre les capteurs est choisi en fonction de la profondeur d'investigation et la nature du milieu.

L'enregistrement simultané de 12 à 64 récepteurs à 50-100 m de distance d'une source impulsive ou vibratoire donne la redondance statistique aux mesures des vitesses de phase. Les affichages de données multicanaux dans un format temps-fréquence permettent également l'identification et le rejet des modes supérieurs de Rayleigh et les autres types d'ondes de l'analyse. La courbe de dispersion est obtenue par la détermination de la pente de chaque série de signaux obtenue pour une même fréquence.

Millers et al. (2000) ont pu obtenir d'excellents résultats de MASW dans un environnement bruyant d'une raffinerie de pétrole en fonctionnement. En utilisant de grandes et petites sources, ils ont pu saisir des enregistrements dominés par le mode fondamental des ondes de Rayleigh. Ils ont essayé également le profilage à deux dimensions, pour des anomalies transversales dans la vitesse de cisaillement, en inversant beaucoup d'enregistrements le long d'un profil. Un tel profil représente beaucoup d'effort coûteux et nécessaire pour une investigation à haute résolution de réflexion, car une grande source doit être déplacée et lancée à plusieurs reprises à un grand nombre d'emplacements.

3.8 La méthode de réfraction micro-secousses

La méthode de réfraction micro-secousses combine l'utilitaire et la facilité urbaine des techniques d'alignement de micro-secousses avec la simplicité

opérationnelle de la technique SASW, et l'exactitude de la technique de MASW (John N. Louie 2000). En faisant des enregistrements micro-secousses urbain sur un alignement linéaire d'un grand nombre de seismomètres légers, la méthode réalise la collecte de données rapide et facile de zone, sans besoin de source lourde exigée pour le travail de SASW et de MASW. Dans certains cas, le bruit existant sur le site, peut remplacer la source. En maintenant tous les séismogrammes initiaux, et en appliquant une technique d'analyse de vitesse de temps-espace comme dans la méthode MASW, l'analyse peut séparer des ondes de Rayleigh des ondes de volume, et de tout autre bruit. La transformation des résultats de vitesse de temps-espace en domaine de fréquence permet la combinaison d'un grand nombre de séries de signaux sur une longue période de temps, et rapporte l'identification facile des ondes extérieures dispersives (John N. Louie 2000).

Deux facteurs essentiels qui permettent au matériel d'exploration d'enregistrer les ondulations de la surface avec un minimum d'effort sont: 1) l'utilisation d'un capteur simple (géophone) à chaque canal, plutôt qu'un choix d'un groupe de géophones; et 2) l'utilisation d'une disposition linéaire de 12 canaux, ou plus, de géophones. Les géophones simples sont généralement les plus disponibles, et sont typiquement utilisés pour l'étude de réfraction plutôt que de réflexion. Un alignement de groupe de géophones se compose de plusieurs capteurs à câble, produisant un canal simple d'entrée pour l'enregistreur.

Les alignements de groupe de géophones sont utilisés dans les domaines de sismique-réflexion et de l'industrie pétrolière pour annuler des ondes de surface et toute autre énergie de propagation horizontale.

3.9 Méthode d'analyse modale des ondes de surface (MASW)

La méthode MASW (*Modal Analysis of Surface Wave*) est une méthode de reconnaissance non destructive, développée à l'Université de Sherbrooke au cours des dernières années. Cette méthode ne doit pas être confondue avec celle décrite en 3.7. Elle est inspirée de la méthode SASW et se distingue de celle-ci d'abord par le

traitement des signaux obtenus sur le terrain afin d'identifier et de séparer les différents modes des ondes de Rayleigh qui ont contribué aux signaux enregistrés. La configuration de la source et des capteurs sur le terrain ne vise plus alors à minimiser la contribution des modes supérieurs des ondes de Rayleigh. Dans la méthode MASW, les signaux pour définir la courbe de dispersion sont obtenus en une seule étape en disposant 16 capteurs, à un intervalle de distance constant (figure 3.7), sur le terrain. C'est d'ailleurs cette configuration qui permet une approche plus efficace pour l'identification et la séparation des modes. Dans la méthode MASW, les courbes de dispersion sont donc obtenues non seulement pour le mode fondamental mais aussi pour un ou plusieurs modes supérieurs. L'utilisation d'au moins un mode supérieur en plus du mode fondamental lors du processus d'inversion permet d'assurer l'unicité de la solution et de déterminer le profil du module de Poisson en plus du profil de vitesse des ondes de cisaillement. Rappelons enfin que la vitesse de propagation des ondes de cisaillement, V_s , est directement reliée à la compétence mécanique du matériau par :

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (2.8)$$

où G_{\max} est le module de cisaillement maximum ou à petites déformations et ρ est la masse volumique du matériau. La détermination du coefficient de Poisson en plus de V_s constitue une caractérisation complète du matériau d'un point de vue élasticité et permet de passer du module de cisaillement G au module de Young E , mais toujours à petites déformations :

$$E = 2(\nu + 1)G \quad (2.9)$$

L'analyse ne se fait pas via le calcul du déphasage (inter-correlation) entre les différentes positions des capteurs. Pour cela, il est nécessaire que tous les enregistrements soient effectués en même temps au moment de l'impact. À l'université de Sherbrooke des capteurs de marque Bruel&Kjaer d'une fréquence naturelle de 25 kHz sont utilisés pour la caractérisation des structures en béton.

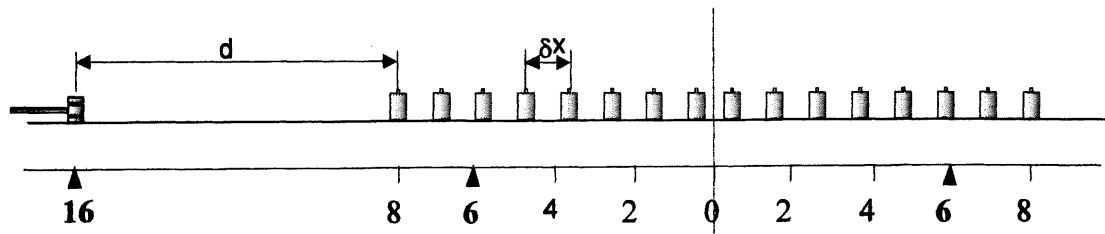


Figure 3. 7 Configuration d'un essai MASW

Dans les paragraphes qui suivent et afin d'éviter toute confusion avec la méthode MASW décrite précédemment en 3.7, le terme MASW désignera l'analyse modale des ondes de Rayleigh.

3.10 La méthode du déflectomètre

C'est une méthode non destructive utilisée sur les chaussées afin de déterminer la rigidité des différentes couches constituant le pavage (Glenn J., 1988).

Deux principales techniques sont utilisées avec cette méthode : le déflectomètre DYNAFLECT et le déflectomètre à masse tombante (*Falling Weight Deflectometer-FWD*). Les deux techniques utilisent des charges dynamiques causant des déflexions au pavage. Ces déflexions sont par la suite mesurées à l'aide de capteurs localisés à des distances présélectionnées par rapport au point d'impact sur le pavage. En effet, en utilisant la théorie élastique linéaire et connaissant les déflexions mesurées, les modules des différentes couches du système de pavage peuvent être calculés (calcul inverse).

Cette méthode de déflexion a été rapidement remplacée par les méthodes sismiques qui permettent une détermination directe de la rigidité des différentes couches de pavage en se basant sur les vitesses des ondes (Glenn J., 1988).

CHAPITRE 4

CARACTERISATION DES CHAUSSEES

4.1 INTRODUCTION

Les premières utilisations des ondes de surfaces, pour déterminer les propriétés des structures et des chaussées, sont rapportées par la société allemande de mécanique des sols (GSSM) avant la deuxième guerre mondiale (DEGEBO, 1938). Le principal intérêt était l'étude de la réponse dynamique des fondations par la méthode *steady-state*. Il s'agit, grâce à une masse vibrante, de créer une onde de surface stationnaire à une fréquence déterminée, ce qui correspond à une longueur d'onde précise. Une masse rotative oscillatoire a été utilisée comme source d'excitation pour une plage de fréquence entre 10 et 60Hz. Le manque de capteurs sensibles, à l'époque, a fait en sorte que de grosses excitations devaient être produites pour générer des signaux adéquats. En conséquence, des comportements non linéaires ont été détectés dans le sol ce qui rendait l'application de la méthode impossible.

Par la suite, plusieurs méthodes se sont développées pour de meilleurs résultats. Mais un problème commun a beaucoup traîné avec la majorité de ces méthodes, c'est le problème des modes des ondes de Rayleigh et donc un problème d'inversion. Dans la littérature, certains font des hypothèses pour ignorer la présence des modes supérieurs, d'autres ne font pas d'inversion, etc.

Ce chapitre présente un bref historique des méthodes de caractérisation sur pavage et des problèmes encourus.

4.2 HISTORIQUE

En 1946, Bergstrom et Linderholm ont fait des essais *steady-state* en Suède. Ils ont utilisé des sols quasi uniformes donnant une faible dispersion des ondes de

surface entre les fréquences variant de 14 à 32Hz. Les valeurs calculées semblaient correspondre avec celles obtenues avec des analyses de plaque effectuées au même site.

Van der Poel (1951) et Nijboer (1955) ont été probablement les premiers à utiliser les ondes de surface dans le but d'évaluer l'épaisseur et le module d'élasticité des chaussées. De nombreux travaux ont été ensuite réalisés avec la méthode *steady-state* pour évaluer sa validité et sa capacité (Jones, 1962). Au début, les résultats des essais sismiques étaient peu concluants en raison de plusieurs phénomènes inexpliqués. Van der Poel (1951) et Nijboer (1955) ont réalisé des essais *steady-state* pour des fréquences variant entre 10 et 60 Hz sur une route en béton bitumineux. Ces derniers ont obtenu plus d'une vitesse à certaines fréquences qu'ils ont associées aux ondes de cisaillement. Jones (1958 et 1960) a rencontré le même phénomène et il l'a associé à une éventuelle participation des modes supérieurs de Rayleigh

4.2.1 Les études de Jones

La plus grande contribution théorique et pratique pour l'application des méthodes des ondes de surfaces à l'étude des pavages, a été apportée par Jones (1958). Il a proposé une procédure analytique pour calculer le module des différentes couches dans un pavage. Un exemple de ses essais est celui réalisé sur une couche de pavage de 23 cm (9 po) d'épaisseur reposant sur une couche qu'il a considéré liquide (figure 4.1). Le graphique 4.1 montre la présence de deux branches dans la courbes de dispersion : une branche supérieure (appelée mode de flexion) et une branche inférieure.

En 1962, Jones a développé la théorie d'analyse de la relation entre la vitesse et la longueur d'onde pour un pavage à une et à deux couches. L'exemple typique de ses résultats, théoriques et expérimentaux, pour une section de pavage à deux couches est présenté dans la figure 4.2.

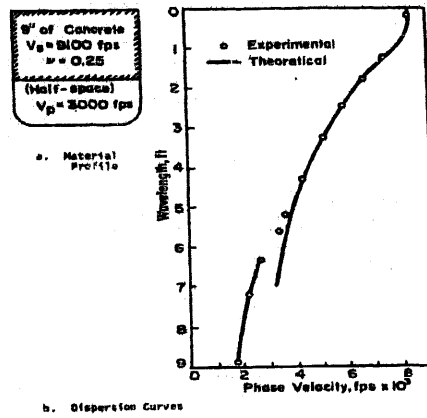


Figure 4. 1 Comparaison des courbes de dispersion théorique et expérimentale (Jones 1958)

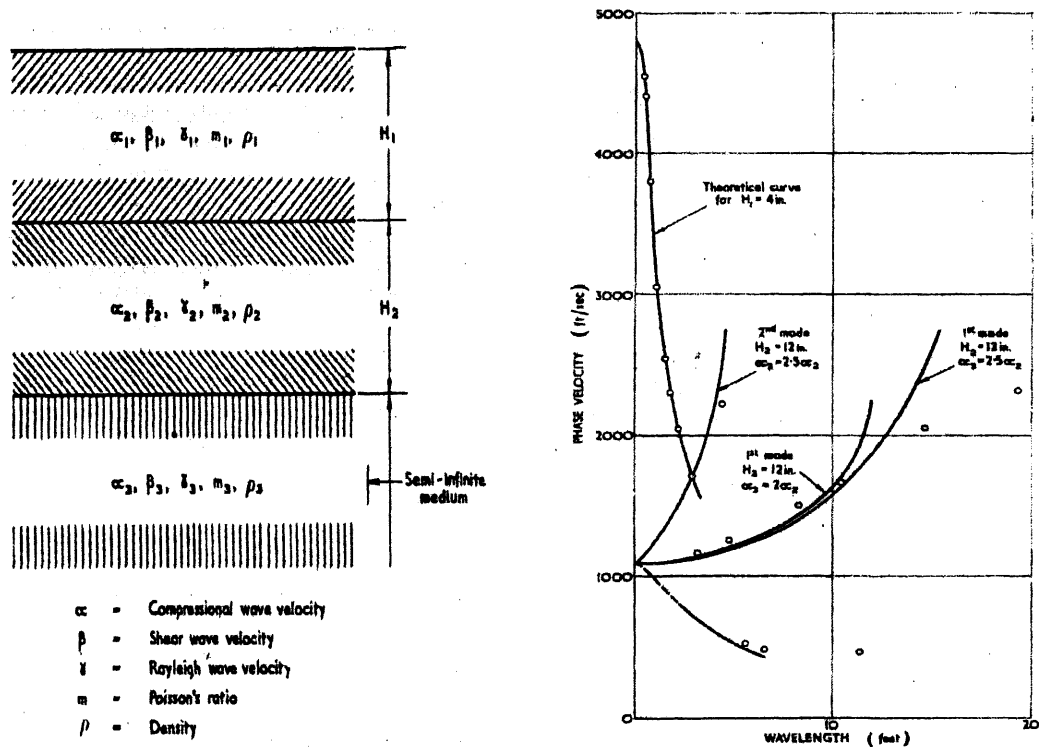


Figure 4. 2 Résultats depuis une section expérimentale d'une chaussée ayant une couche d'asphalte supérieure.

L'analyse de la figure 4.2 montre un comportement branchant dans la courbe de dispersion : une branche supérieure, une branche intermédiaire et une branche inférieure.

La branche supérieure correspond au mode de flexion qui permet la caractérisation de la couche du pavage en terme de vitesse de phase. Elle se situe dans la plage des hautes fréquences (faibles longueurs d'onde).

La branche intermédiaire est une modification du mode principal de la propagation des ondes de compression dans une couche liquide (α_2) au dessus d'un substratum liquide (α_3). Cette même branche intermédiaire est formée d'un mode principal et de modes supérieurs ayant des longueurs d'ondes plus faibles que le premier (mode principal) pour une même vitesse de phase (Figure 4.2). Les branches intermédiaires ne paraissent pas lorsque la couche intermédiaire présente un module d'élasticité légèrement inférieur de celui de la couche supérieure et très supérieur de celui de la couche inférieure.

La branche inférieure correspond essentiellement aux basses fréquences. À faibles longueurs d'onde, cette partie de la courbe est influencée par les ondes de compression ce qui donne des vitesses de phase différentes de celles des ondes de Rayleigh. Par contre, pour les grandes longueurs d'ondes, l'effet des ondes de compression diminue de façon importante et les vitesses trouvées se rapprochent des vitesses des ondes de Rayleigh. C'est pourquoi, elle permet en quelques sortes la caractérisation des couches plus profondes. Pour plus de détails se référer à Jones (1958).

4.2.2 Les études de Henklom et Klomp

En 1962, Henkelom et Klomp ont utilisé des vibreurs *Steady-state* pour améliorer la méthode des ondes de surface sur les pavages. Des vibreurs mécaniques et électrodynamiques ont permis de générer des ondes de basses fréquences (4 à 60Hz) et des ondes de haute fréquence ($> 60\text{Hz}$). L'effet de drainage des couches sous-jacentes, après inondation, a aussi été traité. Trois profils de vitesse des ondes de cisaillement sont présentés dans la figure 4.3.

Les matériaux constituant le sol du site utilisé n'était pas décrits, mais le profil des couches est présenté dans la figure 4.3. L'axe des x représente la vitesse de phase déterminée à chaque fréquence et l'axe des y représente la mi-longueur d'onde (profondeur) pour chaque fréquence. Les auteurs ont donc considéré une profondeur effective d'investigation égale à la moitié de la longueur d'onde et une vitesse des ondes de cisaillement égale à la vitesse de phase en chaque fréquence. La courbe I dans la figure est le profil V_s à partir des essais réalisés lorsque la couche de base est inondée à mi-hauteur. Les courbes II et III représentent respectivement des essais après inondation totale et après formation d'une couche d'usure. En effet, lors des saisons pluvieuses le site est inondé le sol près de la surface devient moins dur (profil II). À partir de la troisième courbe, il convient que lorsque la teneur en eau diminue la rigidité augmente. Malheureusement, ils ne pouvaient pas exciter plus fort pour atteindre les couches plus en dessous du pavage.

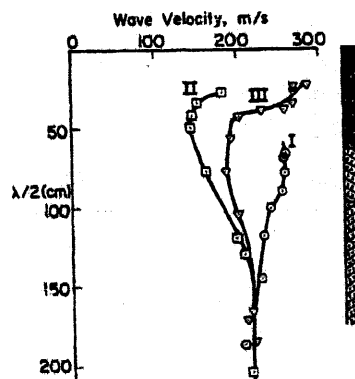


Figure 4. 3 Vitesse des ondes en fonction de la profondeur approximative (Henkelom et Klomp, 1962)

4.2.3 Les études de la WES et autres

La *U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station (WES)* a aussi utilisé les vibrations *Steady-state* pour déterminer les propriétés des sols in situ. Ballard (1964), Fry (1965), Maxwell et Fry (1967), Cunny et Fry (1973) et Ballard et Chang (1973) et plusieurs autres ont étudié divers sites utilisant cette méthode des ondes de surface. La procédure de la WES pour obtenir le profil de vitesse des ondes

de cisaillement à partir des vitesses de phase et des longueurs d'onde, était identique à celle de Henkelom et Klomp (1962).

Cunny et Fry (1973) ont comparé le module élastique obtenu par la méthode des ondes de surface avec le module obtenu à partir d'une série d'essais de compression sur des colonnes de 14 sites différents. Cunny et Fry ont conclu que les modules déterminés en laboratoire sont généralement à $\pm 50\%$ des modules in situ. Woods et Richart (1967) ont réalisé une série d'essais d'ondes de surfaces dans un programme de tests pour l'étude de l'effet des tranchés sur les ondes de surface. Ils ont procédé de la manière de la WES.

4.2.4 Les études post-SASW

Avec le développement de la méthode SASW (Nazarian et Stokoe, 1985), de nombreux chercheurs ont ignoré l'effet des modes supérieurs de Rayleigh. En partant de cette hypothèse, plusieurs études ont été réalisées sur des pavages avec la méthode SASW.

Neilson et Bairs (1975 et 1977), du *New Mexico Engineering Research Institute* ont construit un système opérateur de terrain afin de collecter les données SASW convenablement. Il s'agit d'un système d'acquisition avec un système de contrôle de l'impact et 8 accéléromètres. Une correction empirique était nécessaire pour obtenir les modules des différentes couches.

Nazarian et coll. (1985) avaient proposé un arrangement de la source et des capteurs ainsi que des règles de calculs standard qui à leur avis permettent de supposer que « *les vitesses des ondes de Rayleigh obtenues après l'analyse des données sont représentatives du mode fondamental de Rayleigh* ».

Williams (1981), a utilisé la méthode SASW avec un vibreur connecté à un générateur de bruit, à large bande de fréquence, et un marteau comme sources d'excitations. Son seul intérêt était limité à la construction d'une courbe de dispersion expérimentale. Il n'a jamais présenté un profil de vitesse des ondes de cisaillement.

Heisey (1981), donnait des coups de marteau pour générer des signaux transitoires nécessaires pour la détermination de la courbe de dispersion avec la méthode SASW. Il a utilisé des analyseurs spectraux qui ont accéléré le processus d'échantillonnage. En se basant sur des essais réalisés sur plusieurs sites de pavages, Heisey a suggéré une profondeur d'échantillonnage effective égale au 1/3 de la longueur d'onde pour chaque fréquence. Il a aussi divisé les vitesses des ondes de surface mesurées par un facteur approximatif de 0.9 afin d'obtenir la vitesse des ondes de cisaillement.

Jusque là, dans toutes les études, à l'exception de Jones (1958) et Baker et Stevens (1983), les caractéristiques dispersives des ondes de surface étaient négligées et le profil des ondes de cisaillement, lorsqu'il est déterminé, était approximatif.

4.2.5 Adaptation de la méthode SASW aux chaussées et problèmes

Au début des années 80, plusieurs chercheurs ont travaillé sur le développement et l'application de la méthode SASW sur plusieurs sites de pavages (Nazarian et Stokoe, 1982, 1983, 1984a, 1984b, et 1984c ; Nazarian et al, 1983, 1984 ; Stokoe et Nazarian, 1983a, 1983b, 1984a, 1984b, 1984c). Ces études ont été divisées en deux grands groupes, des sites de pavages flexibles et des sites de pavages rigides. Les résultats ont été par la suite comparés avec d'autres essais indépendants.

Une étude SASW a été menée par Stokoe et Nazarian (1983), sur 5 sites de pavage flexible, à *McDill Air Force Base* (AFB) en Floride. Les courbes de dispersion et d'inversion sont présentées dans la figure 4.4.

Une deuxième étude a été menée par Nazarian (1984), sur des pavages rigides avec un grand contraste de rigidité, près de Columbus au Texas. L'épaisseur de la couche du pavage est supérieure à 15 cm. Les courbes de dispersion et d'inversion sont présentées dans la figure 4.5.

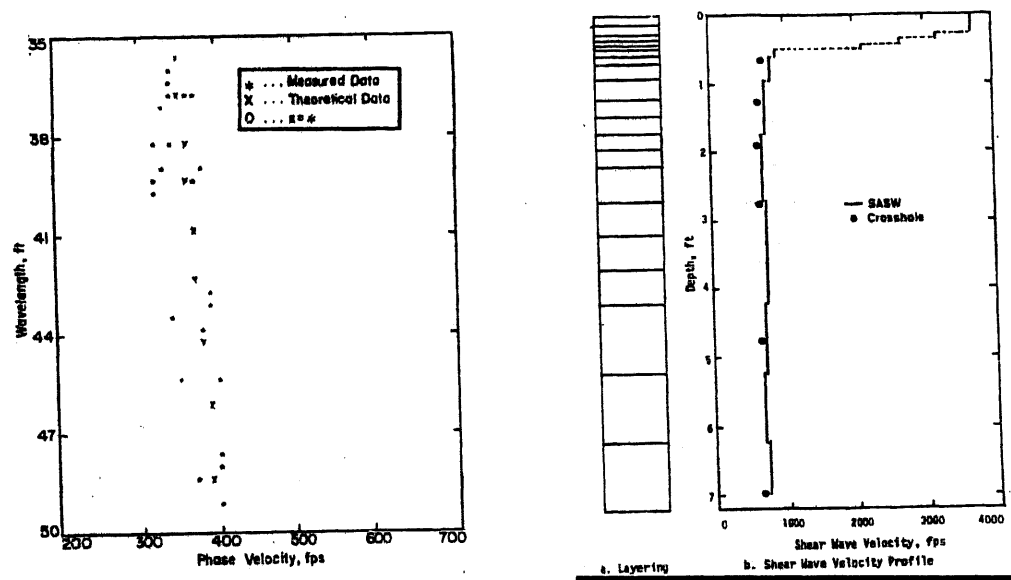


Figure 4. 4 L'interprétation des données issues des études, de Nazarian et Stokoe. a) Courbe de dispersion b) Courbe d'inversion (Stokoe et Nazarian, 1983)

Gucunski et Woods (1992), Tokimatsu et coll. (1992) ont montré, à l'aide de simulation numériques, que le problème de participation des modes supérieurs des ondes de Rayleigh n'est pas très important lorsque le milieu ne présente pas de zones de contraste de vitesse (cas des pavages). De ce fait, d'autres études ultérieures traitant le cas des chaussées sont développées.

En 1992, Al-Hunaidi a démontré, au moyen de simulations, que le calcul du spectre de phase ne se fait pas nécessairement sans problème et que la procédure présentement en usage pour le calcul du spectre de puissance croisé peut produire des erreurs considérables. La détermination du déphasage se fait en admettant que les ondes mesurées à deux points différents, à une fréquence donnée, sont de même nature et appartiennent presque exclusivement au mode fondamental de Rayleigh. Alors que, il peut arriver qu'un autre type d'onde (réfléchi, de volume ou appartenant à un mode supérieur) soit mesuré, à certaines fréquences, par un ou par les deux capteurs.

Al-Hunaidi (1993) a aussi constaté que lorsque le site présente des variations importantes des propriétés élastiques de ses couches (cas des chaussées), de faux

angles de 360° peuvent être introduits dans le spectre de puissance croisé et que le déroulement de celui-ci de la manière usuelle conduit à des erreurs importantes.

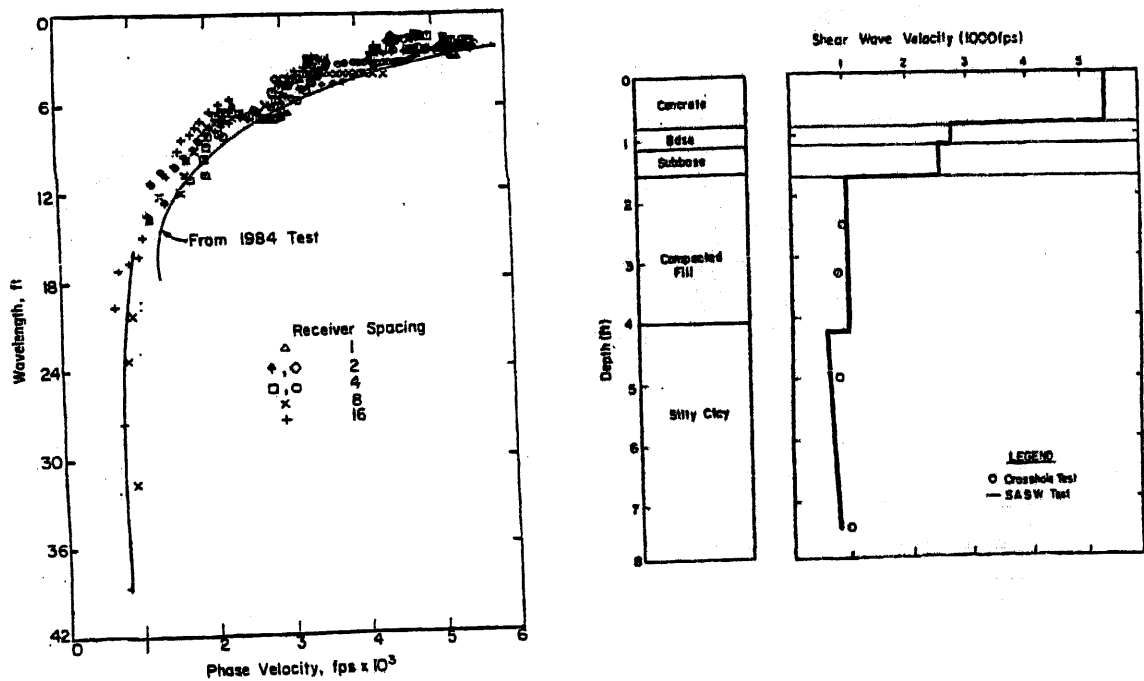


Figure 4.5 Les courbes de dispersion (a) et inversion (b)
(Nazarian 1984)

Vers la fin des années 90 des études réalisées à l'université de Sherbrooke, (Karray 1997), ont démontré la possibilité de séparer les différents modes des ondes de Rayleigh. En première étape, une nouvelle méthode, pour les pavages, basée sur cette séparation de modes et découlant de la méthode SASW, est développée : il s'agit de la méthode SASWp (Voir Karray 1997 pour plus de détail sur la méthode). Ensuite, et dans le cadre d'un projet de doctorat à l'université de Sherbrooke, une autre méthode a été développée, c'est la méthode MASW (*modal analysis of surface waves*). Cette dernière est plus sophistiquée dans le sens qu'elle permet d'identifier et de séparer les différents modes des ondes de Rayleigh, ce qui rend le problème d'inversion plus simple et la solution devient unique.

4.3 SYNTHÈSE

L'auscultation non-destructive (NDT), c'est-à-dire sans carottage ni forage, des structures à l'aide d'ondes de surface continue de motiver de nombreux thèmes de recherche dans des domaines variés. Dans le cadre du génie civil, l'utilisation des ondes de Rayleigh pour la reconnaissance non destructive des chaussées connaît un nombre d'utilisateurs croissant.

Il reste néanmoins des problèmes spécifiques où la qualité de l'information obtenue et/ou la manière de l'interpréter ne suffisent pas à extraire, d'une façon précise, tous les paramètres du milieu ausculté.

En effet, comme le montrent les chapitres précédents, plusieurs méthodes qui ont été développées et utilisées, n'aboutissent pas à une solution unique et précise. En effet, plusieurs problèmes ont été rencontrés quant à l'application et la fiabilité des ondes de surface comme moyen de reconnaissance pour les pavages (modes branchants, participation des modes supérieures, énergie d'impact...). Cependant, plusieurs études et solutions ont été proposées (Jones, Nazarian, Al-Hunaidi..., voir paragraphes précédents). Sauf que ces solutions étaient ou bien insuffisantes (n'aboutissent pas à l'inversion donc ne donnent pas de profils des vitesses des ondes de cisaillement en fonction de la profondeur qui est en réalité la solution finale recherchée) (paragraphe 4.2) ou bien sont peu précises au niveau de la dispersion, ce qui rend le processus d'inversion difficile et génère un profil de vitesse pouvant souvent être peu représentatif de la réalité.

Cette imprécision, peut être due à deux facteurs importants :

- 1- la participation des modes supérieurs des ondes de Rayleigh tel que précisé dans ce même chapitre.
- 2- La difficulté d'exciter le sol sous la couche de pavage (manque d'énergie en profondeur,...).

CHAPITRE 5

POSITION DU PROBLEME ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

5.1 GÉNÉRALITÉS – POSITION DU PROBLÈME

Le vieillissement du parc des ouvrages d'art et le souci d'optimiser les coûts de maintenance tout en maintenant un haut niveau de sécurité font de l'auscultation Non Destructive des ouvrages d'art un domaine de recherche d'actualité. Les ondes de surface peuvent être avantageusement utilisées pour leur auscultation.

Présentement, l'un des soucis du Ministère de transport du Québec est la formation de cavités au dessous des pavages, causées par une infiltration de sol dans de vieux ponceaux, pouvant engendrer des effondrements de chaussées. Il serait donc intéressant si, moyennant un contrôle non destructif, ces cavités pouvaient être détectées avant les dégâts.

En se basant sur les méthodes non destructives, développées jusqu'ici, pour investiguer les structures de chaussées, la méthode MASW apparaît prometteuse. D'abord parce qu'elle est capable d'identifier et de séparer, avec une très bonne précision, les différents mode des ondes de Rayleigh qui ont contribué aux signaux enregistrés à la phase de dispersion; ensuite du fait que la configuration de la source et des capteurs ne vise pas à minimiser la contribution des modes supérieurs des ondes de Rayleigh et peut donc être adoptée; et finalement grâce à sa rapidité en disposant seize capteurs sur le terrain. C'est d'ailleurs cette configuration qui permet une approche plus efficace pour l'identification et la séparation des modes. Dans la méthode MASW, les courbes de dispersion sont obtenues non seulement pour le mode fondamental mais aussi pour un ou plusieurs modes supérieurs. L'utilisation d'au moins un mode supérieur en plus du mode fondamental lors du processus d'inversion permet d'assurer l'unicité de la solution et de déterminer le profil du module de

poisson en plus du profil de vitesse des ondes de cisaillement. La méthode MASW permet également de déterminer le profil de vitesse des ondes de cisaillement en utilisant un espacement moindre (par rapport à la méthode SASW) entre le premier et le dernier capteur. Cette configuration permet aussi de réaliser une tomographie interne de vitesse ou module à partir de la surface du pavage en réalisant deux ou plusieurs essais MASW successifs en gardant la source au même endroit. La combinaison des seize signaux des différents essais permet ainsi de déterminer des profils de vitesse à différents emplacements par rapport à la source. Les valeurs de ces profils peuvent ensuite être présentées sous forme de tomographie.

Étant donné que la couche de pavage est très rigide par rapport aux autres couches de la fondation, elle peut gêner la transmission de l'énergie du signal aux couches inférieures lorsque l'excitation se fait sur le pavage lui-même (SASW), comme elle peut modifier le comportement des ondes la traversant. Afin de vérifier ce point, une simulation numérique MASW a été réalisée en excitant directement sur la couche de pavage. Le profil considéré était formé d'une couche de pavage d'une vitesse de 1200 m/s et d'épaisseur de 10 cm en dessus d'une couche homogène de vitesse de 160 m/s. La courbe de dispersion ainsi obtenue est montrée dans la figure 5.1.

Sur la figure 5.1, on voit apparaître essentiellement deux branches différentes : un mode de flexion (ou branche supérieure) et une branche inférieure. La branche supérieure correspond à la zone des hautes fréquences (faibles longueurs d'onde) permettant la caractérisation de la couche rigide supérieure (pavage). À la longueur d'onde près de zéro mètre (figure 5.1), cette branche donne une approximation de la vitesse du pavage (1200 m/s).

En examinant la branche inférieure, et à des grandes longueurs d'onde (>2 m), les vitesses de phase se rapprochent asymptotiquement des vitesses correspondant à la couche uniforme considérée dans la simulation (160 m/s). Alors qu'à faible longueurs d'onde (< 2 m), les vitesses sont très loin de 160 m/s. Ceci est possiblement dû à la participation des ondes de compression à la surface. À une longueur d'onde se

rapprochant du zéro, la vitesse indiquée est environ deux fois la vitesse de la couche de dessous, soit environ 320 m/s (figure 5.1).

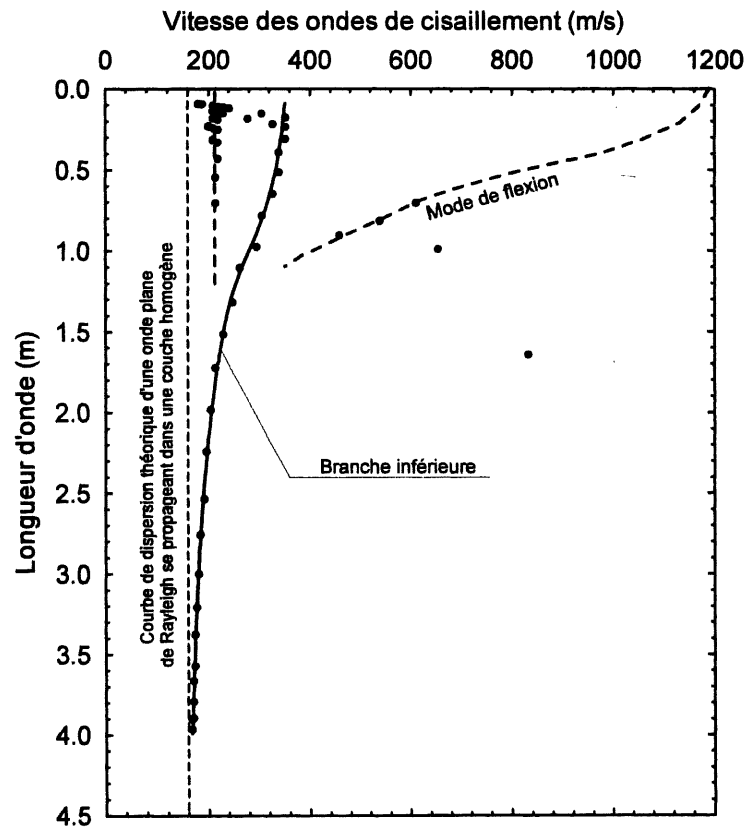


Figure 5. 1 Courbe de dispersion de la simulation MASW avec excitation au dessus du pavage.

En conclusion, et en se basant essentiellement sur la figure 5.1, l'excitation au dessus du pavage (couche très rigide par rapport aux couches de dessous), produit des courbes de dispersion influencées par plusieurs types d'onde (de surface et de volume). Ceci pose un problème quant au processus d'inversion : quel profil choisir?

Y aurait-il donc une autre alternative pour des investigations fiables et plus profondes en appliquant la méthode MASW sur les chaussées? Ne serait-il pas intéressant de placer la source d'excitation à l'extérieur de la couche de pavage?

Le travail consistera donc, à étudier à quel point la méthode MASW pourra être adaptée à la reconnaissance des structures de chaussées en plaçant la source à coté du pavage, et si cela est possible peut-on procéder comme pour l'auscultation des

couches des sols? La précision permettrait-elle de distinguer des particularités (cavités, couche rigide...), dans la courbe de dispersion et par conséquence sur le profil de vitesse?

Pour cela, dans les chapitres qui suivent, une étude numérique, a été réalisée et qui sera appuyée par la suite par une série de relevés de terrains.

Dans ce chapitre, il serait intéressant de passer en revue le cheminement typique d'un essai MASW à l'université de Sherbrooke ainsi qu'une description du matériel utilisé.

5.2 SOURCES ET MATÉRIEL UTILISÉ

La figure 5.2 représente l'équipement nécessaire à la réalisation d'un essai MASW. À l'université de Sherbrooke, la source utilisée pour les chaussées, est une masse de 5,5 kg frappée sur une plaque métallique posée sur la surface du sol à une certaine distance du pavage. Pour des investigations de grandes profondeurs, des sources plus puissantes doivent être utilisées.

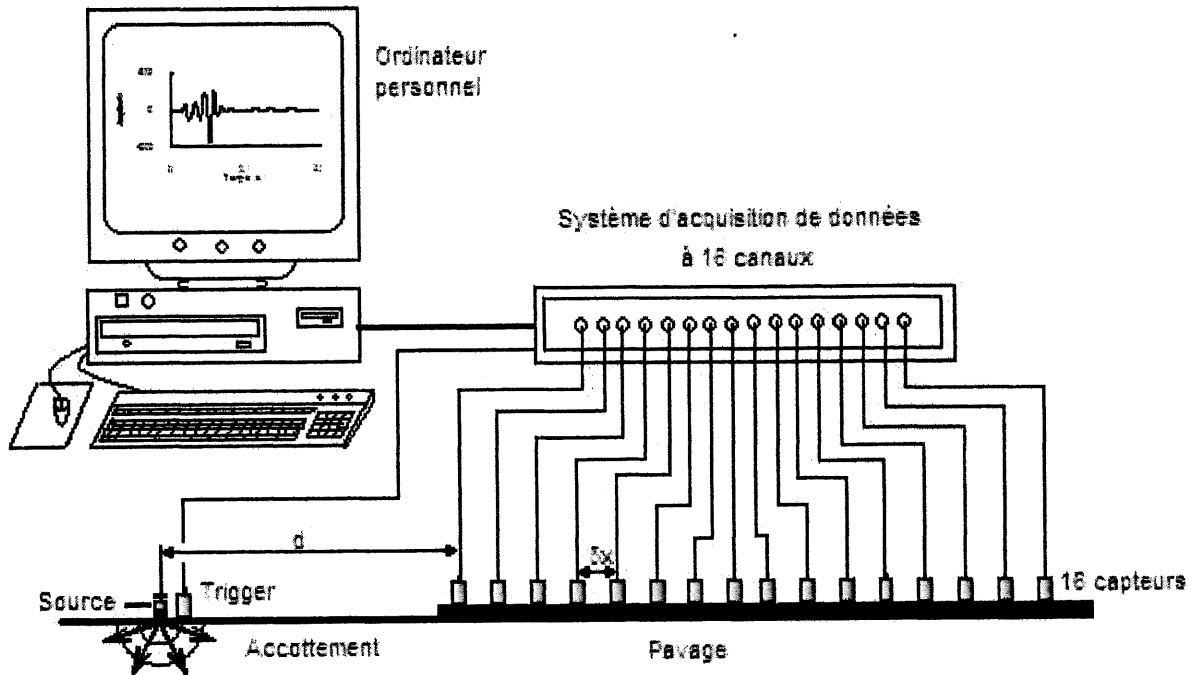
L'enregistrement des signaux s'effectue grâce à un système d'acquisition branché à un ordinateur de bureau. Ce système est composé d'une carte ADC-64, un trigger externe et 16 capteurs.

5.3 CHEMINEMENT TYPIQUE D'UN ESSAI MASW

La méthode MASW est constituée de trois étapes : (1) prise des données sur le terrain, (2) évaluation de la courbe de dispersion et (3) détermination du profil de vitesse des ondes de cisaillement par le processus d'inversion.

5.3.1 Prise de données

Afin d'avoir des signaux représentatifs, il faut éviter d'avoir des discontinuités (fissures, bosses ou autres) entre les capteurs susceptibles d'influencer les ondes de surface. Aussi, la grande sensibilité des instruments demande que les essais soient



quand à eux, se placent sur la ligne droite à un intervalle de distance constant. De façon générale, les petites distances entre les capteurs représentent bien les couches de surface alors que les grandes distances sont plus représentatives des couches en profondeur. Le trigger permet l'enregistrement de tous les signaux en même temps au moment de l'impact.

La figure 5.3 illustre un enregistrement typique lorsqu'une masse frappe le sol à 2.6 m de la bordure du pavage.

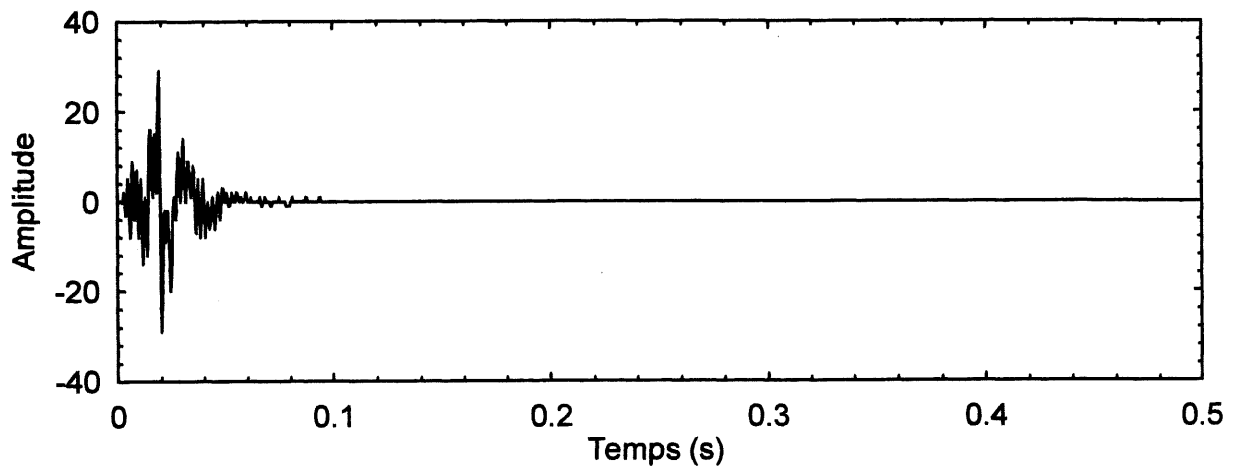


Figure 5. 3 Enregistrement typique d'un capteur lors d'un essai MASW (distance : source - premier capteur = 2.8 m; capteur - capteur = 0.2 m)

5.3.2 Traitement et analyse des données

Sur le terrain, plusieurs séries d'essais sont faites sur une même ligne et chaque essai doit être fait plusieurs fois (généralement trois) afin de s'assurer de leur constance. Lors de l'analyse, la première étape est de vérifier que tous les signaux mesurés pour un même essai (même disposition des capteurs et source) sont quasi-identiques. La figure 5.4 montre 3 signaux d'une même série mesurés pendant des essais effectués à Sherbrooke.

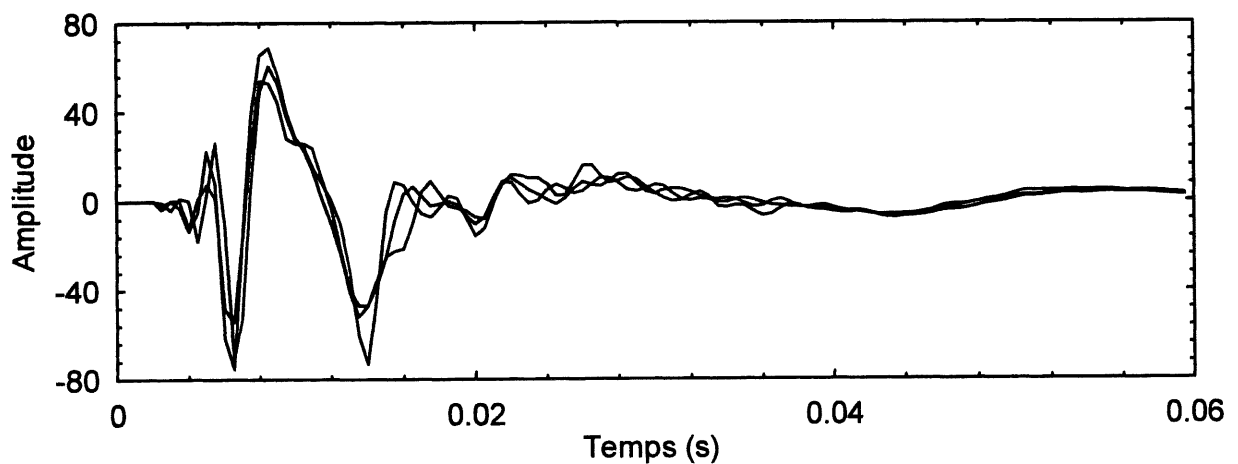


Figure 5. 4 Trois signaux d'une même série MASW (distance : source - premier capteur = 2.8 m; capteur - capteur = 0.2 m)

L'étape suivante consiste à déterminer un spectre d'énergie par la transformation des signaux dans les deux domaines, fréquentiel et des nombres d'onde. Pour plus de détails sur cette étape ainsi que sur la détermination des calculs des courbes de dispersion pour les différents modes se référer à la thèse de Karray 1999.

La détermination des courbes de dispersion est faite à l'aide d'un programme Windows appelé « *MASW dispersion* » développé à l'université de Sherbrooke.

5.3.3 Inversion - profil de vitesse

L'étape finale d'un essai avec la méthode MASW consiste à trouver le profil de vitesses des ondes de cisaillement en fonction de la profondeur pour le site analysé. La formulation du problème d'inversion pour les pavages (vitesse diminue avec la profondeur) est différente de celle des modèles géologiques (vitesse augmente avec la profondeur). Des formules appropriées doivent donc être utilisées pour effectuer cette étape.

L'inversion des ondes de Rayleigh est d'abord effectuée à l'aide du mode fondamental seulement. Mais puisqu'on connaît quelques modes supérieurs de Rayleigh, il est intéressant de confirmer le résultat à l'aide de calcul des modes théoriques. En fait, cette vérification peut s'avérer importante puisque la solution relative à un seul mode de Rayleigh n'est pas unique. Ceci constitue l'un des avantages de la méthode MASW.

Le principe de l'inversion est simple. D'abord, il faut faire une représentation théorique d'un profil de sol avec plusieurs couches homogènes. Ensuite, et de façon arbitraire, une vitesse d'onde de cisaillement et une épaisseur sont assignées aux différentes couches. Ces valeurs sont par la suite utilisées dans un algorithme de calcul afin d'obtenir une courbe de dispersion théorique du profil supposé. Une comparaison de cette courbe théorique avec celle de terrain doit être effectuée. Tant que la correspondance entre la courbe expérimentale et théorique n'est pas satisfaisante, un

nouveau profil théorique devra être supposé et ensuite comparé aux résultats expérimentaux. Après plusieurs itérations, la superposition des courbes indique que le choix du profil théorique est représentatif du sol investigué. Le processus de l'inversion est fait à l'aide d'un programme sous DOS appelé « *INVER* » développé à l'université de Sherbrooke.

CHAPITRE 6

CARACTERISATION DES STRUCTURES DE CHAUSSEES - SIMULATIONS

6.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, une étude numérique (simulation), sera développée ayant pour buts :

- de vérifier l'applicabilité de la méthode MASW et son adaptation à la nouvelle configuration de l'excitation à côté du pavage au lieu du dessus,
- de voir l'effet de la couche du pavage sur la propagation et le comportement des ondes de cisaillements par rapport à un profil sans pavage,
- et d'examiner l'effet des différents paramètres reliés aux pavages (épaisseur de la couche du pavage, la vitesse des ondes de cisaillement du pavage...) sur les résultats.

6.2 MODÉLISATION

La détermination de la réponse d'une structure à une force d'impact en surface nécessite la résolution des équations de mouvement. En général, la résolution de ces équations ne peut être réalisée que de façon numérique. Le programme FLAC (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*) est utilisé dans cette étude pour résoudre ce problème. FLAC a été développé par ITASCA Consulting Group Inc. et il est décrit comme un programme de "différences finies" qui utilise l'analyse Lagrangienne.

En admettant qu'il n'existe pas de variabilité latérale des matériaux composant le milieu examiné, la propagation des ondes générées par une source d'impact peut être décrite comme un problème axisymétrique avec une source d'énergie à l'origine. Au cours d'essais basés sur la propagation des ondes de Rayleigh, les déformations impliquées sont inférieures à 10^{-3} . Ainsi, les matériaux composant le milieu peuvent être considérés comme élastiques.

La simulation d'un essai MASW par la méthode de "différence finie" nécessite la considération des aspects suivants : (1) forces externes et les conditions aux limites, (2) l'amortissement mécanique et (3) la transmission des ondes à travers le modèle.

Le problème de propagation des ondes élastique dans un milieu semi-infini ne peut être modélisé de manière parfaite puisqu'il est nécessaire de se limiter à une certaine longueur (figure 6.1). De plus, la présence de frontière latérale ou à la base du modèle peut générer des réflexions. Ce problème peut être minimisé par l'augmentation de la longueur et de la hauteur du modèle. Cette solution n'est pas toutefois suffisante pour permettre une bonne modélisation du problème de propagation, qui nécessite des éléments très petits. La méthode des frontières absorbantes, suggérée par Lysmer et Kuhlemeyer (1969) et qui consiste à appliquer un amortissement visqueux le long des frontières permet de dissiper en partie les énergies des différentes ondes au contact de ces frontières et donc de résoudre jusqu'à un certain point le problème de réflexion. Cette méthode est intégrée dans le programme FLAC (frontière absorbante constante).

Tout système dynamique doit permettre d'amortir, jusqu'à un certain degré, l'énergie qui lui est injectée. L'amortissement est en partie dû à la perte d'énergie résultante de la friction interne entre les particules. Cet amortissement est difficile à reproduire surtout dans le cas des sols (hystérisique). Par conséquent, l'amortissement de Rayleigh est généralement utilisé en analyse dynamique. Ce dernier est constitué de deux éléments visqueux proportionnels à la masse et à la rigidité :

$$[C] = \xi_{\min} \omega_{\min} [M] + \xi_{\min} \omega_{\min} [K]$$

[M] défini la matrice masse et [K] la matrice de rigidité. ξ_{\min} est le taux d'amortissement minimum défini à la fréquence ω_{\min} . Une valeur de ξ_{\min} de 2 % à des fréquences variant entre 15 et 20 rad/sec a été considérée dans cette étude.

La dimension des éléments constituant le modèle est un paramètre très 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. FLAC ne peut permettre d'utiliser plus de 60000 éléments (240x240). Pour cela et pour les convenances du problème une valeur de $\Delta l = 1$ m a été considérée dans cette étude.

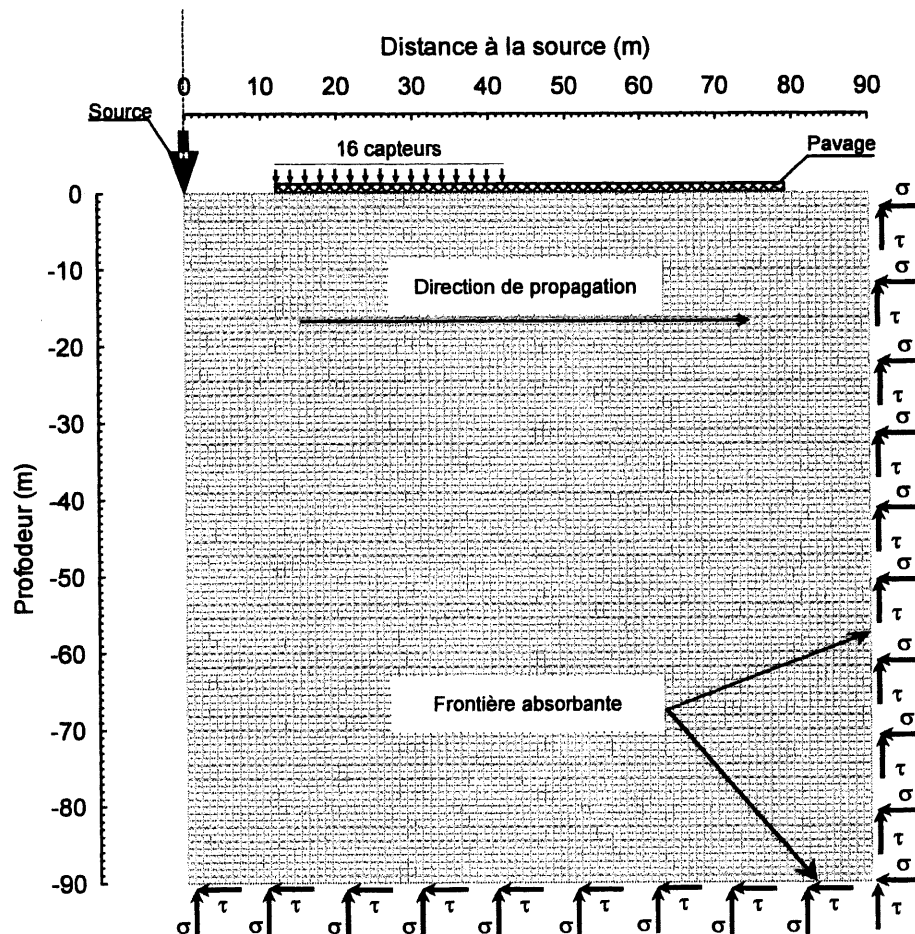


Figure 6. 1 Modélisation du problème de propagation des ondes de Rayleigh

6.3 VALIDATION DES RÉSULTATS

En premier lieu une simulation (MASW) a été faite sur un modèle simple (sans pavage), de 4 couches à vitesse des ondes de cisaillement croissante. Les propriétés du milieu considéré sont présentées au tableau 6.1. Une fois que les signaux sont simulés et générés par le logiciel FLAC, il faut déterminer la courbe de dispersion en se basant sur le principe de la méthode MASW (séparation des modes). Enfin, les courbes obtenues seront comparées aux courbes de dispersion théoriques déterminées par un autre programme (INVSUR) (Figure 6.2).

Tableau 6. 1 Propriétés du milieu considéré

Profondeur (m)	Épaisseur (m)	Densité (kg/m ³)	Coefficient de poisson	Vitesse (m/s)
0.0 – 2.0	2	1800	0.333	80
2.0 – 6.0	4	1800	0.333	120
6.0 – 14.0	8	1800	0.333	180
14.0 – 24.0	10	1800	0.333	360

Les simulations ont été effectuées, d'abord pour une distance entre la source et le premier capteur de 16 m avec un espacement entre les capteurs de 0.5 m, ensuite pour les distances et espacements respectifs de 16 – 1 et 24 – 0.5 m. Les vitesses de phase ainsi obtenues, après l'étape de dispersion, sont tracées en fonction de la fréquence dans la figure 6.2. En effet, dans tous les cas, les modes fondamentaux (R-0) ainsi que les premiers modes (R-1) expérimentaux correspondent respectivement aux modes fondamentaux et supérieurs théoriques. Cette correspondance de plus d'un mode avec les modes théoriques vient appuyer l'unicité de la solution donnée par la méthode MASW.

La figure 6.2 montre aussi très peu de variabilité au niveau de la courbe de dispersion dans le domaine fréquentiel en fonction de la distance source/premier capteur (16 et 24 m) ainsi que de l'espacement entre les capteurs (0.1 et 0.5 m). La méthode MASW permet donc une très bonne estimation de la courbe de dispersion qui demeure quasiment constante, pour différentes configurations et pour un profil donné.

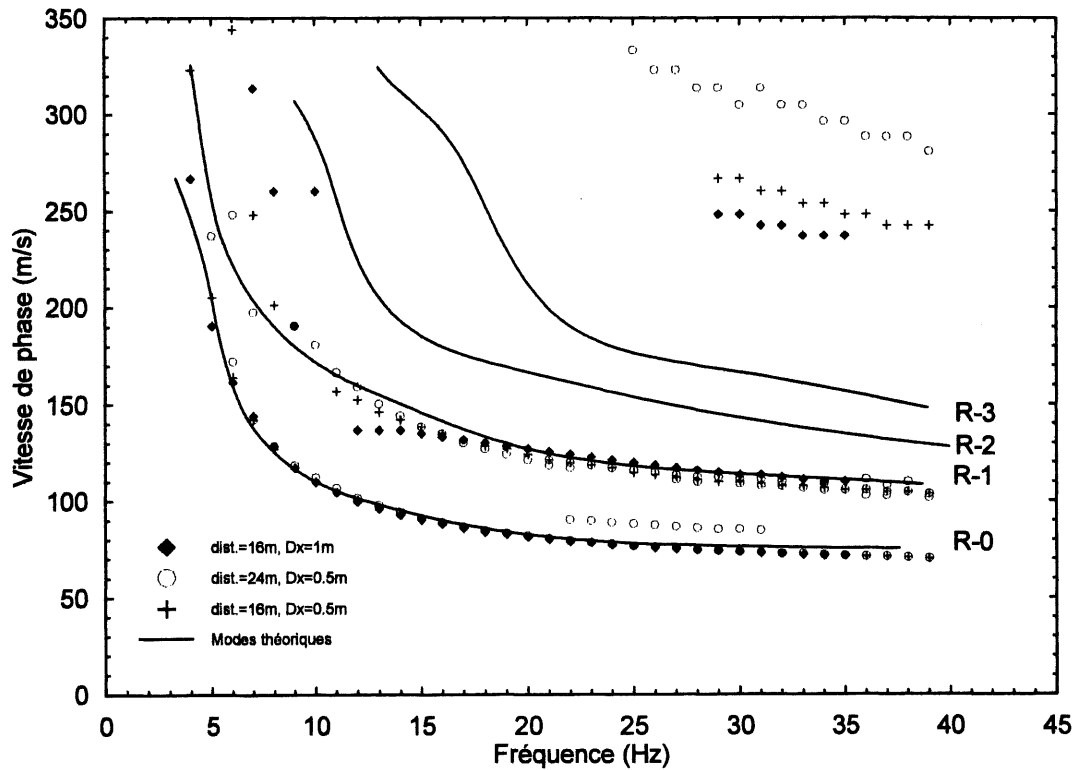


Figure 6. 2 Validation des simulations réalisées à l'aide de FLAC

6.4 ÉTUDE DE CAS

Cette partie sera consacrée à la présentation des résultats de plusieurs simulations numériques effectuées à l'aide de FLAC. Ces simulations ont été réalisées avec de valeurs de V_s variables, pour deux configurations différentes : la première sans pavage et l'autre avec une couche de pavage au dessus.

Pour cela, quatre types de profils ont été considérés :

- profil 1 : couche homogène de 18 m de profondeur;
- profil 2 : couche de pavage de 10 cm d'épaisseur au dessus d'une couche homogène de 18 m de profondeur;
- profil 3 : profil de 4 couches différentes, de 18 m de profondeur;
- profil 4 : profil de 4 couches différentes, de 18 m de profondeur, en dessous d'une couche de pavage de 10 cm.

Pour des fins de comparaison (avec et sans pavage), deux cas sont envisagés :

+ cas 1 : les deux premiers profils (profil 1 et profil 2) sont considérés ensembles;

+ cas 2 : les deux autres profils (3 et 4) seront présentés ensembles

6.4.1 Cas 1

Les deux profils utilisés sont résumés dans le tableau 6.2. La vitesse sous la surface est variée (80, 96, 120 et 160 m/s). Toute fois, la vitesse dans la couche de pavage est maintenue constante dans un premier temps, et est égale à 1200 m/s (V_s) une valeur courante dans la littérature (chapitre 4). Le tableau 6.3 résume les différentes simulations considérées.

Tableau 6. 2 les profils types utilisés dans les simulations (cas 1)

Profondeur (m)	Épaisseur (m)	Densité (kg/m ³)	Coefficient de poisson	Vitesse de cisaillement (m/s)	
				Profil 1	Profil 2
0.0 – 0.1 (pavage)	0.1	1800	0.333	-	variable
0.1 – 0.5	0.4	1800	0.333	constante	constante
0.5 – 1.3	0.8	1800	0.333	constante	constante
1.3 – 2.9	1.6	1800	0.333	constante	constante
2.9 – 18.1	15.2	1800	0.333	constante	constante

Tableau 6. 3 Les premières simulations considérées (cas 1)

Simulation N°	1	2	3	4	1a	2a	3a	4a
Vitesse de la couche (m/s)	80	96	120	160	80	96	120	160
Vitesse du pavage (m/s)	-	-	-	-	1200	1200	1200	1200
Rapport des vitesses	-	-	-	-	15	12.5	10	7.5

Dans un deuxième temps, la vitesse de la couche de pavage est variée (975, 1425 et 1500 m/s) de façon à obtenir des rapports de vitesse (vitesse du pavage/vitesse de la couche) égale à une constante. Le tableau 6.4 résume toutes les simulations :

Tableau 6. 4 Récapitulation des deuxièmes simulations du cas 1

Simulation N°	5	6	7	8	5a	6a	7a	8a
Vitesse de la couche (m/s)	160	130	190	150	160	130	190	150
Vitesse du pavage (m/s)	-	-	-	-	975	975	1425	1500
Rapport des vitesses	-	-	-	-	6	7.5	7.5	10

La distance source/premier capteur était de 3.2 m et l'espacement entre les capteurs était de 20 cm. En fait, en pratique la distance entre la source et la bordure du pavage est le plus souvent limitée et ne peut pas dépasser généralement les quelques mètres à cause de la structure même de la chaussée (pentes des talus). La distance source/bordure du pavage a été considérée de 1.2 m. L'espacement entre les capteurs de 20 cm est une distance à la fois raisonnable et pratique sur le terrain. De plus la figure 6.2 montre qu'il n'y a pas une différence significative en faisant varier l'espacement entre les capteurs.

6.4.2 Analyse et interprétation - cas 1

La première étape dans l'interprétation consiste à déterminer les courbes de dispersion et les comparer par la suite. Tous les résultats des différentes simulations effectuées à l'aide de FLAC, sont présentés à l'annexe 1 figures 1A-1 à 1A-4.

Les résultats des simulations N° 1, 2, 3 et 4, c'est-à-dire pour une même vitesse des ondes de cisaillement du pavage, sont représentés dans la figure 6.3 (a, b, c et d). D'après cette figure (6.3), une nette augmentation de la vitesse de phase du profil avec pavage par rapport à l'autre, peut être remarquée dans tous les cas. Cette augmentation peut être divisée en deux parties :

- une première partie plus ou moins constante pour des longueurs d'ondes supérieures à 4 m, et elle est de l'ordre de 10 à 15% (figure 6.3).
- Une deuxième partie variable pour les longueurs d'onde allant jusqu'à 4 m où l'augmentation dépasse, dans certains cas, les 30% (figure 6.3).

Le pavage semble donc exercer un effet accélérateur sur l'onde de surface et qui semble s'atténuer en fonction de la profondeur.

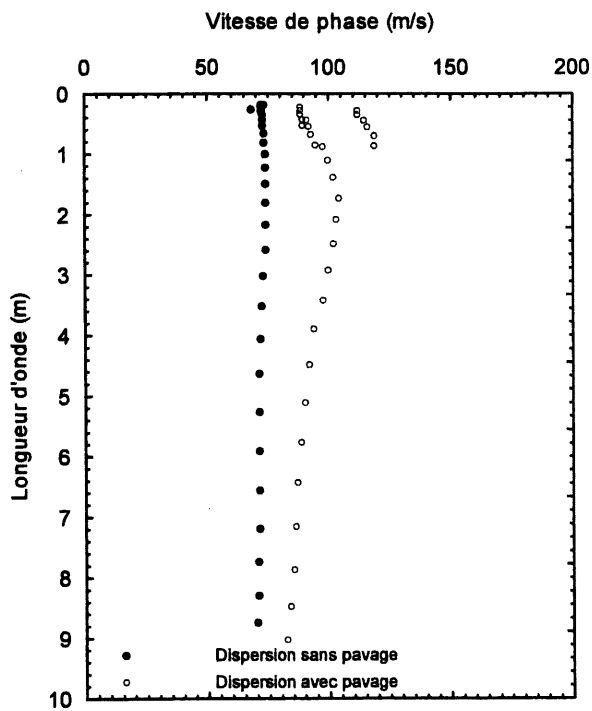
En faisant varier la vitesse des ondes de cisaillement de la couche du pavage, la même tendance (augmentation de la vitesse de phase) est observée (annexe 1), Ceci vient donc appuyer l'effet du pavage sur le comportement des ondes de Rayleigh dans les couches sous-jacentes.

Afin de bien apprécier la variation de la différence en terme de vitesse de phase entre les profils (avec et sans pavage), la différence a été déterminée en faisant des soustractions point par point entre les deux profils pour des mêmes longueurs d'ondes pour plusieurs profils. Le résultat est représenté dans la figure 6.4.

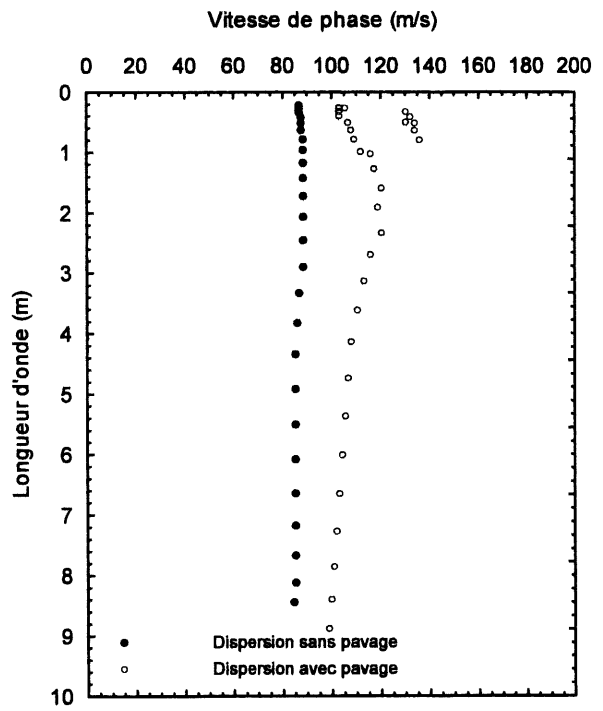
Dans la figure 6.4, le V_s désigne la vitesse des ondes de cisaillement de la couche du pavage alors que V_c désigne celle de la couche en dessous du pavage.

En examinant la figure 6.4, il est clair que l'accélération n'est pas constante et qu'elle est maximale à des longueurs d'ondes près de 2m (de l'ordre de 30%). Toutefois, pour des longueurs d'ondes plus élevées cette différence s'atténue considérablement (atteignant 10-15% au maximum).

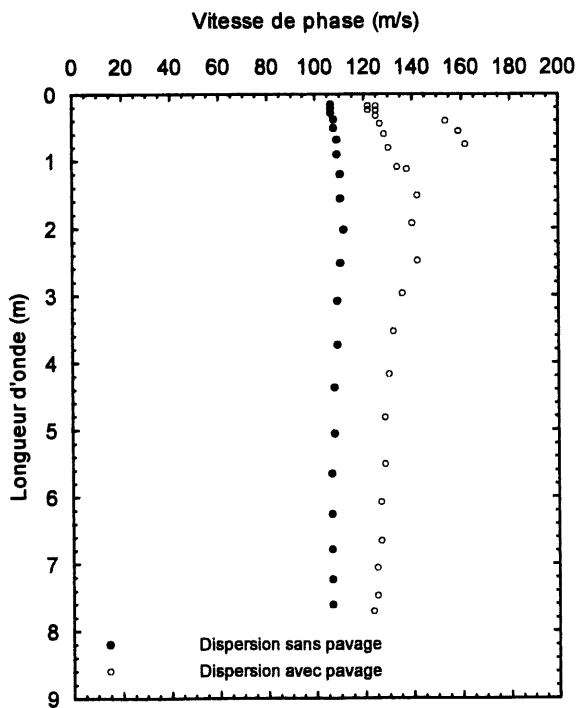
La figure 6.4 montre aussi un autre aspect important : il s'agit d'une variation sinueuse de la différence en terme de vitesse de phase en fonction de la longueur d'onde. Toutefois, le même rapport vitesse de pavage/vitesse de la couche ne semble pas avoir la même influence sur le comportement de l'onde de surface (figure 6.4). Il semble donc exister un effet organisé produit par la présence d'une couche de pavage.



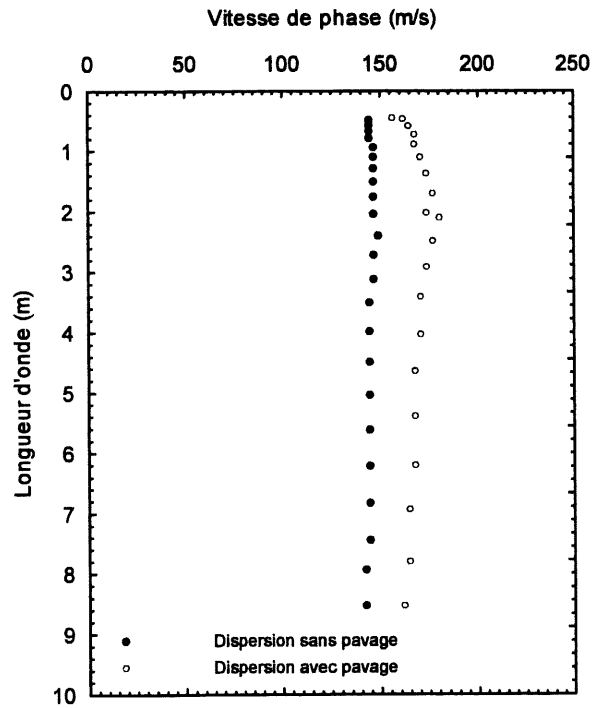
a) Couche uniforme d'une vitesse de 80 m/s



b) Couche uniforme d'une vitesse de 96 m/s



c) Couche uniforme d'une vitesse de 120 m/s



d) Couche uniforme d'une vitesse de 160 m/s

Figure 6. 3 Résultats des simulations effectuées à l'aide de FLAC - cas1 (V_s du pavage = 1200m/s).

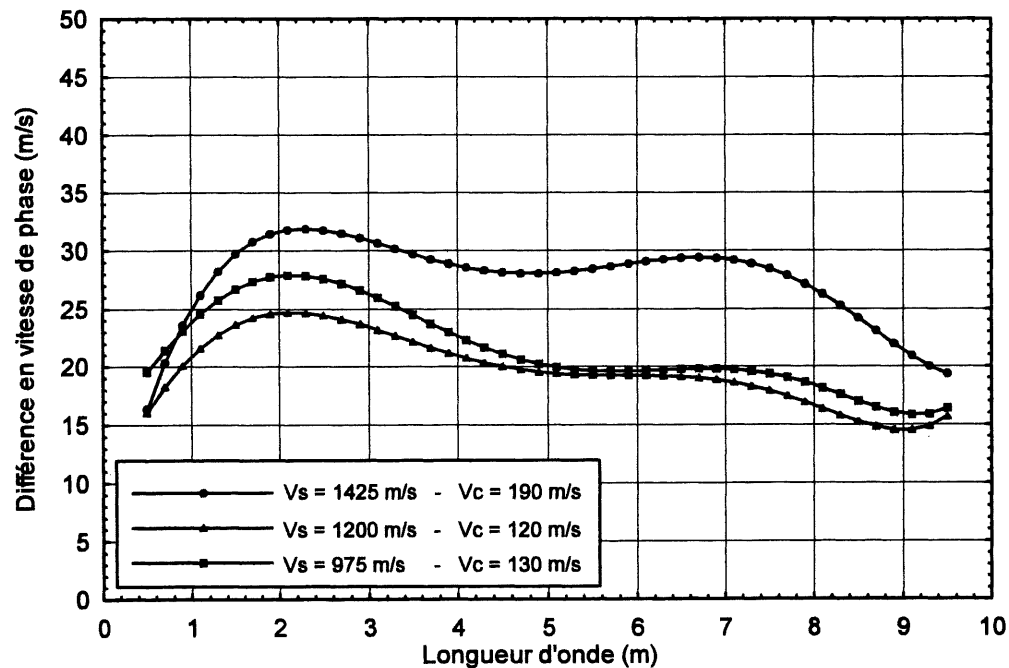


Figure 6. 4 Différence en vitesse de phase en fonction de la longueur d'onde

6.4.3 Cas 2

Dans ce cas, les profils utilisés sont résumés dans le tableau 6.5. Il s'agit d'un cas plus réaliste par rapport à l'autre cas, puisque sur le terrain on n'aura pratiquement jamais un profil homogène sur toute la profondeur. De plus, dans les conditions normales, les couches sont souvent de plus en plus rigides lorsque la profondeur est plus importante (effet du poids des couches supérieures), et donc les vitesses des ondes de cisaillement sont croissantes en fonction de la profondeur. Par la suite la vitesse de la couche de pavage a été aussi variée (540, 810, 1080 et 1500 m/s) (tableau 6.6).

Tableau 6. 5 Les profils types utilisés dans les simulations (cas 2)

Profondeur (m)	Épaisseur (m)	Densité (kg/m ³)	Coefficient de poisson	Vitesse de cisaillement (m/s)	
				Profil 3	Profil 4
0.0 – 0.1 (pavage)	0.1	1800	0.333	-	variable
0.1 – 0.5	0.4	1800	0.333	80	80
0.5 – 1.3	0.8	1800	0.333	120	120
1.3 – 2.9	1.6	1800	0.333	180	180
2.9 – 18.1	15.2	1800	0.333	360	360

Le tableau 6.7 résume les différentes simulations considérées :

Tableau 6. 6 Les premières simulations considérées (cas 2)

Simulation N°	9	10	11	12	9a
Vitesse du pavage (m/s)	540	810	1080	1500	-

Tout comme le premier cas, la distance source/premier capteur était de 3.2 m et l'espacement entre les capteurs était de 20 cm.

6.4.4 Analyse et interprétation - cas 2

Le graphique 6.5, présente les courbes de dispersion des simulations 9, 10, 11 et 12. À partir de cette figure, il est clair que la vitesse de la couche du pavage n'intervient pas d'une façon directe et importante au niveau de la dispersion (la différence en terme de vitesse de phase entre le profil avec une vitesse du pavage (V_s) de 540 m/s (simulation 9) et celui avec une V_s de 1500m/s (simulation 12) est inférieure à 5% à hautes fréquences (faibles longueurs d'ondes) et est inférieure à 2% à basses fréquences (figure 6.5).

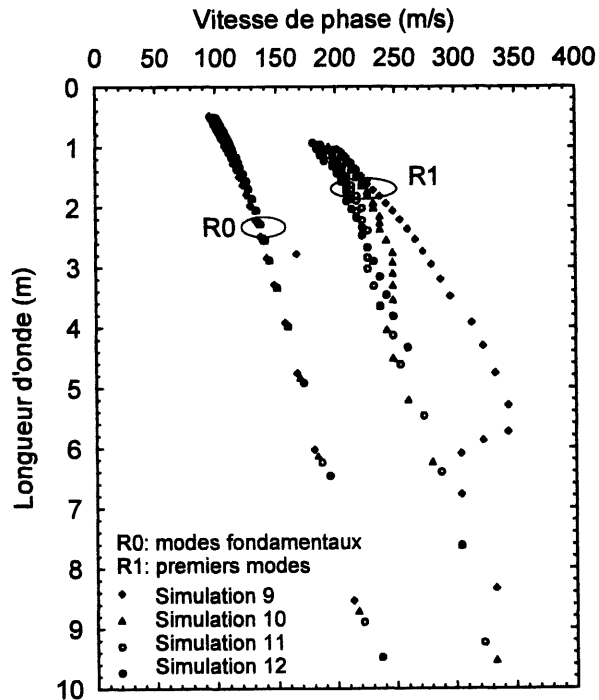


Figure 6. 5 Les courbes de dispersion des simulations 9, 10, 11 et 12

Dans le but de mieux comprendre l'effet du pavage sur le comportement des ondes de surfaces, et donc sur le profil des vitesses de cisaillement, avec ce deuxième cas, la simulation 12 ($V_s=1500\text{m/s}$) est comparée à une autre simulation sans couche d'asphalte (simulation 9a). La figure 6.6 résume cette comparaison. Par la suite la différence en terme de vitesse de phase entre les profils avec et sans pavage a été déterminée point par point en fonction de la longueur d'onde et le résultat est présenté dans la figure 6.7. La différence en terme de vitesse de phase entre les 2 profils avec et sans pavage est située entre 13 et 34 m/s soit de 6 à 35% (figures 6.6 et 6.7).

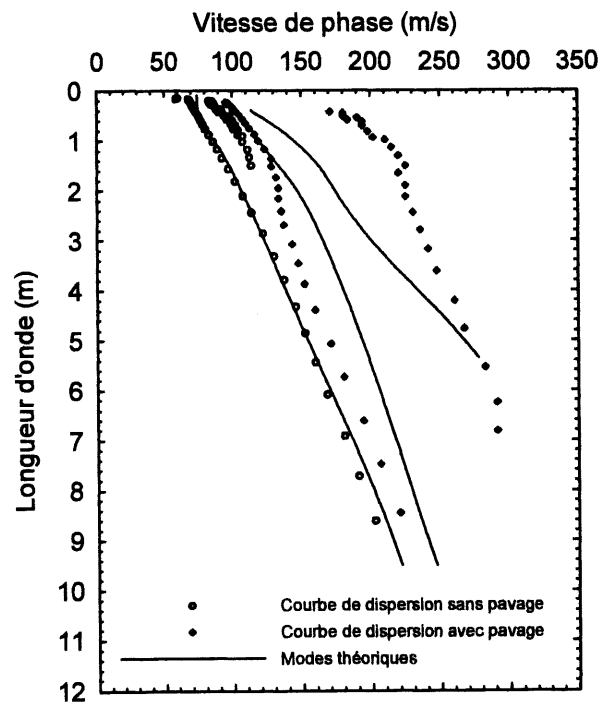


Figure 6. 6 Comparaison des courbes de dispersion avec et sans pavage de la simulation 12

La courbe de différence des vitesses de phase en fonction de la longueur d'onde dans ce cas (figure 6.7) présente la même tendance que celle du premier cas (figure 6.4). C'est-à-dire, un maximum à faible longueur d'onde et un minimum à grandes longueurs d'ondes (figure 6.7) avec un aspect sinueux. Le même effet accélérateur du pavage est présent encore une fois dans ce deuxième cas.

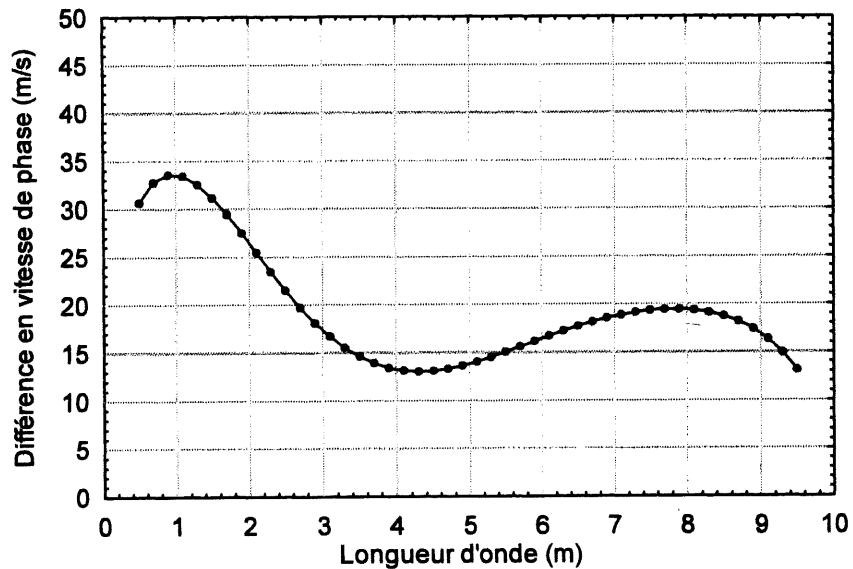


Figure 6. 7 Différence en vitesse de phase en fonction de la longueur d'onde de la simulation 12

D'autres paramètres ont aussi été testés au cours de la simulation 9a (profil réel du deuxième cas sans pavage). Il s'agit de la distance source/premier capteur et l'espacement entre les capteurs. Trois configurations ont été considérées :

- 1- le premier capteur était à 3.2 m de la source avec un espacement de 10 cm entre les capteurs;
- 2- même chose que 1 mais avec un espacement de 20 cm entre les capteurs;
- 3- le premier capteur était à 4.8 m de la source avec un espacement de 10 cm entre les capteurs.

La figure 6.8 illustre ces différentes configurations :

À priori et en se basant sur la figure 6.8, la distance source/premier capteur n'influence pas le comportement du mode fondamental (R-0) dans un profil sans pavage. Tous les modes supérieures des différentes configurations correspondent aussi assez bien.

Le même type de comparaison a été aussi envisagé pour le profil 2 avec pavage. Les distances source/premier capteurs simulées étaient de 3.2, 4 et 4.5 m. Les résultats sont représentés sur la figure 6.9.

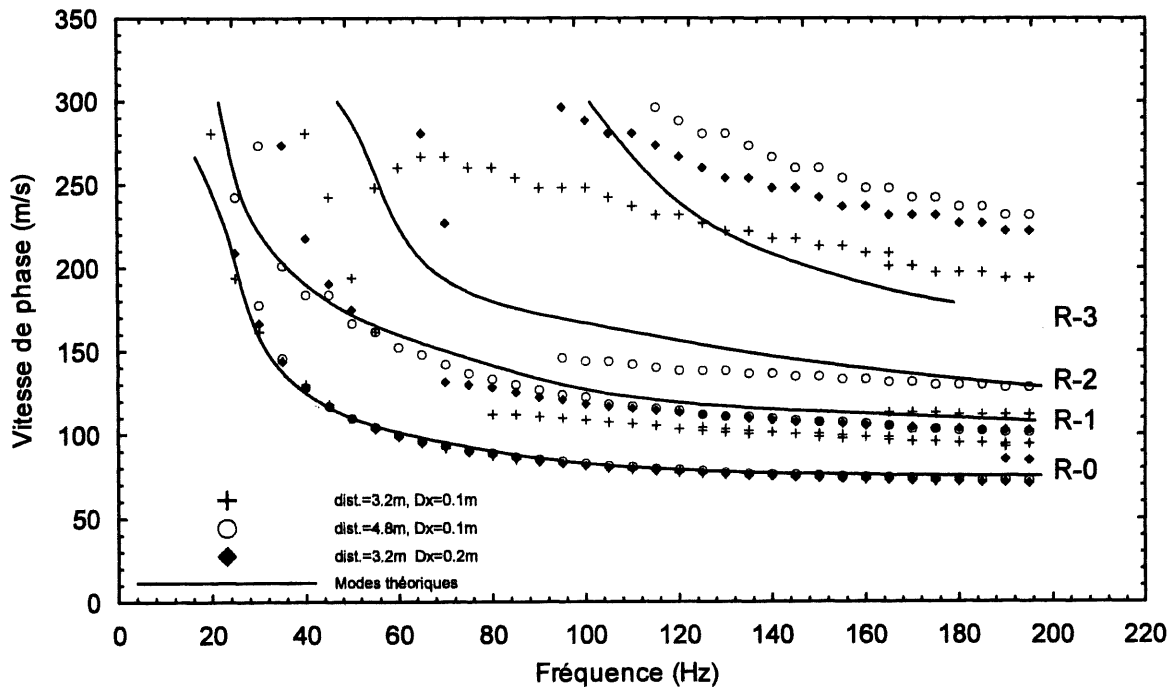


Figure 6. 8 Effet de la distance source/ premier capteur et l'espacement entre les capteurs

Selon la figure 6.9, la vitesse de phase diminue à chaque fois que les capteurs sont éloignés de la source, chose qui n'a pas été observée dans le profil sans pavage. Un examen plus détaillé de cette variation avec la distance a été réalisé. Une autre série de simulations a été faite en axisymétrique et elle sera détaillée dans les paragraphes qui suivent.

Mais avant de continuer dans ce sens, il serait intéressant de voir l'effet de la vitesse et l'épaisseur de la couche du pavage sur les courbes de dispersion.

6.4.5 Effet de l'épaisseur du pavage

Afin d'étudier l'influence de l'épaisseur de la couche du pavage rigide, quatre autres simulations ont été réalisées en se basant sur un profil constant (une seule couche au dessous du pavage). Le tableau 6.7 récapitule ces simulations :

Tableau 6. 7 Simulations de l'effet de l'épaisseur de la couche du pavage.

Simulation N°	13	14	15	16
Vitesse de la couche (m/s)	160	160	160	160
Vitesse du pavage (m/s)	1200	1200	1200	1200
Épaisseur du pavage (cm)	7.5	10	12.5	15

Les résultats de ces simulations sont montrés sur le graphique 6.10.

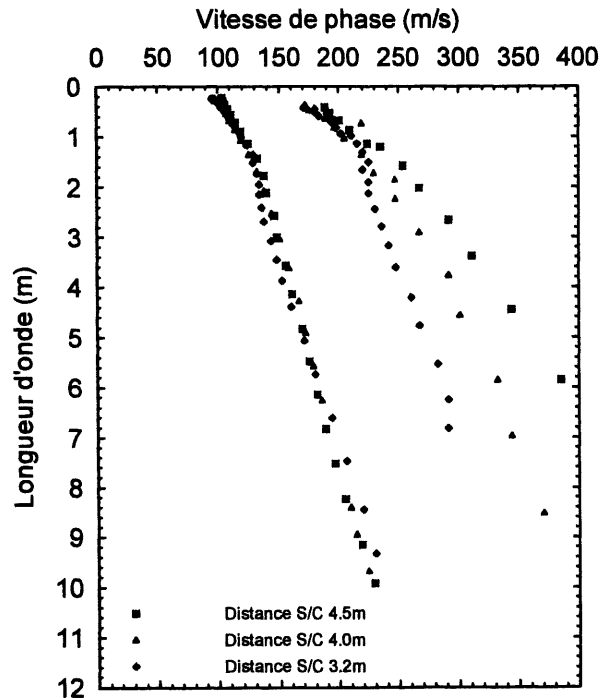


Figure 6. 9 Effet de la distance source/premier capteur

L'examen de la figure 6.10, révèle que la variation de l'épaisseur de la couche d'asphalte de 7.5 cm à 15 cm n'engendre aucune différence significative sur les courbes de dispersion. Dans la réalité l'épaisseur du pavage est généralement située dans cet intervalle.

De ce fait, lors d'essais MASW sur un pavage, et pour des fins de simplifications, son épaisseur peut être considérée sans effet.

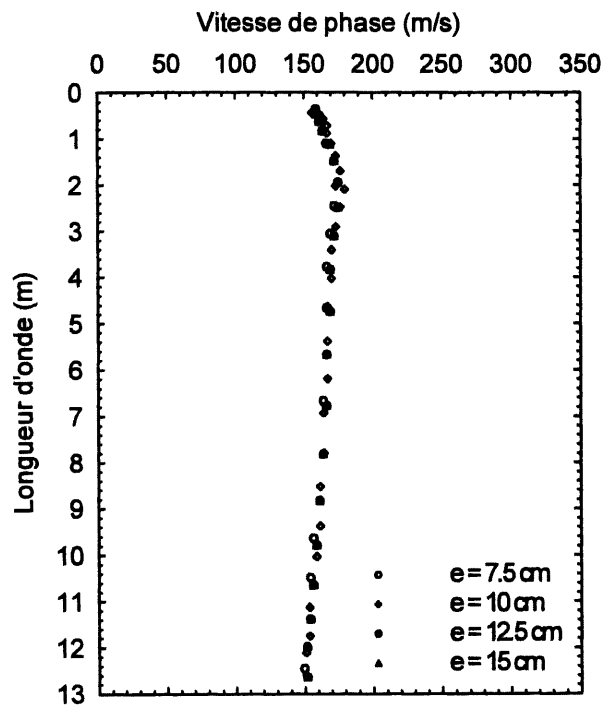


Figure 6. 10 Effet de l'épaisseur du pavage

6.4.6 Effet de la vitesse du pavage

Les deux simulations 5 et 14 décrites précédemment (couche uniforme de vitesse des ondes de cisaillement de 160 m/s sans et avec pavage respectivement) ont été considérées et une autre simulation (N° 16) a été ajoutée (profil constant de 160 m/s et une vitesse du pavage V_s de 1500 m/s).

Les résultats sont montrés sur la figure 6.11.

L'examen du graphique 6.11 montre qu'il y a une légère accélération lorsque la vitesse de la couche d'asphalte augmente (< 5%). Cette accélération est très faible entre les simulations 14 et 16, c'est-à-dire entre la vitesse du pavage 1200 et 1500 m/s et est inférieure à 2 %, ce qui vient donc confirmer encore une fois que la vitesse des ondes de cisaillement dans le pavage n'a pas d'effet significatif. Donc l'effet de cette variation peut être négligé et une valeur de $V_s = 1200$ m/s, pourra être considérée comme représentative sur le terrain.

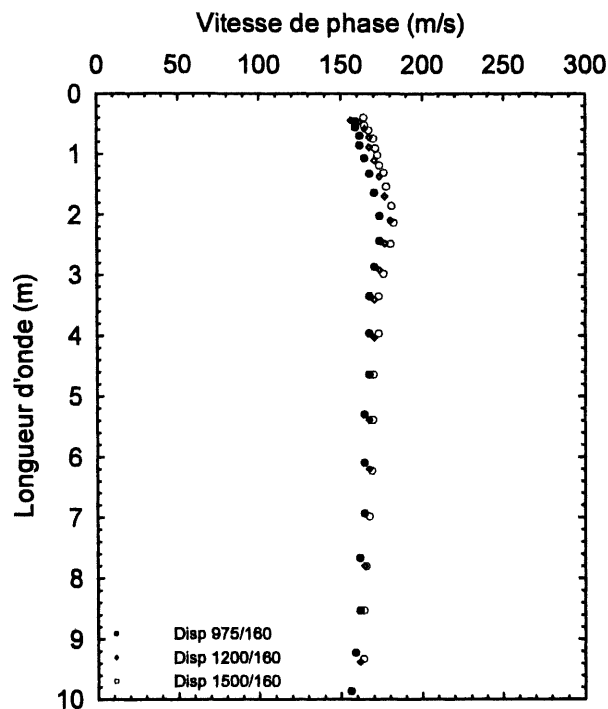


Figure 6. 11 Comparaison de l'effet de la vitesse du pavage

6.4.7 Détermination d'une fonction de l'accélération causée par le pavage

À partir des paragraphes précédents, il est ressorti un effet, qui semble être organisé, produit par la présence du pavage. L'idée de cette partie est donc d'essayer d'examiner les paramètres influençant cette variation (accélération) tout en regardant la possibilité de l'éliminer ou à la limite de le corriger.

Cependant, l'accélération peut, en quelques sortes, être traduite par un décalage temporel au niveau des signaux enregistrés. Pour cela, il serait intéressant d'examiner le décalage temporel entre les signaux avec et sans pavage.

De ce fait, la majorité des simulations décrites dans les paragraphes précédents (cas 1 et cas 2) ont été réexaminées afin d'évaluer le comportement du décalage temporel entre les deux situations envisagées (avec et sans pavage) en fonction de la distance entre les capteurs.

Ce décalage dans le temps, pourra s'évaluer en effectuant une simple différence entre deux signaux successifs en fonction du temps. Ainsi le résultat obtenu donnera un décalage pour une certaine distance entre ces deux signaux. Mais, pour des raisons de précision, et de rapidité, une autre solution s'avère intéressante pour le calcul de ce décalage temporel. Il s'agit de traiter les signaux dans le domaine fréquentiel, fréquence par fréquence, pour déterminer le déphasage entre avec et sans pavage et ensuite revenir dans le domaine temporel à l'aide d'une simple transformation mathématique. Ensuite le décalage ainsi obtenu sera porté sur un graphique en fonction de la distance et ce pour les différents cas de profil et pour différentes fréquences. Les résultats obtenus sont montrés dans les graphiques 6.12 (a-g) et 6.13. Le rapport X/Y représente vitesse du pavage (X) sur la vitesse de la couche (Y).

Les figures 6.12 et 6.13 montrent une variation sinusoïdale, comme dans les figures 6.4 et 6.7, mais croissante en fonction de la distance source/capteur. L'accélération voit son effet diminuer en fonction de la longueur d'onde (ou augmentation en fonction de la fréquence) et donc en fonction de la profondeur.

À partir de ces mêmes figures (6.4 et 6.7), il y a une aussi une certaine évolution dans le sens du décalage croissant et dans le sens de la distance source capteur croissante, selon les différents cas considérés. Il semble donc que ce même décalage est fonction aussi de la vitesse des ondes de cisaillement (V_s du pavage et/ou V_s des couches inférieures). En effet, le maximum du décalage est observé lorsque la V_s du pavage est de 1425 m/s et celle de la couche uniforme de 190 m/s pour toutes les fréquences (cas 1). Alors que le minimum a été observé là où V_s du pavage est de 1200 m/s et celle de la couche uniforme 80 m/s (cas 1).

Par conséquent, la variation du décalage temporel des différents signaux semble être une fonction directe de la distance source/capteur et une fonction inverse de la longueur d'onde et indirecte de la vitesse des ondes de cisaillement. Pour cela, l'équation 6.1 a été proposée :

$$\frac{dt}{dx} = A \cos\left(\frac{B}{\lambda}(x - x_0)\right) + C \quad (6.1)$$

Où A, B, C sont des coefficients réels;

t : décalage temporel entre avec et sans pavages;

x : distance source/capteur (cm);

x_0 : distance source/début du pavage (m), égale à 2 m dans ces cas précis
(cas 1 + cas 2);

λ : longueur d'onde du profil avec pavage (m).

L'intégration de l'équation 6.1 donne :

$$\int \frac{dt}{dx} dx = \int \left(A \cos\left(\frac{B}{\lambda}(x - x_0)\right) + C \right) dx \quad (6.2)$$

$$\Rightarrow t = A \frac{\lambda}{B} \sin\left(\frac{B}{\lambda}(x - x_0)\right) + Cx + Cte \quad (6.3)$$

Où Cte est une constante d'intégration.

En faisant une régression non linéaire et en se basant sur l'équation 6.3, les différents coefficients ont pu être approchés pour les différents cas. Ces coefficients sont résumés dans le tableau 6.6 ($x_0=2$ m). Les courbes de régression sont superposées sur le graphique 6.12 (courbes en trait continu). Ces dernières collent très bien avec les courbes simulées.

En partant du tableau 6.8, et en faisant des corrélations statistiques les variations des différents coefficients de l'équation 6.3, en fonction de la Fréquence, ont pu être déterminées :

$$\text{la constante est : } Cte = -2C \text{ (tableau 6.8)} \quad (6.4)$$

$$C = \frac{1}{V_{sp}} * 10^{((0.197 * F - 3.36) * x - 0.007143 * F - 0.527)} \quad (\text{figure 6.14}) \quad (6.5)$$

(V_{sp} est la vitesse de cisaillement de la couche du pavage).

$$B = F * C * ((-9.9379 * F - 152.466) * x + 0.0317 * F + 268.7183) \quad (6.6)$$

(figure 6.15).

$$A = -C^3 * 10^{((-0.5808 * F + 12.672) * x + 0.0317 * F + 6.399)} \quad (\text{figure 6.16}) \quad (6.7)$$

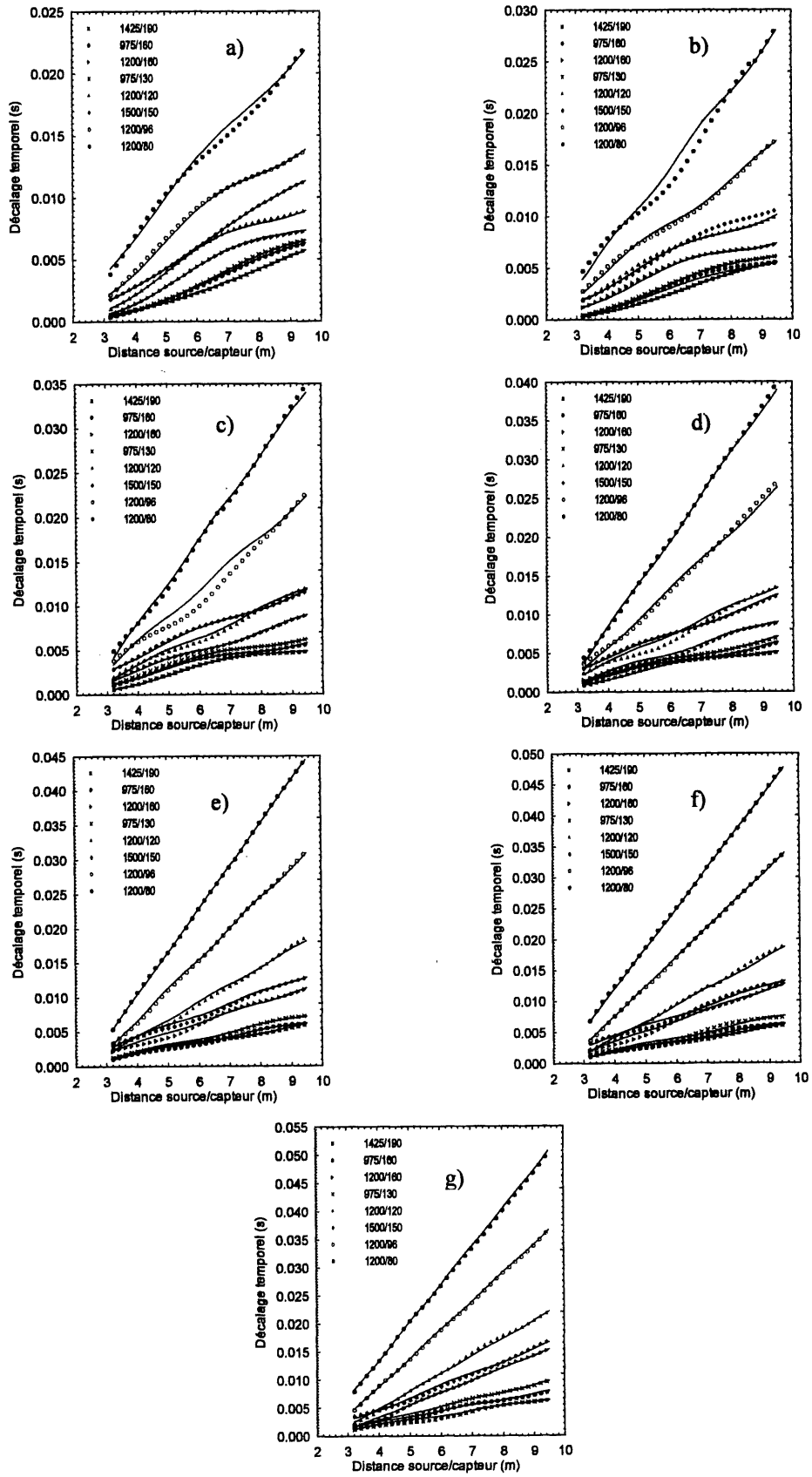


Figure 6. 12 Le décalage temporel des différentes simulations du cas 1 pour différentes fréquences (a : $F=30$ Hz, b : $F=40$ Hz, c : $F=50$ Hz, d : $F=60$ Hz, e : $F=70$ Hz, f : $F=80$ Hz et g : $F=90$ Hz)

Une fois que le décalage temporel est calculé, pour un espacement source/capteur et une fréquence donnés, et connaissant la fréquence d'échantillonnage ou le pas de temps (Δt), il suffit alors de décaler le signal en question dans le temps, (le décalage se fera connaissant l'entier le plus près du rapport décalage temporel $(t)/\Delta t$).

Afin de vérifier la validité de cette correction, le profil de la simulation 14 a été corrigé (V_s du pavage = 1200 m/s et V_s de la couche = 160 m/s). Par la suite, la même correction a été appliquée sur le profil réaliste (simulation 12, cas 2). Le résultat est présenté dans la figure 6.17.

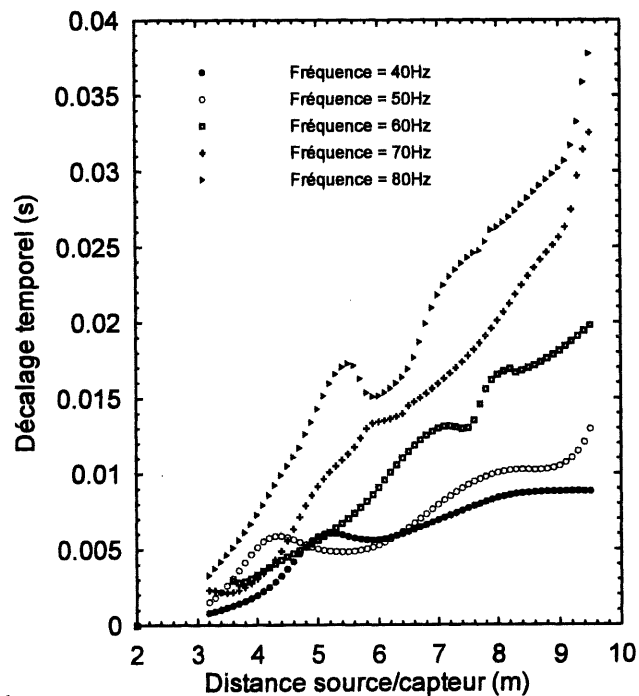


Figure 6. 13 Le décalage temporel de la simulation 12 (cas 2) pour différentes fréquences.

Les figures 6.17 et 6.18, montrent que la correction est très bonne. En effet, elle permet de retrouver le profil sans pavage, dans sa forme, à plus ou moins 5m/s. Ceci permettra donc une estimation plus réaliste du profil de vitesse.

Tableau 6. 8 Les coefficients de l'équation 6.3 pour les différentes simulations

30 Hz								
Vs/Vc	1425/190	975/160	1200/160	975/130	1200/120	1500/150	1200/96	1200/80
A	-0,00030	-0,00038	-0,00045	-0,00059	-0,00071	-0,00034	-0,00087	-0,00076
B	2,96558	3,49361	3,67307	3,98695	4,27781	3,23667	3,60945	3,85789
C	0,00072	0,00078	0,00081	0,00102	0,00125	0,00140	0,00184	0,00277
Cte	-0,0014	-0,0016	-0,0017	-0,002	-0,0022	-0,0023	-0,00285	-0,004

40 Hz								
Vs/Vc	1425/190	975/160	1200/160	975/130	1200/120	1500/150	1200/96	1200/80
A	-0,00032	-0,00030	-0,00044	-0,00065	-0,00063	-0,00063	-0,00062	-0,00070
B	3,11102	3,56995	3,43729	3,41917	3,53385	3,75471	3,95489	5,02386
C	0,00071	0,00078	0,00084	0,00097	0,00129	0,00129	0,00220	0,00377
Cte	-0,0016	-0,0018	-0,0018	-0,00125	-0,0016	-0,0016	0,004	-0,008

50 Hz								
Vs/Vc	1425/190	975/160	1200/160	975/130	1200/120	1500/150	1200/96	1200/80
A	-0,00048	-0,00045	-0,00050	-0,00040	-0,00041	-0,00046	-0,00055	-0,00054
B	3,54908	3,63074	3,57824	4,10858	4,23954	3,27084	4,54078	4,52948
C	0,00066	0,00072	0,00080	0,00109	0,00158	0,00138	0,00298	0,00474
Cte	-0,001	-0,0007	-0,0009	-0,0016	-0,003	0,0011	-0,006	-0,011

60 Hz								
Vs/Vc	1425/190	975/160	1200/160	975/130	1200/120	1500/150	1200/96	1200/80
A	-0,00043	-0,00038	-0,00036	-0,00043	-0,00035	-0,00039	0,00046	-0,00050
B	3,28907	3,61163	3,64474	4,13037	3,99769	3,33800	3,20000	3,11276
C	0,00067	0,00073	0,00082	0,00120	0,00179	0,00142	0,00371	0,00560
Cte	-0,00075	-0,0007	-0,00085	-0,0022	-0,0033	-0,0012	-0,009	-0,014

70 Hz								
Vs/Vc	1425/190	975/160	1200/160	975/130	1200/120	1500/150	1200/96	1200/80
A	-0,00032	-0,00034	-0,00032	-0,00026	-0,00036	-0,00036	0,00051	-0,00025
B	3,74883	4,07269	4,06374	4,29866	4,42235	3,73668	4,03514	3,58083
C	0,00071	0,00080	0,00095	0,00142	0,00252	0,00158	0,00439	0,00621
Cte	-0,0008	-0,0013	-0,0017	-0,0022	-0,0058	-0,002	-0,0108	-0,0145

80 Hz								
Vs/Vc	1425/190	975/160	1200/160	975/130	1200/120	1500/150	1200/96	1200/80
A	-0,00030	-0,00032	-0,00037	-0,00024	-0,00034	-0,00035	-0,00012	-0,00014
B	3,83717	3,83771	3,79228	4,19063	4,20947	3,46628	6,12311	2,72061
C	0,00076	0,00081	0,00100	0,00170	0,00265	0,00161	0,00478	0,00650
Cte	-0,0011	-0,0013	-0,0019	-0,0033	-0,0065	-0,002	-0,0115	-0,014

90 Hz								
Vs/Vc	1425/190	975/160	1200/160	975/130	1200/120	1500/150	1200/96	1200/80
A	-0,00030	-0,00025	-0,00024	-0,00016	-0,00020	0,00037	-0,00035	-0,00045
B	3,94780	4,09289	4,07909	4,69353	4,72589	2,91996	3,74760	4,16179
C	0,00082	0,00099	0,00125	0,00218	0,00311	0,00214	0,00507	0,00675
Cte	-0,0012	-0,0014	-0,0022	-0,0053	-0,0075	-0,0038	-0,0115	-0,0135

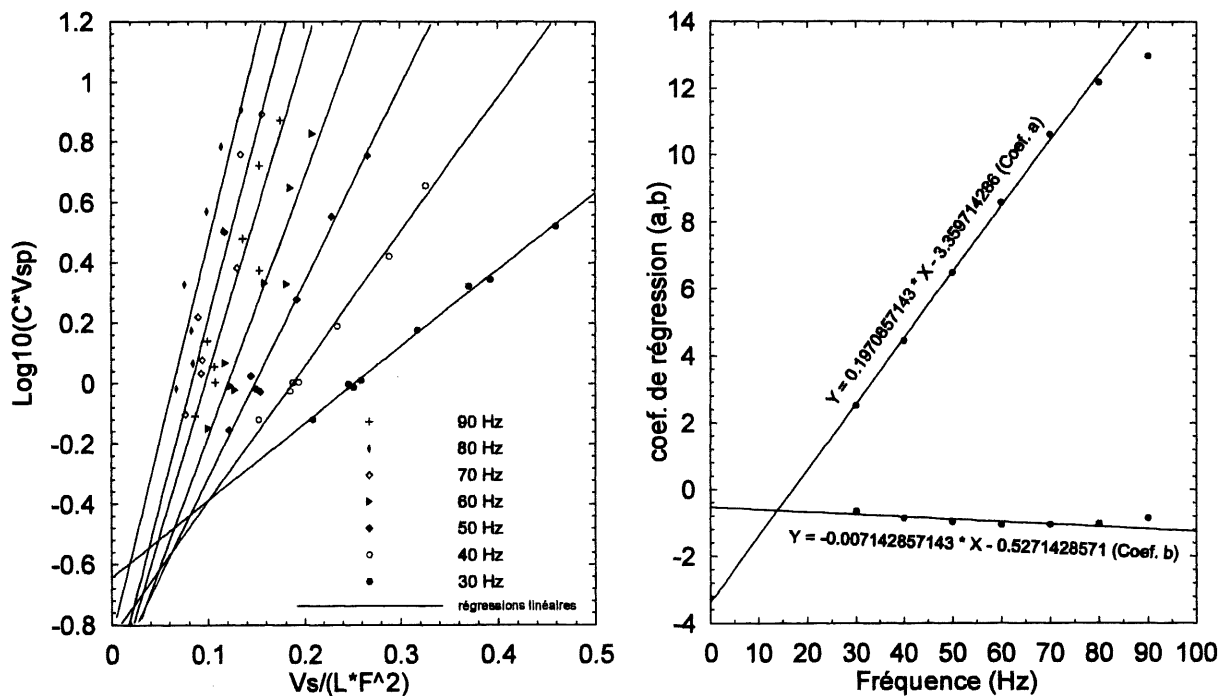


Figure 6.14 Coefficients C

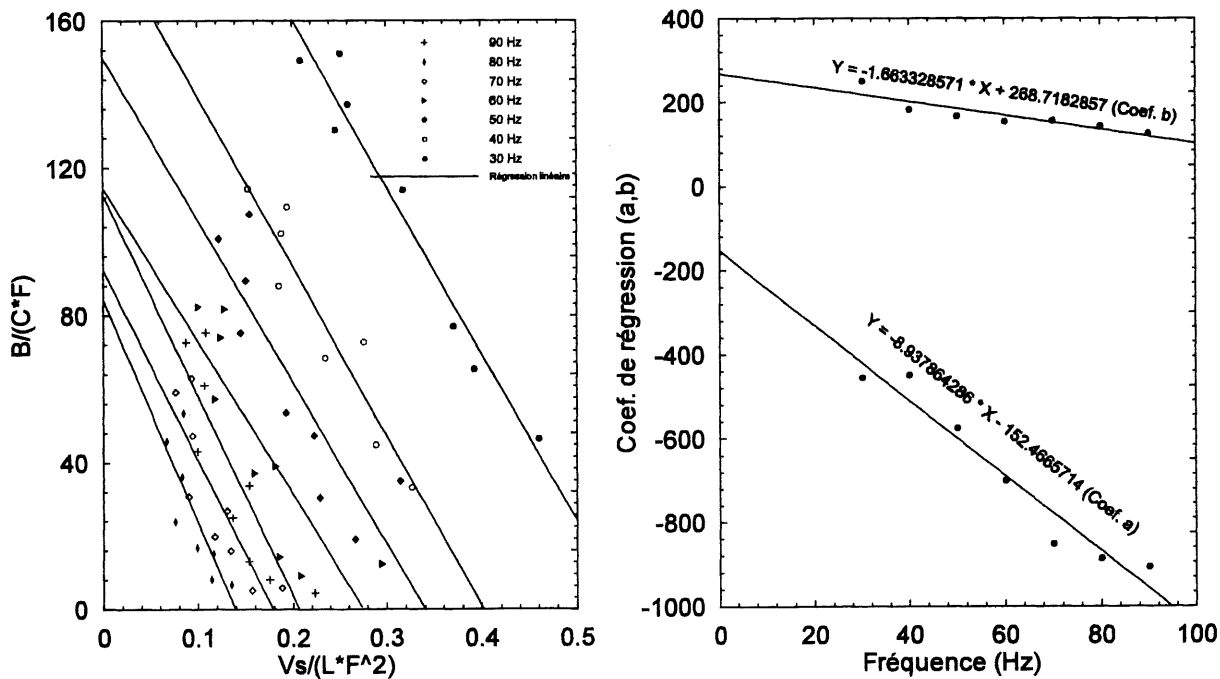


Figure 6.15 Coefficients B

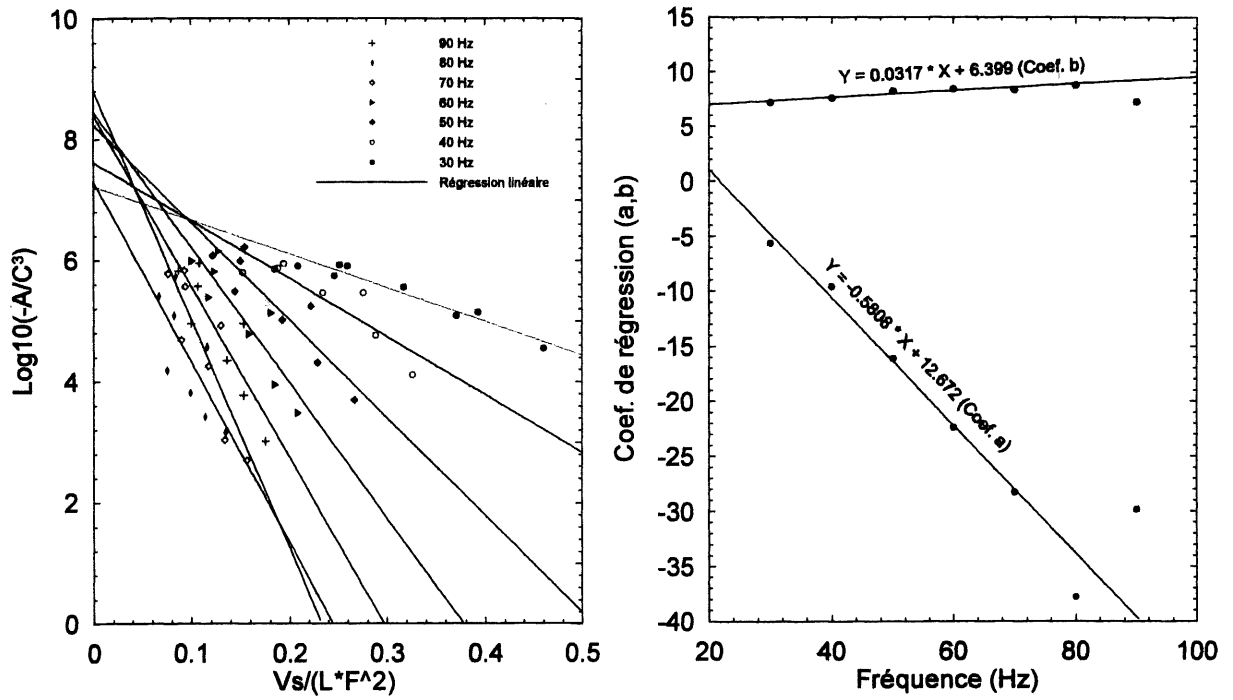


Figure 6. 16 Coefficients A

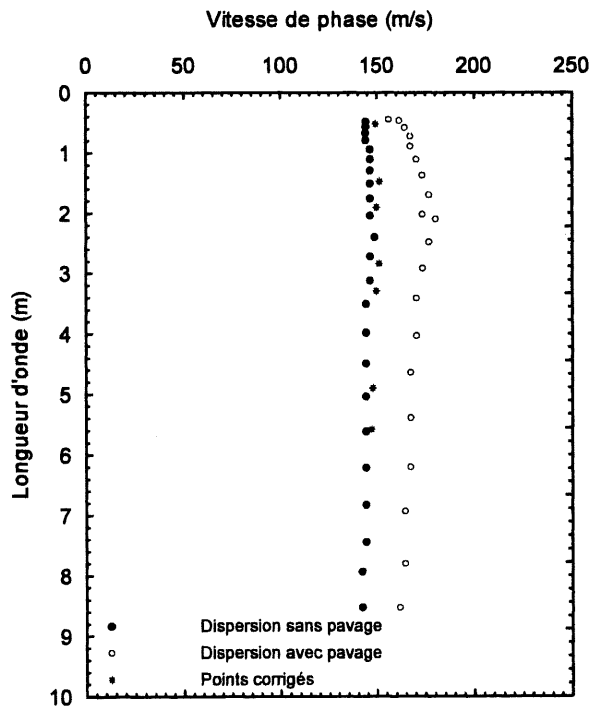


Figure 6. 17 Correction du profil de la simulation 14.

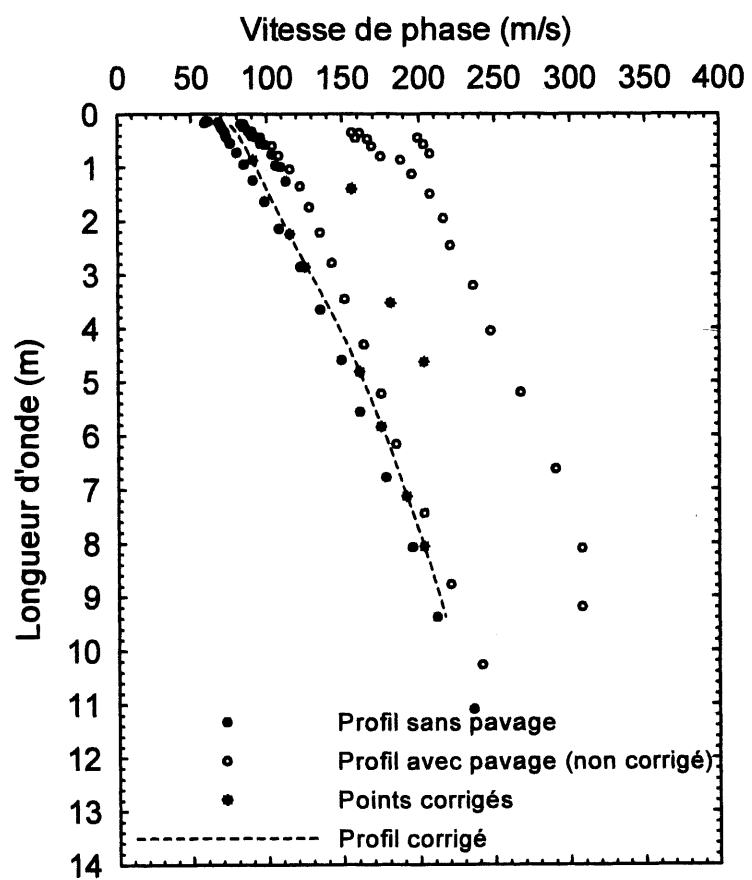


Figure 6. 18 Correction du profil de la simulation 12 (cas2).

CHAPITRE 7

CARACTERISATION DES STRUCTURES DE CHAUSSEES AU DESSUS DES PONCEAUX – SIMULATIONS NUMERIQUES

7.1 INTRODUCTION

Dans cette partie, des limites inférieures très raides (à vitesse de cisaillement élevée) ainsi que des cavités vont être introduites afin d'investiguer l'infiltration dans des sols à travers les joints ou défauts de ponceaux . Ces défauts, installés en dessous des chaussées, forment des cavités qui pourront être dramatiques lorsqu'ils deviennent suffisamment grosses (affaissement, chapitre 1).

7.2 SIMULATIONS MASW – CHAUSSEE AVEC PAVAGE

7.2.1 Structure de la chaussée

La configuration qui a été proposée, dans cette partie de l'étude, est la suivante (Figure 7.1) :

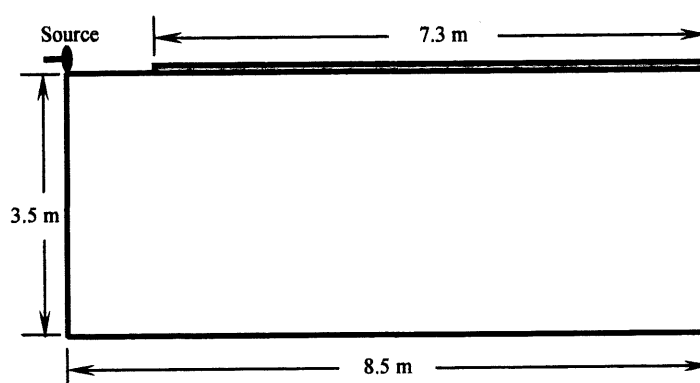


Figure 7. 1 Représentation de la chaussée modélisée

Dans les simulations qui suivent, trois types de profils ont été considérés. Le premier est un profil uniforme, à couche unique et à vitesse constante, le second est un profil de plusieurs couches et dont la vitesse diminue en fonction de la profondeur; et le dernier est un profil aussi multicouches mais dont la vitesse augmente d'une façon régulière en fonction de la profondeur. Le tableau 7.1 résume ces trois cas.

Tableau 7. 1 Caractéristiques des trois profils.

Profondeur (m)	Épaisseur (m)	Densité (kg/m ³)	Coefficient de poisson	Vitesse (m/s)		
				Profil 1	Profil 2	Profil 3
0 – 0.1 (pavage)	0.1	2100	0.33	1000	1000	1000
0.1 – 1.2	1.1	1800	0.33	200	300	200
1.2 – 2.3	1.1	1800	0.33	200	200	240
2.3 – 3.6	1.3	1800	0.33	200	240	300
3.6 – 24.1	20.5	2100	0.33	1100	1100	1100

7.2.2 Source et capteurs

La source est placée sur le bord gauche de la chaussée à une distance de 1.2 m du pavage (distance acceptable pour une structure de chaussée réelle). La distance source/premier capteur a été considérée la même pour les trois profils et est égale à 1.2 m. Plusieurs capteurs ont été placés à égale distance sur une même ligne, d'environ 7 m de longueur, avec un espacement de 20 cm entre les capteurs.

7.3 ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES DONNÉES

Les résultats des différentes simulations effectuées, ont été interprétés de la façon suivante :

- l'espacement choisi entre les capteurs était de 20 cm : cette valeur est pratique lors des essais sur le terrain.
- l'espacement entre deux séries de 16 capteurs (MASW) successives était de 60cm (recouvrement ou *overlapping*). Exemple : si la première distance

source/premier capteur pour la première série est de 1.2 m, alors celle de la deuxième série est de 1.8 m.

- le coefficient du filtre était de 8 (filtre assez large).

La cavité introduite était d'une forme carrée 1x1 m, et elle est simulée comme étant une zone à très faible vitesse de cisaillement (25 m/s).

Les corrections du chapitre 6 ne peuvent pas être utilisées dans ce chapitre puisque les ponceaux n'étaient pas pris en considération. Leur effet est encore ignoré.

7.3.1 Profil 1

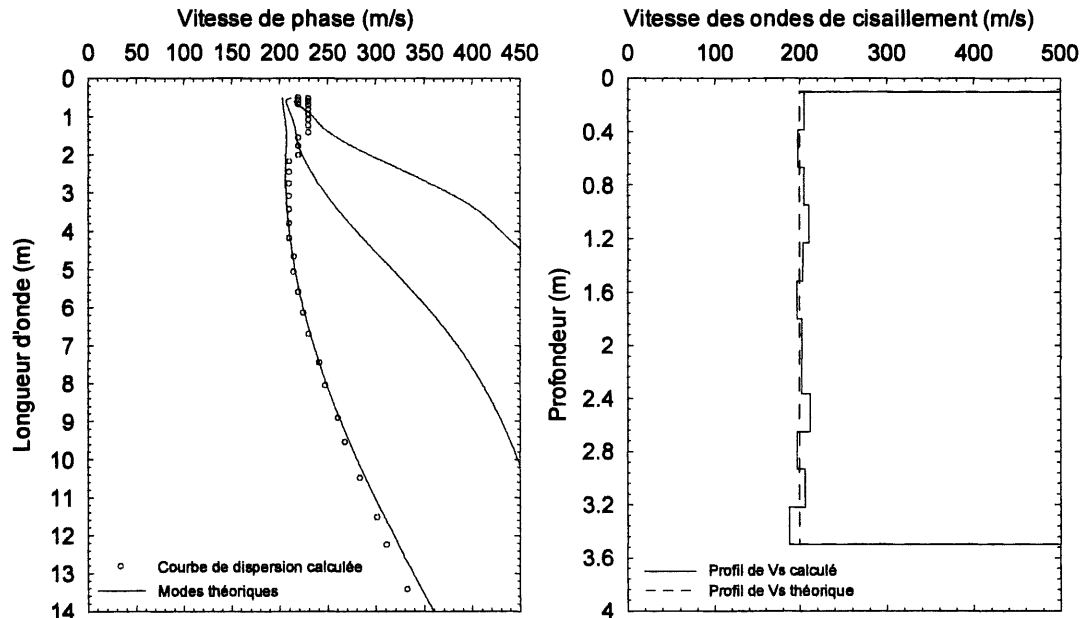
En premier lieu et en se basant sur le profil 1 (simulation 17), plusieurs courbes de dispersion, ainsi que les profils de vitesses correspondants, ont été faites (annexes 2a). Par la suite, une cavité carrée de 1m a été introduite à partir de 3 m de l'axe de la source à une profondeur de 3.5 m (sur la limite inférieure rigide) (simulation 18). Les profils de dispersion et de vitesse sont rassemblés dans les annexes 3a.

Deux profils types (avec et sans cavité) sont présentés dans la figure 7.2. À partir de cette figure, une diminution de la vitesse des ondes de cisaillement est clairement remarquée surtout en profondeur (de 3 à 3.5 m). Ceci suppose donc une possibilité de détection des cavités par la méthode MASW.

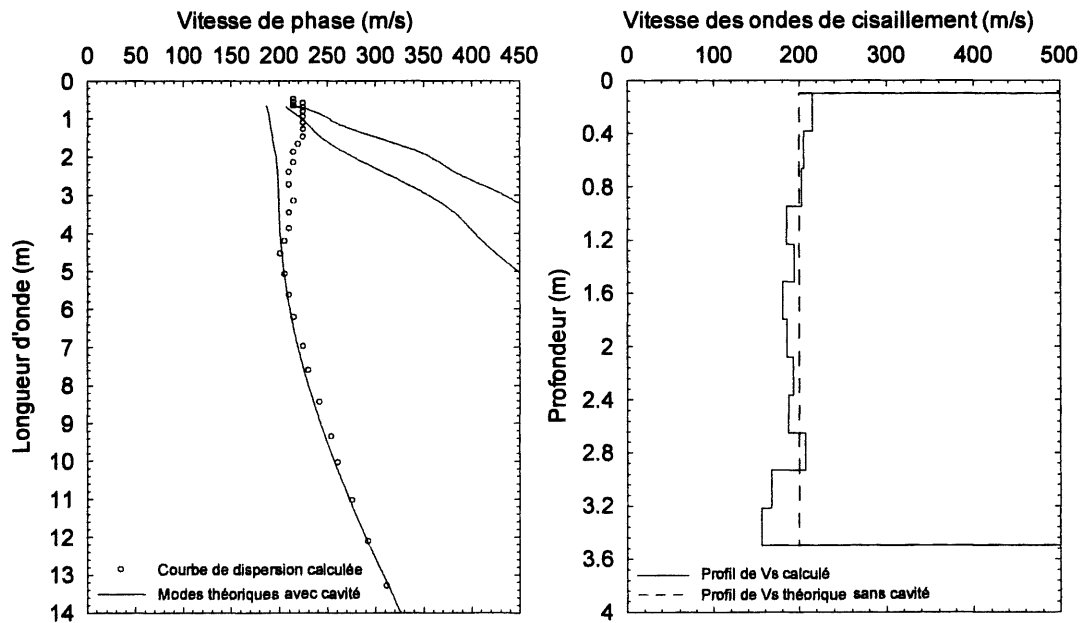
De plus, en examinant les courbes de dispersion de la figure 7.2 ainsi que celles des annexes 2a et 3a, il semble que pour ce type de profil, il n'y a pas assez de points de dispersion à faible longueur d'onde ($\leq 2\text{m}$). Ceci semble un problème au niveau de la séparation des modes avec la méthode MASW à faible longueur d'onde.

Cependant, en utilisant les profils de vitesses de cisaillement déterminés précédemment, un profil tomographique a pu être tracé par interpolation (Figure 7.3). L'endroit de la cavité est détectable (zone encerclée).

On peut aussi noter, à partir des profils de vitesses (annexes 2a et 3a) et des profils tomographiques (figure 7.3), que la vitesse des ondes de cisaillement a tendance à diminuer en s'éloignant de la source (à partir d'environ 4.5 m) et pour des longueurs d'ondes assez importantes (à partir d'environ 3m). Cette diminution est de l'ordre de 10 à 15%.



a) Profils sans cavité



b) Profils avec cavité

Figure 7. 2 Comparaison des courbes de dispersion ainsi que des profils de vitesse des ondes de cisaillement pour les simulations du profil 1 avec et sans cavité.

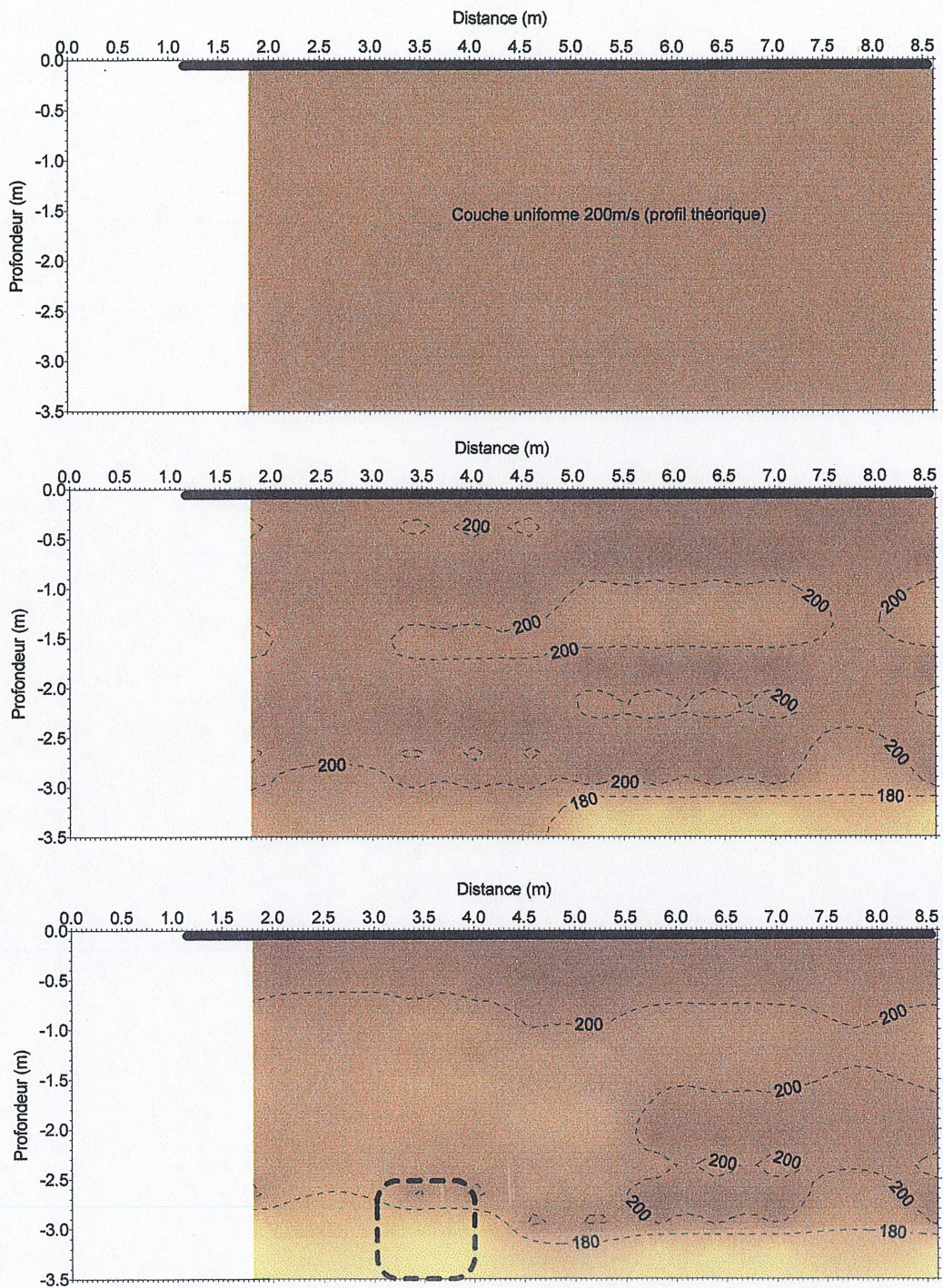


Figure 7.3 Courbes tomographiques du profil 1 : a) profil uniforme théorique, b) profil uniforme sans cavité déterminé à partir de la simulation et c) profil avec cavité.

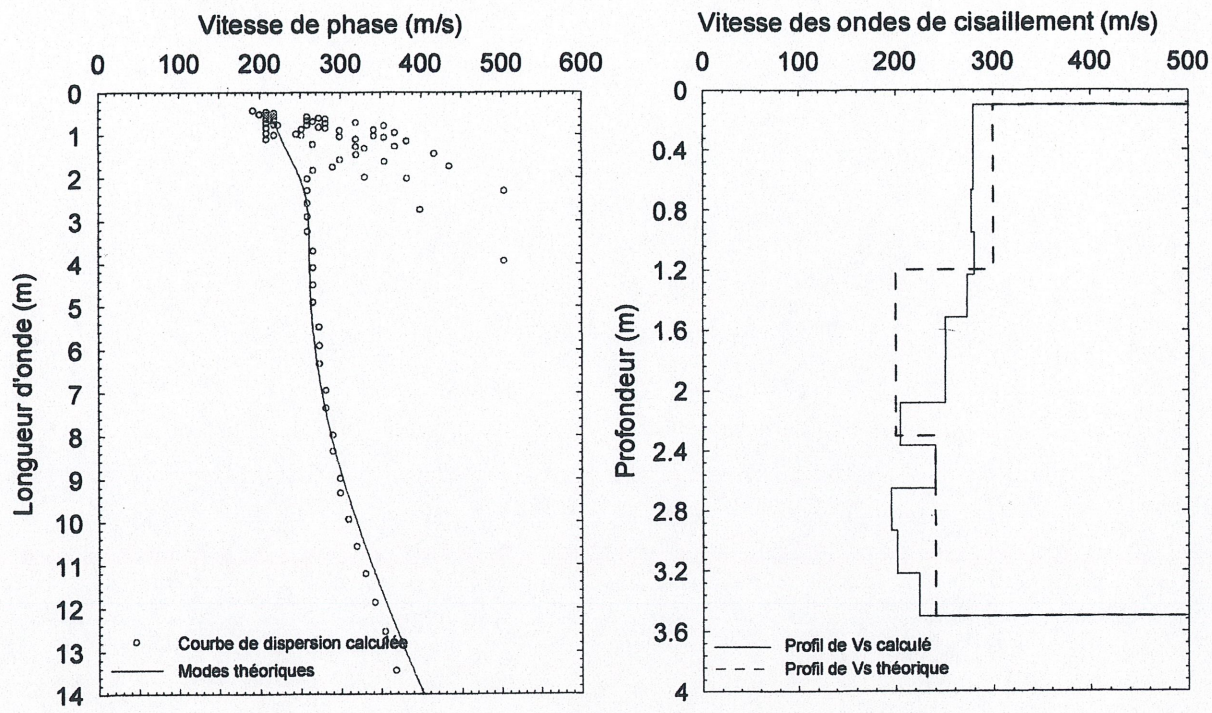
7.3.2 Profil 2

En se basant sur le profil 2 (simulation 19), plusieurs courbes de dispersion, ainsi que leur profils de vitesse correspondants, ont été obtenues (annexes 2b). Par la suite, tout comme le profil 1, une cavité carrée de 1 m a été introduite à partir de 3 m de l'axe de la source à une profondeur de 3.5 m (sur la limite inférieure rigide) (simulation 20). Les profils de dispersion et de vitesse sont rassemblés dans les annexes 3b.

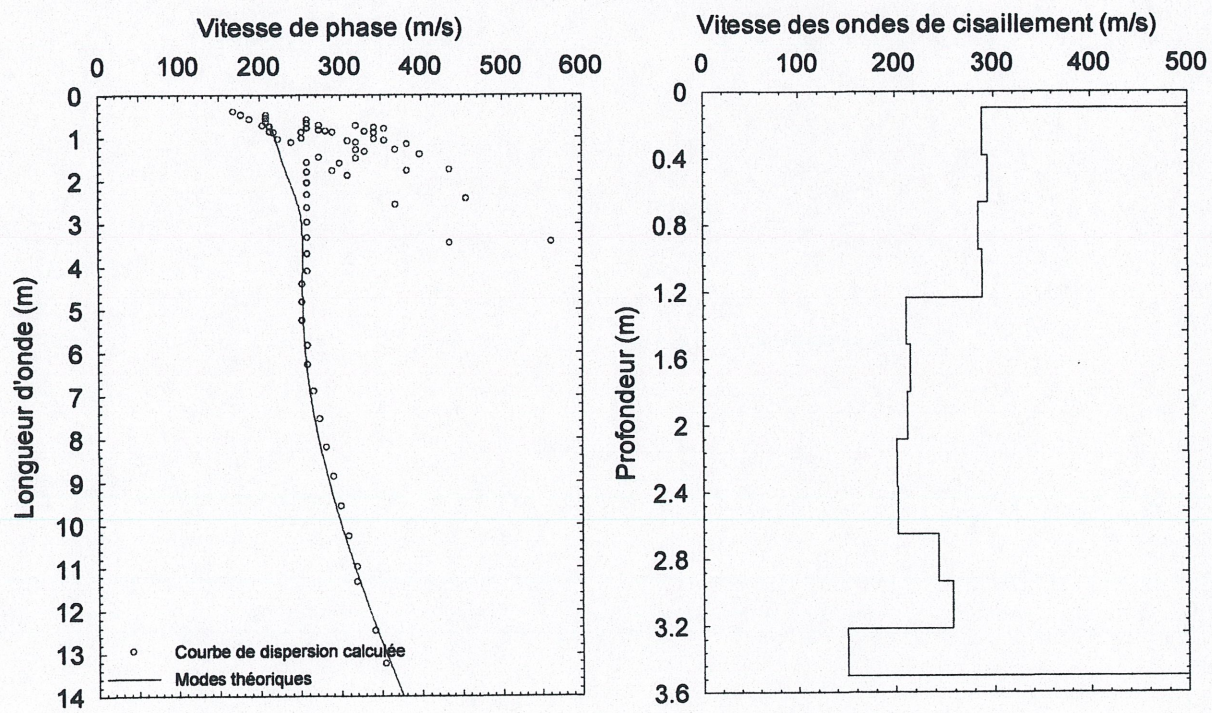
Deux profils types de cette simulation sont présentés dans la figure 7.4.

Avec ce type de profil (vitesse des ondes de cisaillement qui diminue en fonction de la profondeur) et en se basant sur les courbes de dispersion présentées en annexes 2b et 3b, le mode fondamental n'est pas très distingué pour des longueurs d'ondes ≤ 3 m. Donc comme dans le paragraphe précédent, la séparation des modes à faibles longueurs d'ondes apparaît déficiente.

Les profils tomographiques issus des profils de vitesses déterminés précédemment sont présentés dans la figure 7.5. Une certaine diminution de vitesse (< 150 m/s) est notée à l'endroit de la cavité, par rapport aux zones adjacentes. Une même tendance à une diminution de la vitesse à partir d'une certaine distance (5 à 6 m) de la source ainsi qu'une certaine longueur d'onde (profondeur) est aussi remarquée.



a) Profils sans cavité



b) Profils avec cavité

Figure 7. 4 Comparaison des courbes de dispersion ainsi que des profils de vitesse des ondes de cisaillement pour les simulations du profil 2 avec et sans cavité.

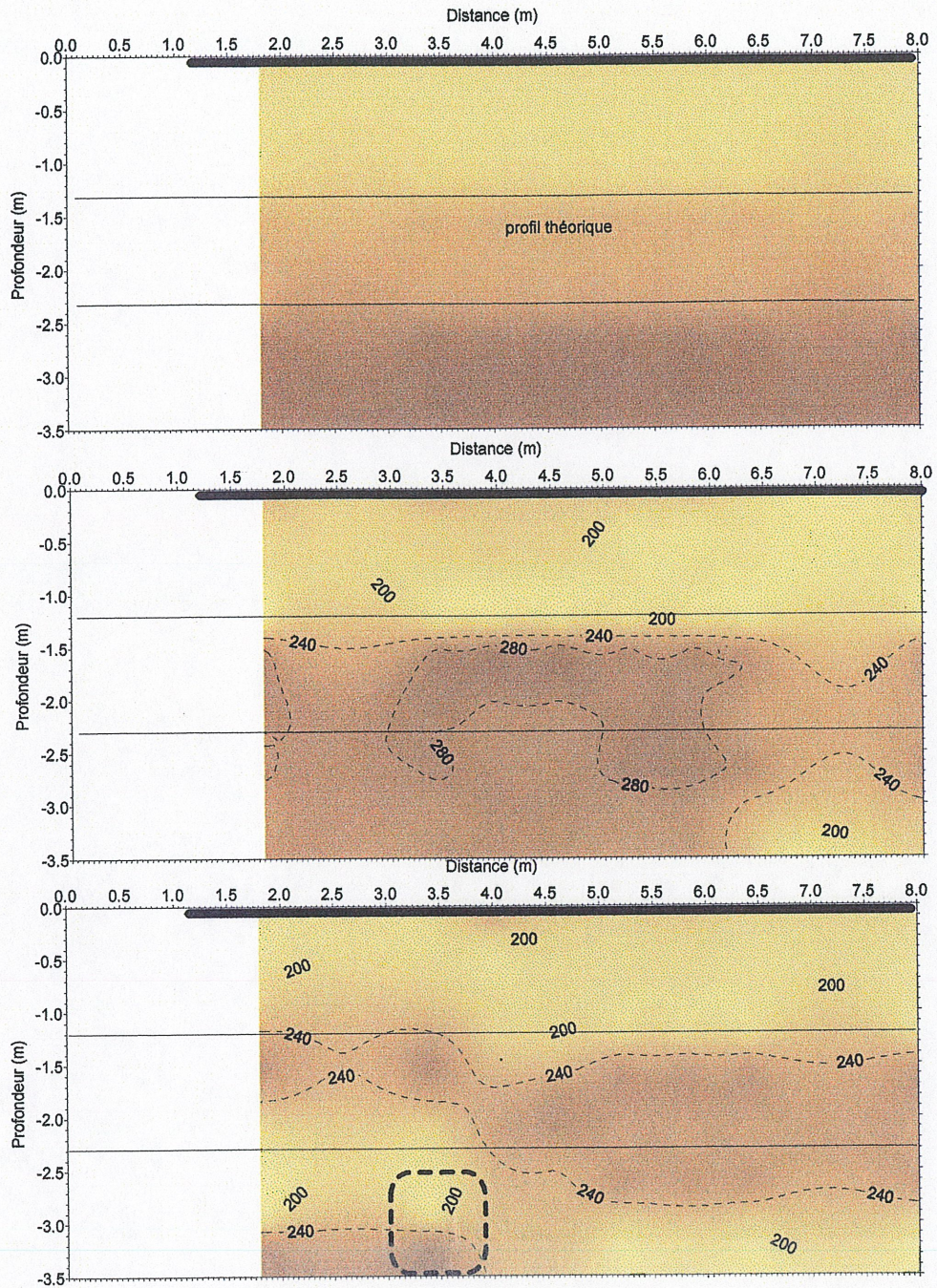


Figure 7.5 Courbes tomographiques du profil 2 : a) profil théorique, b) profil sans cavité déterminé à partir de la simulation et c) profil avec cavité

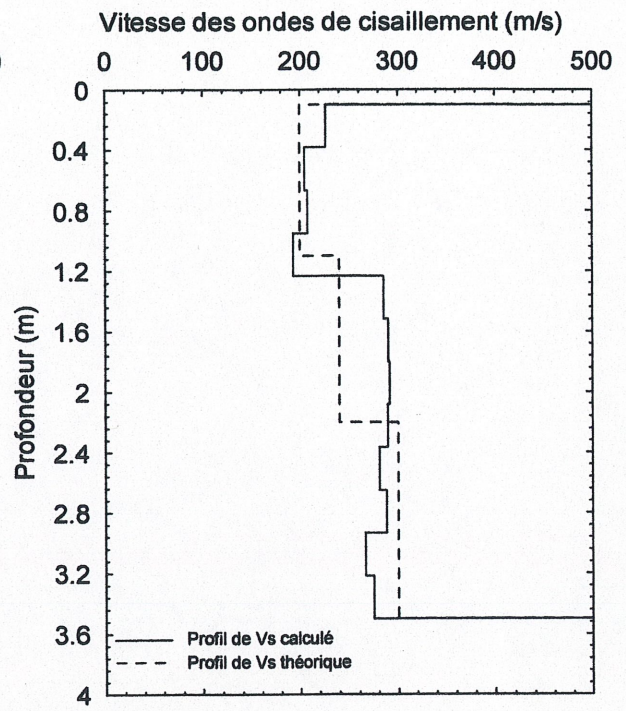
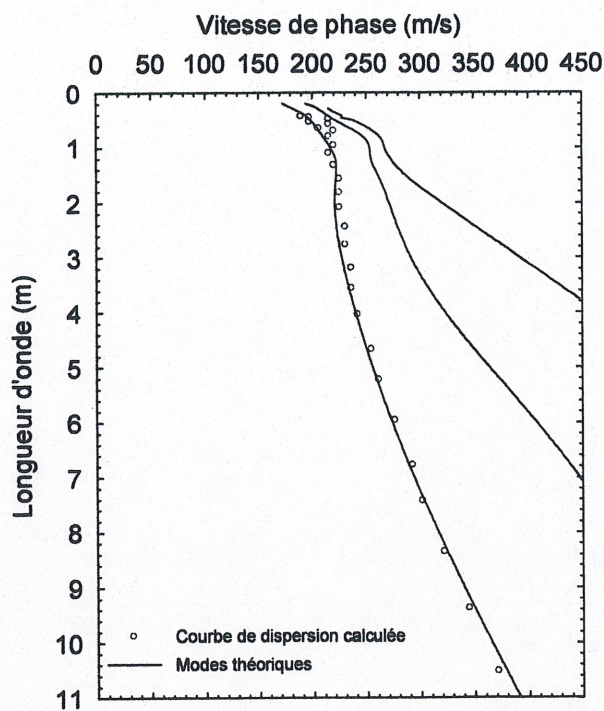
7.3.3 Profil 3

En partant du profil 3 (simulation 21), plusieurs courbes de dispersion, ainsi que leur profils de vitesse correspondants, ont été obtenues (annexes 2c). Par la suite, tout comme le profil 1 et le profil 2, une cavité carrée de 1m a été introduite à partir de 3 m de l'axe de la source à une profondeur de 2.5 à 3.5m (sur la limite inférieure rigide) (simulation 22). Les profils de dispersion et de vitesse sont rassemblés dans les annexes 3c.

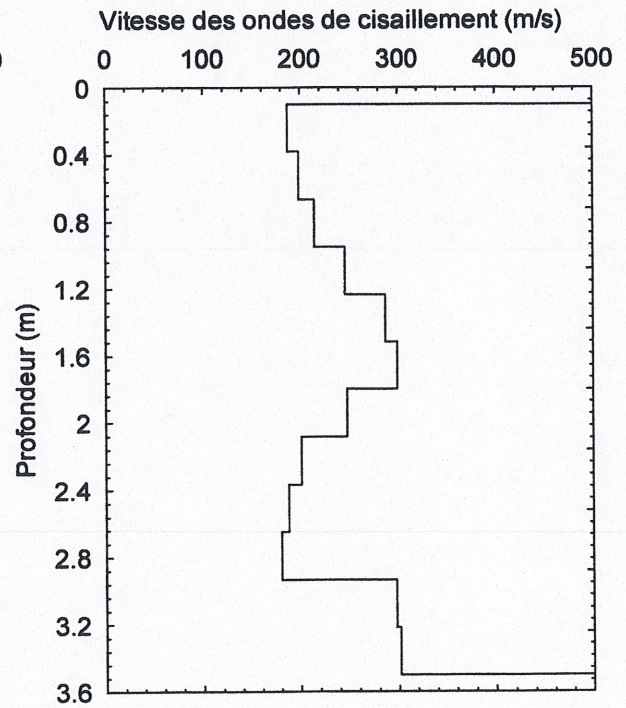
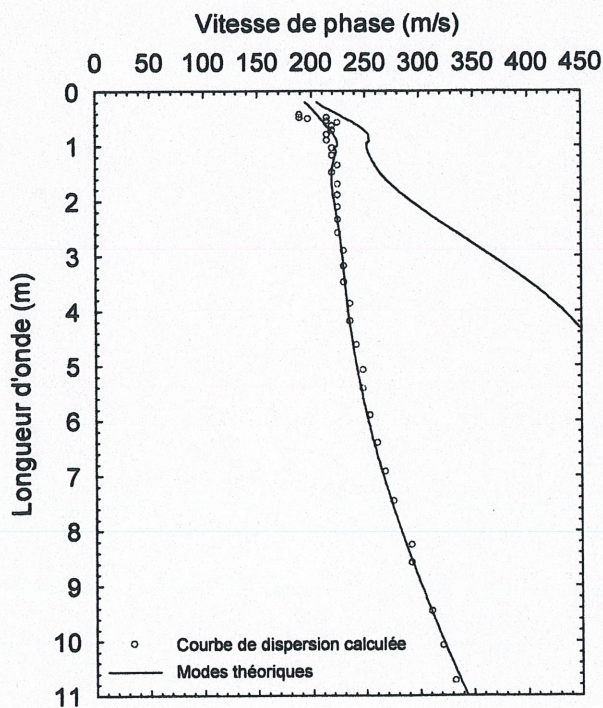
Deux profils types pour cette simulation sont aussi présentés à la figure 7.6. Les profils tomographiques issus des profils de vitesses ainsi déterminés sont présentés dans la figure 7.7. La cavité apparaît détectable sur la figure 7.6 (zone encerclée).

Contrairement aux deux cas précédents (profil 1 et profil 2), les courbes de dispersion (annexes 2c et 3c) correspondent bien aux modes théoriques. Ce type de profil où la vitesse des ondes de cisaillement augmente avec la profondeur, semble donc plus facile à traiter avec la méthode MASW. Dans la réalité, ce type de profil est le plus représentatif des conditions réelles.

Une même tendance à une diminution de la vitesse à partir de 6.5 m environ de distance de la source ainsi qu'à une profondeur d'environ 3 m reste présente.



a) Profils sans cavité



b) Profils avec cavité

Figure 7. 6 Comparaison des courbes de dispersion ainsi que des profils de vitesse des ondes de cisaillement pour les simulations du profil 3 avec et sans cavité.

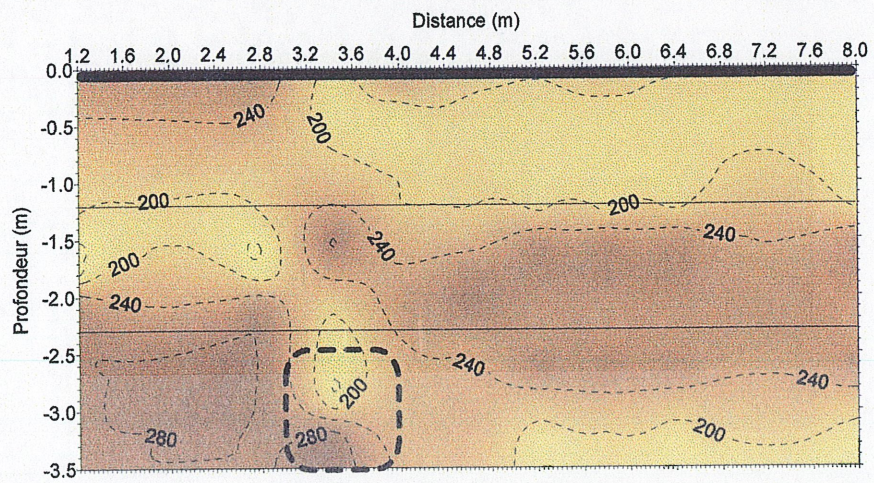
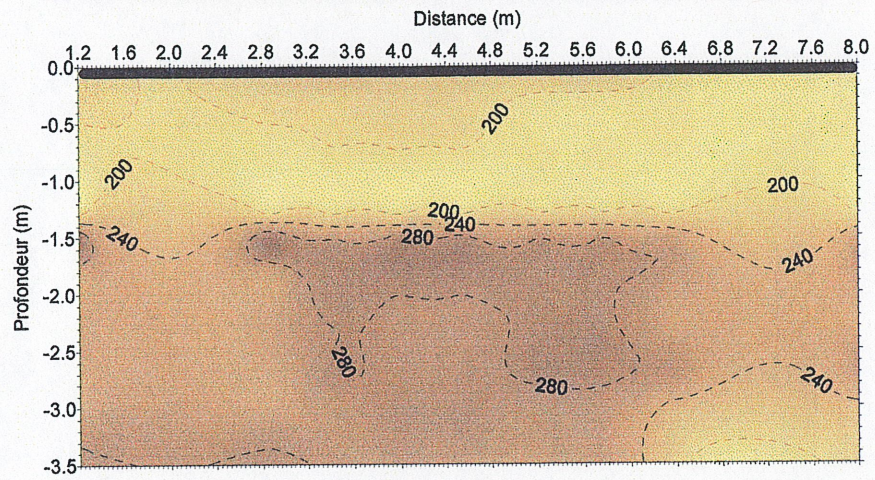
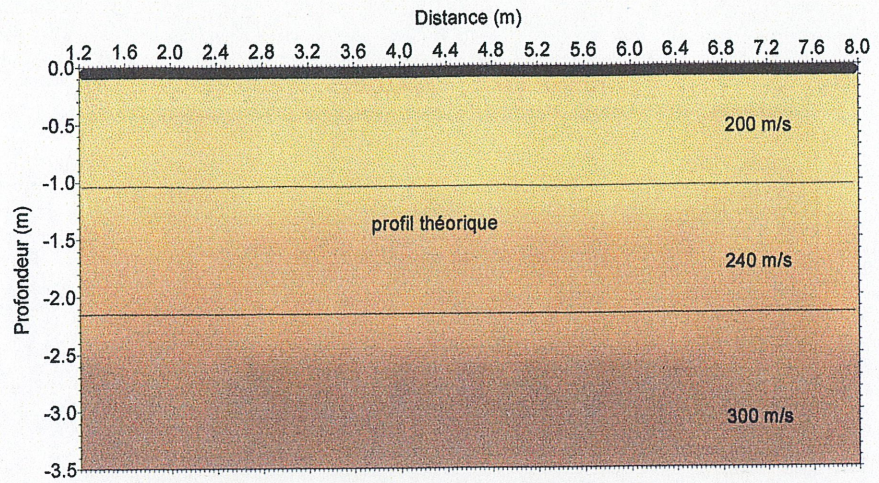


Figure 7.7 Courbes tomographiques du profil 3 : a) profil théorique, b) profil sans cavité déterminé à partir de la simulation et c) profil avec cavité

7.4 CONCLUSION

À travers ce chapitre 7 et en introduisant des cavités dans trois types de profils différents, la détection des cavités en utilisant la méthode MASW a pu être testée. Avec tous les types de profils considérés, la solution permet de localiser, de façon plus ou moins précise, l'endroit de la zone de faiblesse introduite. Cependant, avec certains profils, le contraste de vitesse demeure faible et la détection de zone de faiblesse aussi restreinte pourrait être difficile. Le traçage des profils tomographiques demeure toutefois un moyen très utile permettant de bien visualiser la distribution générale des vitesses des ondes de cisaillement en fonction de la profondeur.

CHAPITRE 8

ÉTUDE DE CAS

8.1 CHOIX DES SITES

Le but du présent chapitre vise à tester la méthode de reconnaissance sismique MASW, sur les structures de chaussées, avec la nouvelle configuration (excitation à côté du pavage au lieu de dessus). La première étape consistait à la prise de données sur des sites cibles (zones à risque) désignés par le Ministère des Transports du Québec.

Des relevés MASW ont été réalisés à deux sites dans le cadre de ce projet, soit à Sherbrooke le 30 novembre 2000 et à Sainte-Agathe le 31 octobre 2001. Les lignes à chacun de ces sites sont localisées sur les figures 8.1 et 8.2. Pour le premier site (à Sherbrooke) une des lignes (ligne 1) est dans l'axe du ponceau alors que la ligne 2 est parallèle au ponceau mais à une distance de 8 m sur la ligne centrale afin de déterminer les caractéristiques des sols non affectés par le ponceau. Le deuxième site, quant à lui, n'avait pas de ponceaux et les lignes ont été choisies en forme de zigzag afin de couvrir le maximum de surface à investiguer.

8.2 RÉSULTATS MASW AU SITE DE SHERBROOKE

La configuration des essais MASW sur chacune des deux lignes d'essais du site de Sherbrooke est présentée à la figure 8.3. Quatre essais MASW ont été réalisés sur chacune des lignes pour un total de huit à ce site. Chaque essai MASW comportait 16 signaux obtenus à des intervalles de 0.2 m, 64 signaux sont donc disponibles sur une ligne d'essai. Ces signaux ont été regroupés de façon à permettre la détermination de six profils de vitesse, comme montrés à la figure 8.3.

Les profils obtenus pour la ligne 1 sont à l'annexe 4 sous forme d'un tableau qui présente, pour chaque intervalle de profondeur, la vitesse de propagation des ondes de surface de cisaillement, le module de Poisson et le module de cisaillement à petite déformation.

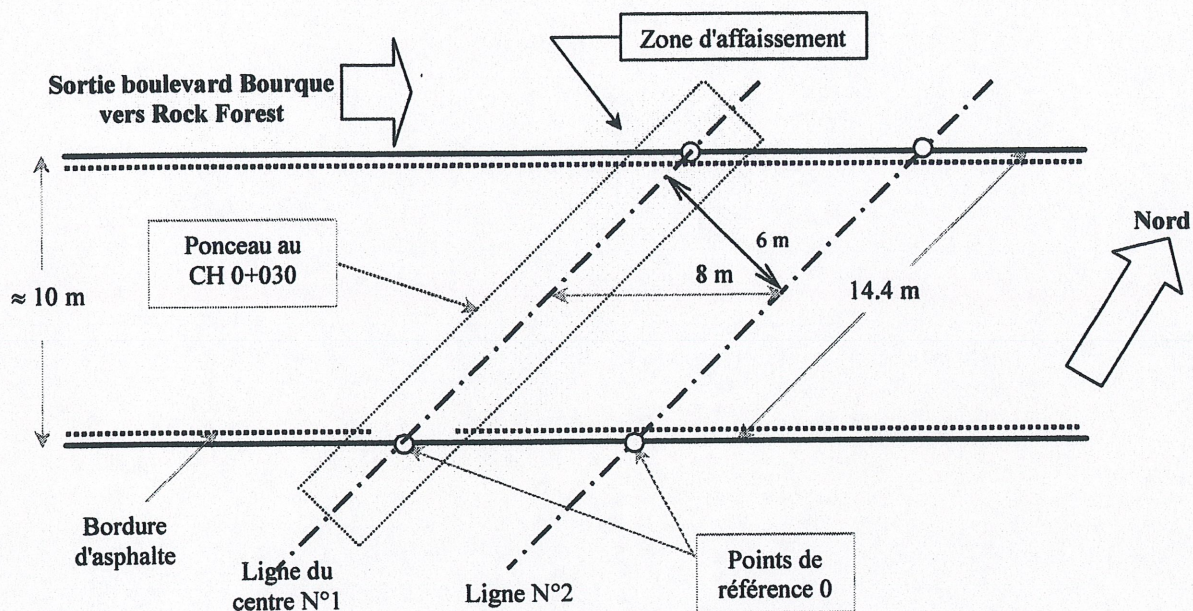


Figure 8. 1 Localisation des essais MASW sur la sortie Boulevard Bourque – Chaînage 0+030

Les profils de vitesse sont présentés à l'annexe 5 aux figures A5.1 à A5.6 avec les courbes de dispersion pour les différents modes. Les courbes de dispersion expérimentales obtenues après traitement des signaux MASW sont, sur ces figures, comparées aux modes théoriques, c'est-à-dire aux courbes de dispersion théorique pour les différents modes calculés à partir du profil de vitesse présenté. La tomographie des sols en termes de vitesse établie à partir des six profils de vitesse au-dessus du ponceau (Ligne 1) est présentée à la figure 8.4.

Les profils de vitesse obtenus à partir de la ligne 2 sont présentés à l'annexe 6 aux figures A6.1 à A6.6 avec les courbes de dispersion pour les différents modes. Les courbes de dispersion expérimentales obtenues après traitement des signaux MASW et en appliquant les corrections dues au pavage (chapitre 6) sont comparées sur les figures suivantes :

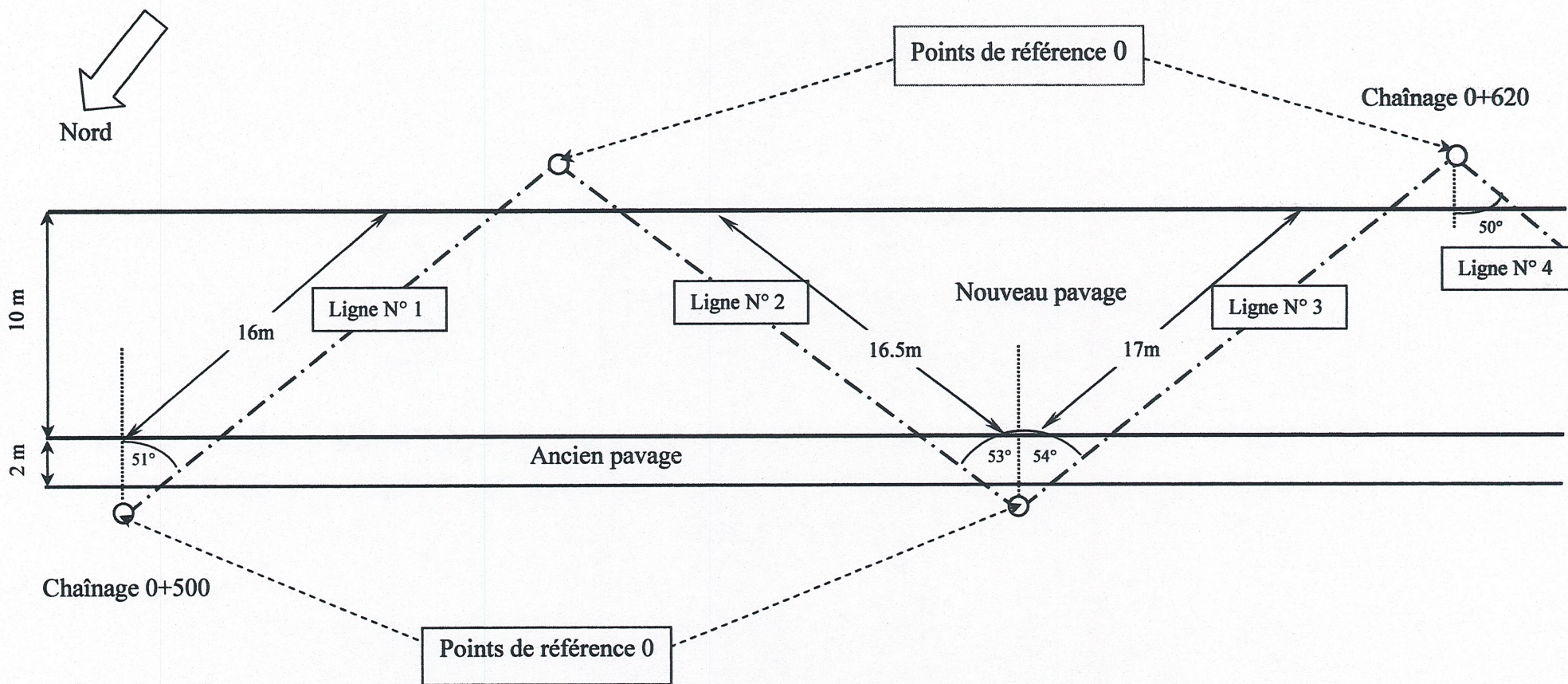


Figure 8. 2 Localisation des essais MASW sur l'autoroute 15 Nord –chaînages 0+500 – 0+560 – 0+620

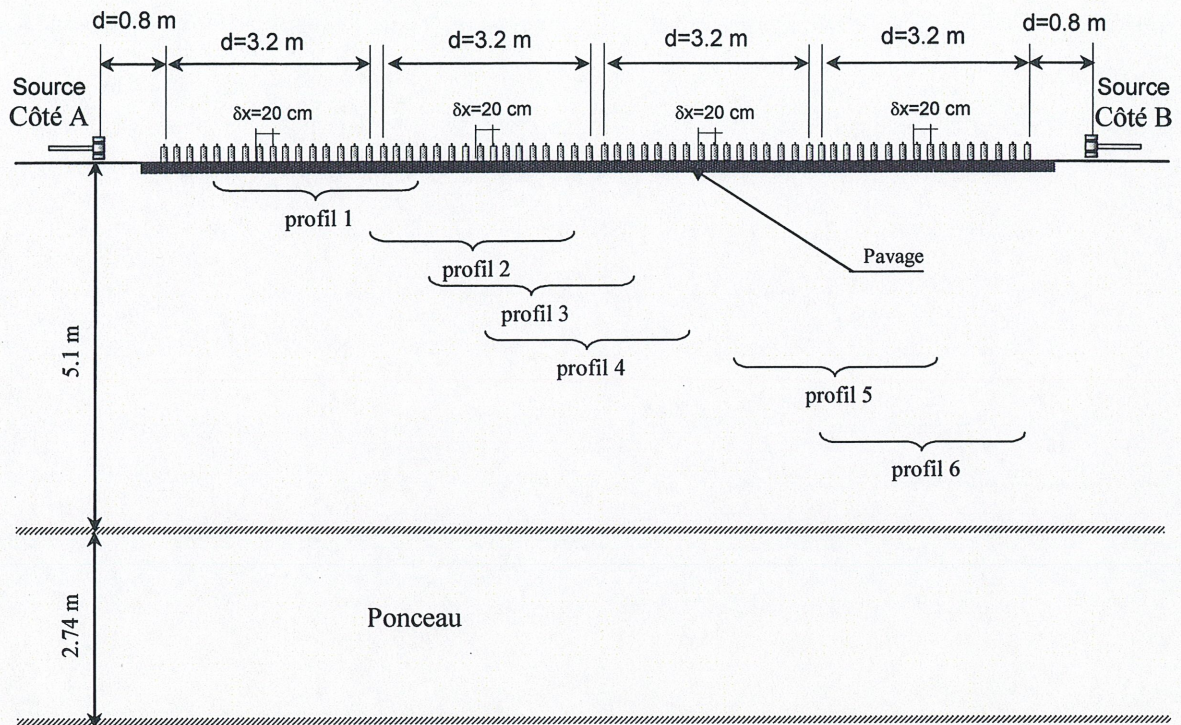


Figure 8. 3. Configuration des essais MASW effectués sur la sortie Boulevard Bourque à Sherbrooke.

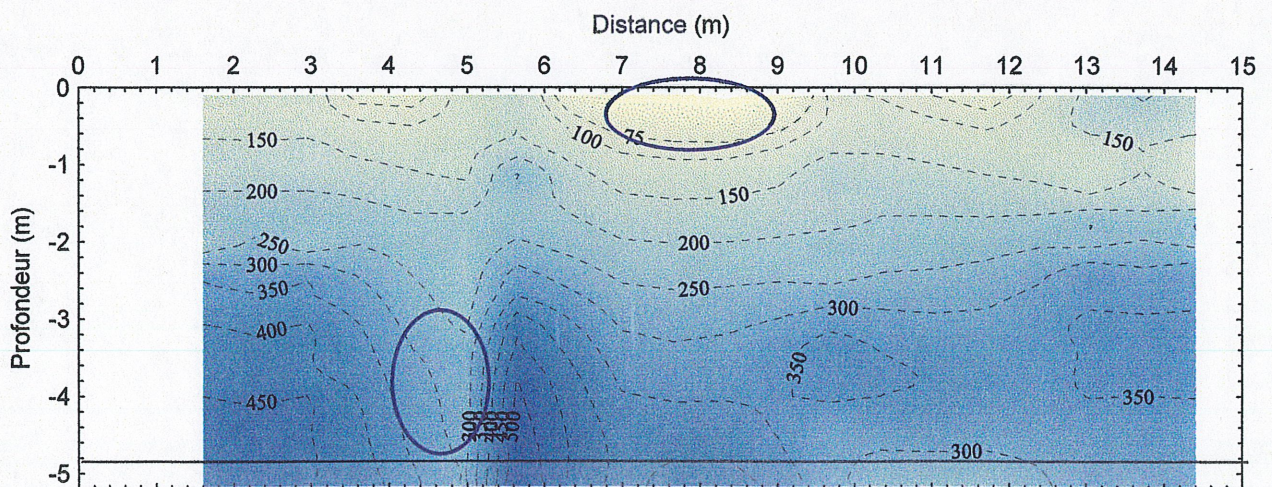


Figure 8. 4 Tomographie de vitesses des ondes de cisaillement déterminée sur la ligne 1 située au dessus du centre du ponceau au chaînage 0+030 sur la sortie Boulevard Bourque à Sherbrooke.

aux modes théoriques, c'est-à-dire aux courbes de dispersion théorique pour les différents modes calculés à partir du profil de vitesse présenté. La tomographie des

sols en termes de vitesse établie à partir des six profils de vitesse assez loin du ponceau (Ligne 2) est présentée à la figure 8.5.

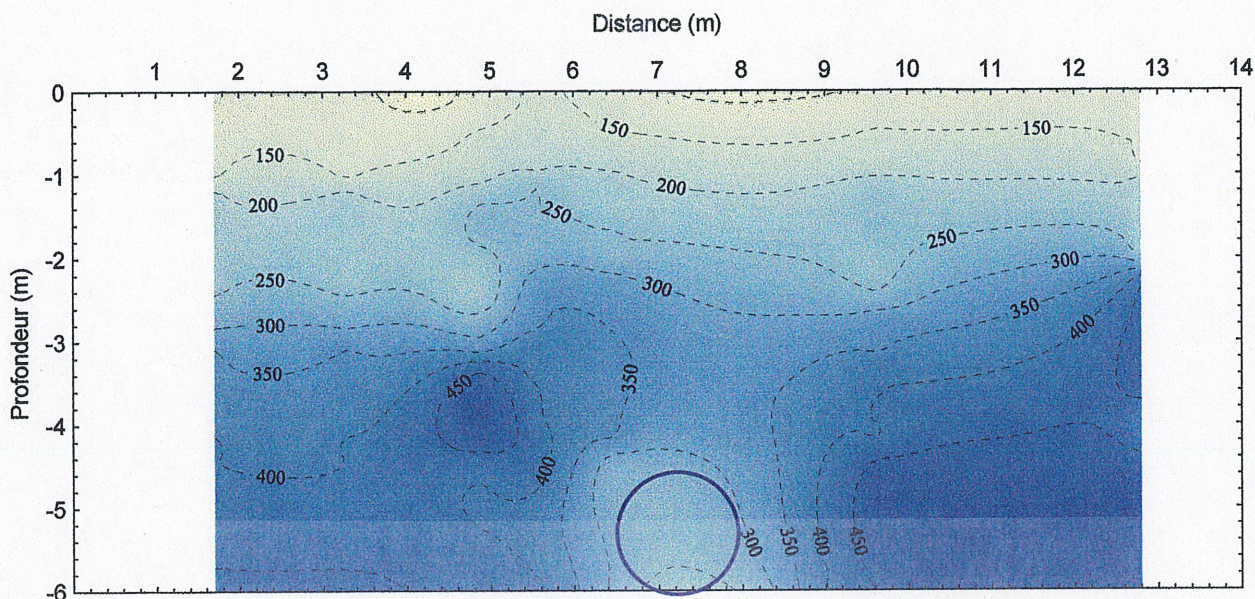


Figure 8. 5 Tomographie de vitesses des ondes de cisaillement déterminée sur la ligne 2 située au dessus du centre du ponceau au chaînage 0+030 sur la sortie Boulevard Bourque à Sherbrooke.

En examinant les figures 8.4 et 8.5, plusieurs remarques peuvent être dégagées :

- entre les profondeurs 0.5 m et 2 m, les deux profils sont sensiblement les mêmes (même vitesse des ondes de cisaillement),
- une zone superficielle de très faible vitesse (< 75 m/s) apparaît sur le profil 8.4 à environ 6 m de la source et s'étalant sur 3 m. Cette zone de faible vitesse pourrait être associée à une infiltration de sol en profondeur, et démontre à tout le moins une zone très lâche en dessous de la couche du pavage. Dans ce même profil, à un peu moins de 5 m de la source et à une profondeur de 3 à 4 m, une deuxième zone de faiblesse a pu être constatée (plus faible vitesse des ondes de cisaillement que les zones voisines). Cette zone pourra aussi correspondre à une infiltration de sol à travers les joints du ponceau,

- une zone profonde (de 5 à 6 m) d'assez faible vitesse est identifiable dans le profil 2 (figure 8.5) aux alentours de 7 m à partir de la source.

8.3 RÉSULTATS MASW AU SITE DE SAINTE-AGATHE

Quatre lignes ont été considérées pour la réalisation des essais MASW (Figure 8.2) afin de couvrir le maximum de la zone à investiguer.

Quatre essais MASW ont été réalisés sur la première et la quatrième ligne et huit essais sur la deuxième et la troisième ligne pour un total de vingt quatre à ce site. Chaque essai MASW comportait 16 signaux obtenus à des intervalles de 0.2 m, 384 signaux sont donc disponibles sur l'ensemble des lignes d'essai. Ces signaux ont été regroupés de façon à permettre la détermination de six profils de vitesse sur la ligne 1, seize sur la ligne 2, six sur la ligne 3 et sept sur la ligne 4.

La ligne 1 n'a été investiguée que du côté nord alors que la ligne 4 ne l'était que du côté sud.

Les profils obtenus pour les différentes lignes sont à l'annexe 11 sous forme de tableaux (A-11-1 à A-11-4) qui présentent, pour chaque intervalle de profondeur, la vitesse de propagation des ondes. Les courbes de dispersion expérimentales obtenues après traitement des signaux MASW sont, sur ces figures, comparées aux courbes de dispersion théorique pour les différents modes calculés à partir du profil de vitesse présenté. La tomographie des sols en termes de vitesse établie à partir des profils de vitesse (Lignes 1, 2, 3 et 4) est présentée à la figure 8.6.

Les profils de vitesse obtenus à partir des différentes lignes sont présentés aux annexes 7, 8, 9 et 10 aux figures A7 à A10 avec les courbes de dispersion pour les différents modes.

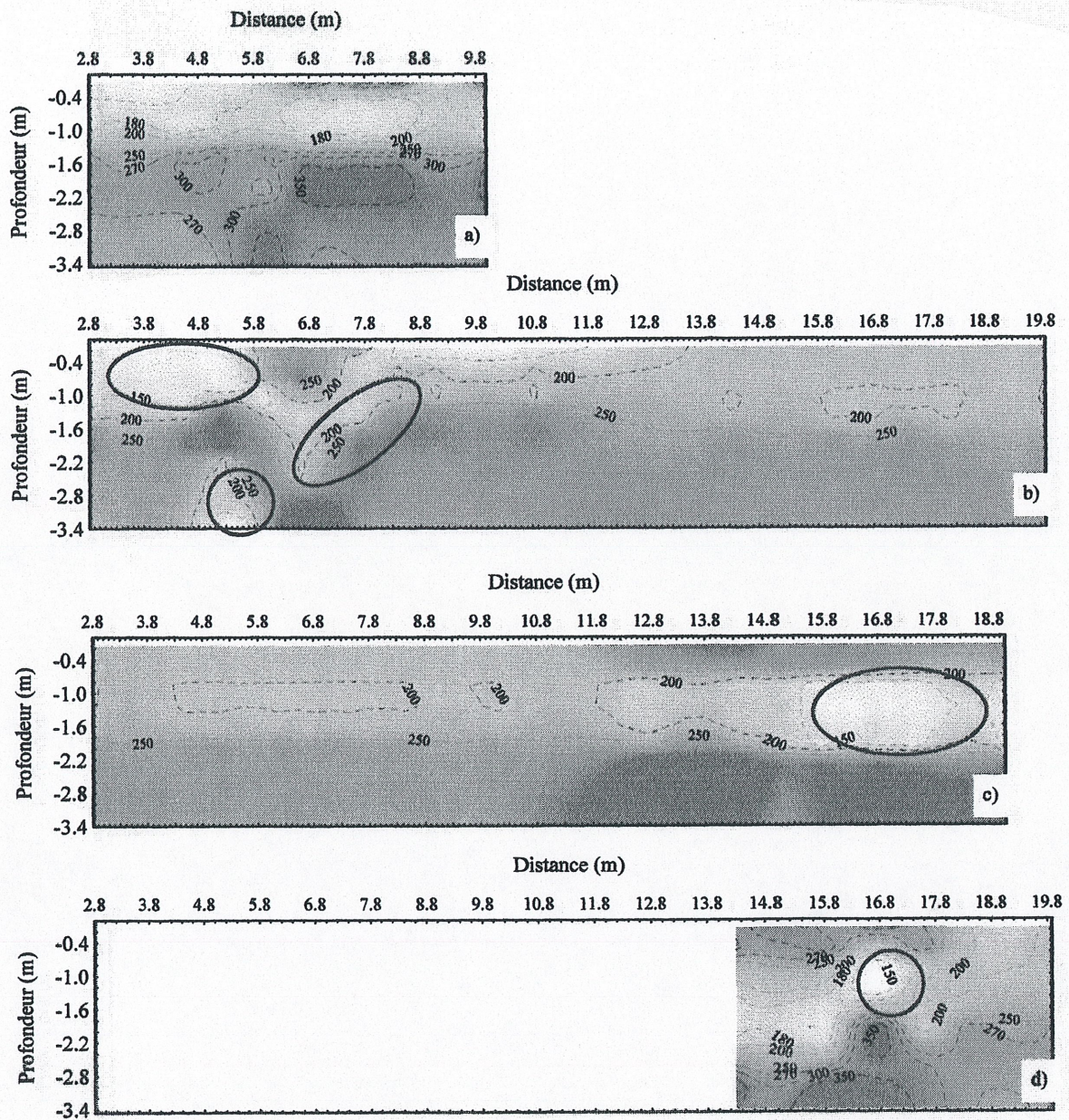


Figure 8. 6 Tomographie de vitesses des ondes de cisailment déterminée sur : a) la ligne 1 du côté nord, b) la ligne 2, c) la ligne 3 et d) la ligne 4 du côté sud située sur l'autoroute 15 nord, chaînage 0+500 à 0+620

En examinant les tomographes de la figure 8.6, plusieurs remarques peuvent être dégagées :

- Le profil 1 du côté nord permet de distinguer deux couches plus ou moins homogènes : une première couche de surface d'épaisseur environ 1.5 m ayant des vitesses des ondes de cisailment allant de 150 à 200 m/s; et une deuxième

couche plus profonde, et plus dense, d'épaisseur 1.8 m ayant des vitesses des ondes de cisaillement de l'ordre de 250 à 300 m/s.

- Le profil 2 quant à lui présente des irrégularités dans son côté nord, jusqu'à environ 6 m à partir de la bordure extérieure du pavage (figure 8.2, zones encerclées et figure 8.7). Une première zone, superficielle, ayant des vitesses des ondes de cisaillement inférieures à 100 m/s et une autre zone plus profonde ayant des vitesses inférieures à 150 m/s sont facilement détectables. Ces zones de faibles vitesses, sont probablement des zones de faiblesse suite à des infiltrations de sol dans les enrochements de la fondation de la chaussée.
- Le profil 3 montre des vitesses plus ou moins homogènes allant de 200 à 300 m/s globalement. Sauf que du côté sud, à environ de 14 à 17m de la bordure nord du pavage, une zone de faible vitesse (<150 m/s, figure 8.6 et figure 8.7) est décelable. Cette zone pourrait aussi être reliée à une infiltration de sol. L'existence d'une telle cavité n'a pu être vérifiée sur le terrain due d'une part au manque de moyen et d'autre part à la difficulté qu'il y aurait à convaincre les autorités de sa nécessité.
- Le dernier profil (profil 4) du côté sud, présente une variation assez importante des vitesses des ondes de cisaillement avec une zone centrale (figure 8.2, région encerclée) de faible vitesse (<150 m/s, figure 8.6 et figure 8.7). Il est fort probable, que cette région investiguée, soit une zone à risque d'un point de vue infiltration de sol.

La figure 8.7 représente dans l'espace la localisation des principales zones de faiblesse identifiées précédemment à l'aide de la méthode MASW.

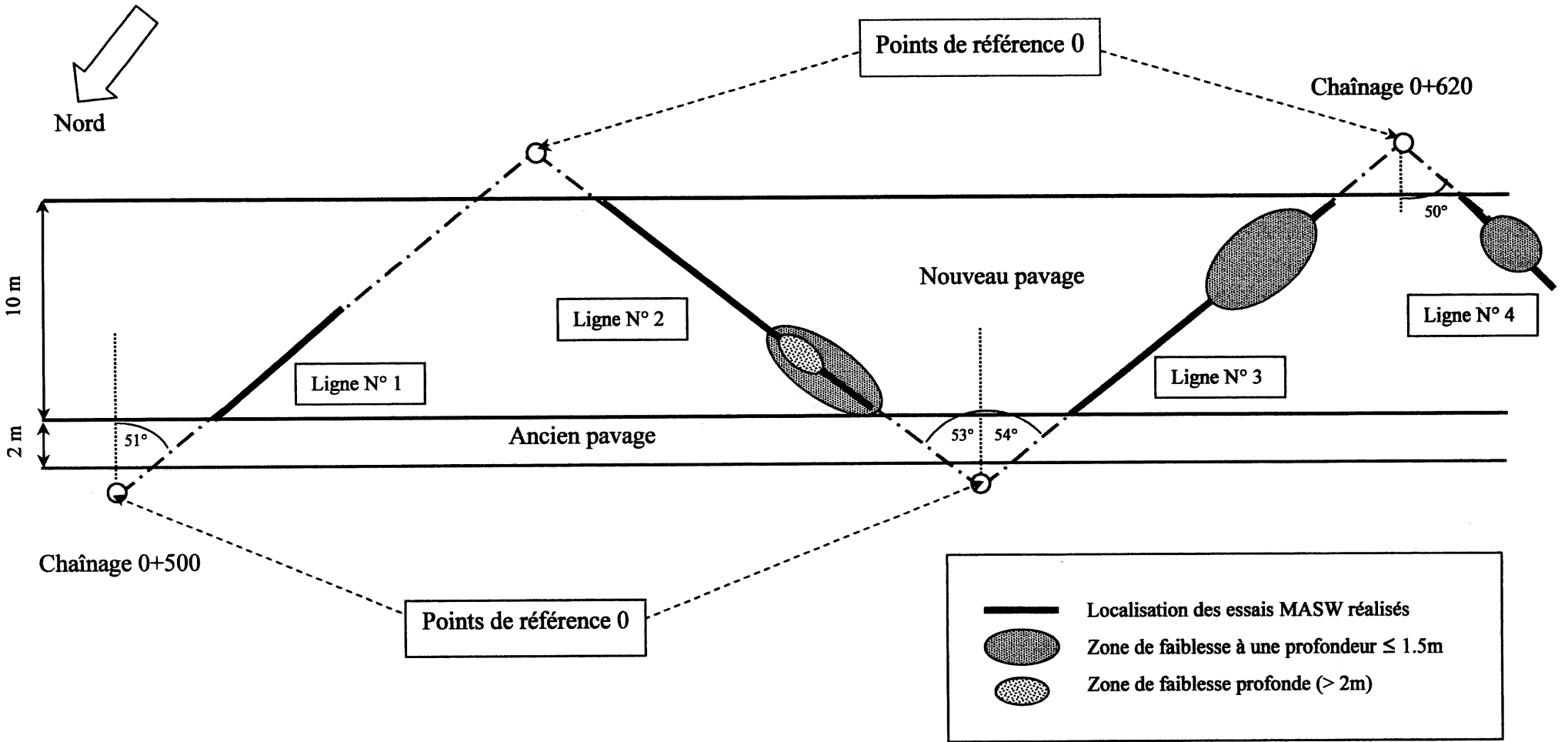


Figure 8. 7 Identification des zones de faiblesse sur l'autoroute 15 Nord –chaînages 0+500 – 0+560 – 0+620

CHAPITRE 9

CONCLUSIONS

Les objectifs principaux de cette étude étaient d'abord de tester l'applicabilité et l'efficacité de la méthode MASW, avec une nouvelle configuration (excitation à côté du pavage au lieu du dessus), sur les pavages afin de détecter les zones de faiblesse et de cavités et donc de prédire les risques d'affaissement des chaussées. Ensuite, de voir la possibilité d'investigation des structures de chaussées en profondeur.

L'examen des différents paramètres impliqués dans la caractérisation des sols en dessous des pavages, en appliquant la nouvelle configuration, permet de constater que :

- l'épaisseur du pavage n'intervient pas de façon significative dans le processus de dispersion et donc d'inversion, dans un intervalle de 7.5 à 15 cm d'épaisseur. Une valeur de 10 cm pourrait être assez représentative de la réalité;
- l'influence de la vitesse des ondes de cisaillement du pavage n'est pas très importante sur la dispersion;
- d'une façon générale, l'une des meilleures configurations MASW est celle qui laisse de 1 à 1.5 m entre la source et le premier capteur et 20 cm entre les différents capteurs;
- la couche de pavage engendre une certaine accélération des ondes de cisaillement traversants la structure des chaussées. Cette accélération se voit décroître en fonction de la profondeur pour se rapprocher du profil sans pavage à des grandes longueurs d'onde. La différence en terme de vitesse de phase entre les profils avec et sans pavage est une fonction sinusoïdale de la fréquence (ou $1/\lambda$ la longueur d'onde λ) et de la distance source/capteur ($x-x_0$) de la forme suivante :

$$\frac{dt}{dx} = A \cos\left(\frac{B}{\lambda}(x - x_0)\right) + C$$

La limite d'application de cette équation est comprise entre les fréquences 0 et 100 Hz et où la limite rigide inférieure est assez profonde (ponceau, roc...). De ce fait, en utilisant une source donnée, à l'extérieur du pavage (à côté), et en plaçant les capteurs sur la couche du pavage, les signaux enregistrés peuvent être corrigés dans le domaine temporel en partant de la formule développée pour donner à la fin des signaux normaux non accélérés (comme si le pavage n'existait pas). De cette façon, les profils de vitesses des ondes de cisaillement qui seront déterminés, seront plus proches de la réalité et donc plus représentatifs.

Cette étude a également testé cette nouvelle configuration de la méthode MASW pour la localisation de cavités ou zones de faiblesses pouvant se créer au dessous des pavages suite à des infiltrations ou pertes de sols (exemple dans les joints des ponceaux ou autre). Pour cela, trois types de profils, en dessous de la couche du pavage, ont été considérés dans des simulations numériques : un profil de trois couches dont la vitesse augmente en fonction de la profondeur, un autre profil d'une seule couche uniforme et un dernier profil multicouches dont la vitesse diminue en fonction de la profondeur. Dans un premier temps, l'étude numérique a été réalisée sans cavité; puis dans un deuxième temps, des zones de très faibles vitesses, de forme carrées de 1 m de côté, ont été introduites. Dans tous ces cas ainsi considérés, la différence au niveau des courbes de dispersion et au niveau des profils de vitesses des ondes de cisaillement (entre avec et sans cavité) est détectable. Il y a une diminution de la vitesse à l'endroit de la cavité considérée, mais le contraste de vitesse entre la zone de faiblesse et les zones voisines ou non affectées est assez faible.

Certains cas simulés ont montré une diminution de la vitesse des ondes de cisaillement à partir d'une certaine distance de la source (5 à 6 m) et d'une certaine longueur d'onde (> 3 m). Cette diminution ne dépasse généralement pas les 10 à 15% de la réalité.

L'un des problèmes rencontrés lors du processus de dispersion avec cette configuration de la méthode MASW, est qu'avec certains profils simulés, la séparation des modes devient un peu difficile pour les faibles longueurs d'onde (chapitre 7). Ce problème pourrait être dû à des vitesses de groupe très rapprochées pour les différents modes.

Une caractérisation in-situ a été réalisée sur deux sites différents afin de vérifier l'étude théorique qui a été faite. Un premier site à Sherbrooke, au dessus d'un ponceau, et un autre site à Sainte-Agathe où la fondation est un enrochement qui aurait causé des problèmes d'infiltration de sol en dessous du pavage. Dans les deux cas, les résultats MASW ont probablement permis d'identifier des zones de faiblesses détectables par rapport aux zones adjacentes, surtout après avoir fait les profils tomographiques. La limite inférieure rigide (roc, ponceau...) a été bien identifiée sur ces deux sites avec la méthode MASW. Les cavités identifiées dans les sites précédents n'ont pas pu être confirmées par des excavations ou forages sur le terrain dû d'une part au manque de moyen et d'autre part à la difficulté qu'il y aurait à convaincre les autorités de sa nécessité. Ce qui pourrait éventuellement être fait dans la suite de cette étude serait d'investiguer sur un site en construction ou en réhabilitation. En d'autres termes, il s'agirait de faire un test sur la chaussée existante. Puis détruire la chaussée et introduire une cavité (un ponceau par exemple), faire de nouveau le test. Enfin comparer les résultats des deux expérimentations.

Ces conclusions permettent de croire à une utilisation potentielle de la méthode sismique MASW dans le domaine d'investigation des structures de chaussées. Elle possède des avantages (méthode non intrusive, prise de données rapide) qui l'aideront à accroître son utilisation et sa fiabilité.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Al-Hunaidi M., O. (1992) *Difficulties With Phase Spectrum Unrapping in Spectral Analysis of Surface Waves Nondestructive Testing of Pavement*, Canadian Geotechnical Journal, 29(3), 506-511

Al-Hunaidi M., O. (1993) *Insights of the SASW Nondestructive Testing Method*, Canadian Journal of Civil eng., 20, 940-950

Al-Hunaidi M., O. (1994) *Analysis of Dispersed Multi-mode Signals of the SASW Method Using Multiple filter/crosscorrelation Technique*, Soil Dyn. And Earthquake Eng., 13(1), 13-24

Al-Hunaidi M., O. (1998) *Evolution-based Genetic Algorithms for Analysis of Non-destructive Surface Wave Tests on Pavements*, NDT&E International, 31 (4), 273-280

Al-Shayea, N. A., Woods, R. D., Gilmore, P. (1994) *SASW and GPR to Detect Buried Objects*, Proc. Symp. Application of Geophysics to Engrg. and Envir. Problems, EEGS, Wheat Ridge, Colo., 543-560

Auld, B. (1977) *Croo-hole and Downhole Vs by Mechanical Impulse*, Journal of Geotechnical Engineering Div., ASCE, 103(12), 1381-1398

Ballard, R.F., Jr (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.

Burger, C. P. and Testa, A. (1981) *Rayleigh Wave Spectroscopy to Measure the Depth of Surface Cracks*, In Proceedings of the Thirteenth Symposium on Non Destructive Evaluation, San Antonia, TX, 210-213

Glenn Jay Rix, (1988) *Experimental Study of Factors Affecting the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method*, Thèse de Doctorat, Université du Texas à Austin, USA, 315 p.

Gucunski, N., Ganji, V., Maher, A. (1986), *Effects of Obstacles on Rayleigh Wave Dispersion Obtained from the SASW Test*, Soil Dyn. And Earthquake Engrg., 15(4), 223-231

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., 300p.

Heukelom, W., et C. R. Foster, (1960), *Dynamic Testing of Pavements*, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 86 (SM1), 1-28

Hoar, R.J., et K.H. Stokoe, II, (1978), *Generation and Measurement of Shear Waves In-situ*, Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, American Society for Testing and Materials, 3-29

Hossain, M., Drnevich, V. P. (1989) *Numerical and Optimization Techniques Applied to Surface Waves for Backcalculation of Moduli*, Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM STP 1026, A. J. Bush III and G. Y. Baladi, eds, Am. Soc. For Testing and Mat., Philadelphia, Pa., 649-669

Imaram, I., Nazarian, S., Picornell, M. (1995) *Crack Detection Using Time Domain Wave Propagation Technique*, Journal of Geotech. Eng., 121(2), 198-207

John N. Louie (2001), *Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth From Refraction Microtremor Arrays*, Bulletin of the Seismological Society of America, 27 février

Jones, R., (1962) *Surface Wave Techniques for Measuring Elastic Properties and Thickness of Roads: Theoretical Development*, British Journal of Applied Physics, London, England, 13, 21-29

Karray, M., Lefebvre, G. (1996) *Évaluation des Propriétés Élastiques des Planches d'Essai (Montréal) à l'Aide de la Méthode SASWp*, Rapport GÉO-96-02, 21 p.

Karray, M. (1999) *Utilisation de l'Analyse Modale des Ondes de Rayleigh comme Outil d'Investigation Géotechnique in-situ*, Thèse de doctorat en sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec Canada, 289p.

Karray, M., Lefebvre, G. (1994) *Application de la Méthode SASW à l'Investigation des Barrages en Remblai*, Rapport présenté à Hydro-Québec GÉO-94-04, 169p.

Karray, M., Lefebvre, G. (2000) *Caractérisation du Revêtement de Béton dans le Tunnel du Mont-Blanc à l'Aide de la Méthode MASW*, Rapport présenté à Dr René Michel Faure CETU, 71p.

Lacroix, A. (1992) *Étude de la méthode sismique non intrusive SASW*, Thèse de Maîtrise en sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec Canada.

Lefebvre, G., Karray, M., (1998) *New Developments in in-situ Characterization Using Rayleigh Waves*, 51^e Canadian Géotechnical Conference, Edmonton, Alberta, Canada, 2. 821-828.

Lysmer, J., Waas, G. (1972) *Shear Waves in Plane Infinite Structure*, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 98, 85-105.

Nazarian, S., Stokoe, K. H. II, Hudson, W. R. (1983) *Use of Spectral Analysis of Surface Waves Method for Determination of Moduli and Thickness of Pavement Systems*, Transportation Research Record, No. 930, 38-45.

Nazarian, S., Stokoe, K. H. (1985) *In-situ Determination of Elastic Moduli of Pavement Systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method (practical aspects)*, Research Report 368-1F, Center for Transportation Research, Université, du Texas Austin, Texas, É. U., 161 p

Richard D. Miller, Jianghai XIA, Choon B. Park, et Julian M. Ivanov (1999) *Multichannel Analysis of Surface Waves to Map Bedrock*, Kansas Geological Survey, Lawrence, Kansas, U.S.

Rix, G. J., Bay, J. A., Stokoe, K. H., (1990) *Assessing In-situ Stiffness of Curing Portland Cement Concrete With Seismic Tests*, Paper Presented to Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D. C., January.

Roesset, J. M., Chang, D., W., Stokoe, K. H., II, Aouad, M. (1989), *Modulus and Thickness of the Pavement Surface Layer from SASW Tests*, Transportation Research Record, No. 1260, 53-63.

Sanchez-Salintero, I., Roesset, J. M., Shao, K., Y., Stokoe, K., H., II, Rix, G. J., (1987) *Analytical Evaluation of Variables Affecting Surface Waves Testing of Pavements*, Transportation Research Record, No. 1136. 86-95.

ANNEXE 1

**COURBES DE DISPERSION DES SIMULATIONS
1 À 8**

Annexe 1

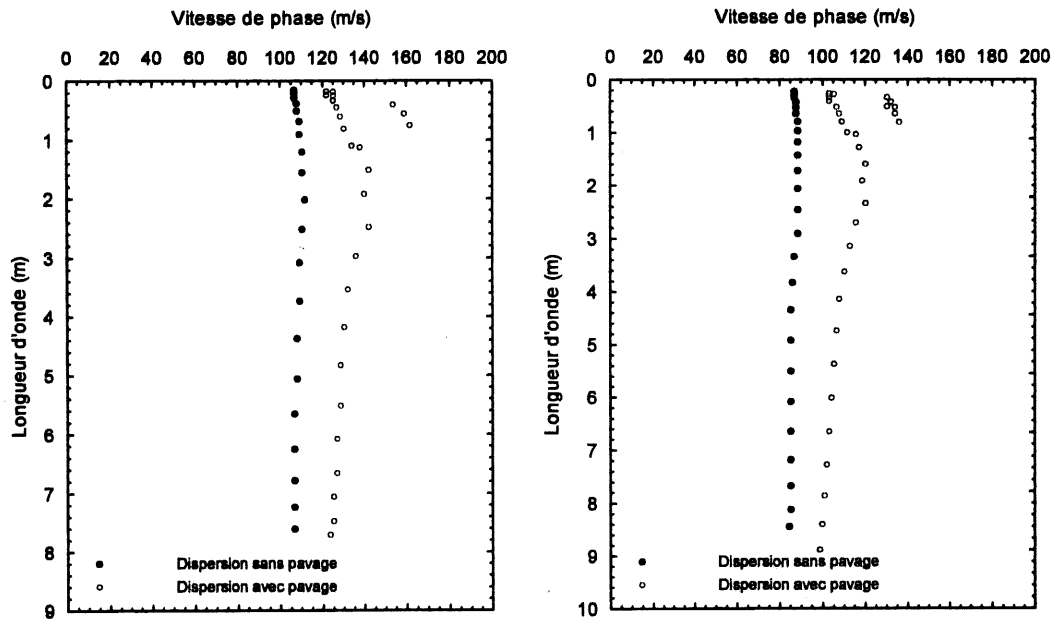


Figure A1-1 Comparaison des courbes de dispersion avec pavage aux courbes sans pavage
 a) vitesse du pavage 1200 m/s et vitesse de la couche 120 m/s, b) vitesse du pavage 1200 m/s et
 vitesse de la couche 96 m/s.

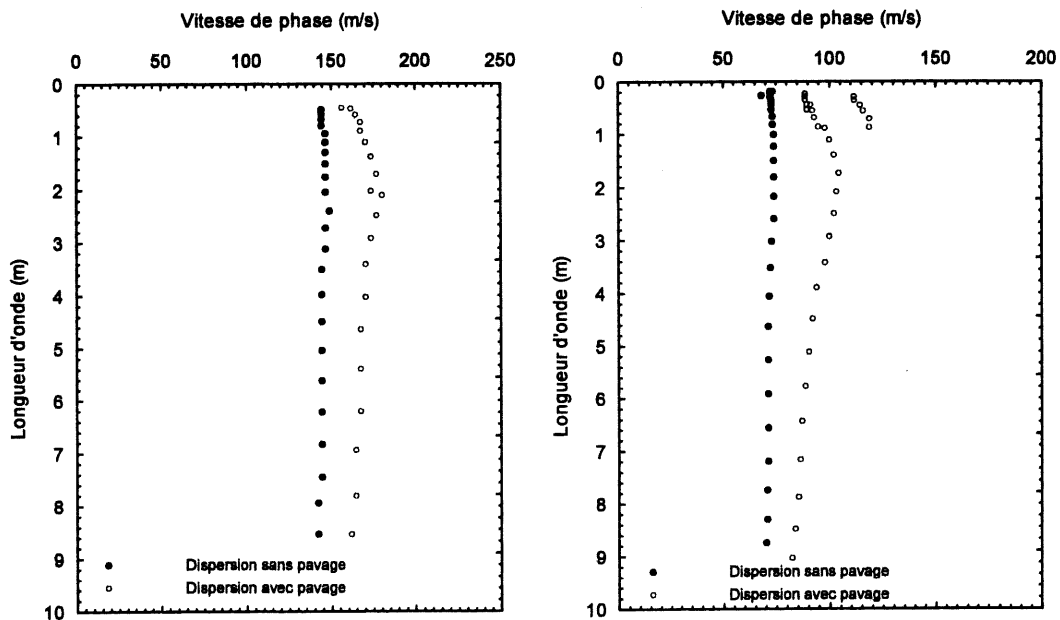


Figure A1-2 Comparaison des courbes de dispersion avec pavage aux courbes sans pavage
 a) vitesse du pavage 1200 m/s et vitesse de la couche 160 m/s, b) vitesse du pavage 1200 m/s
 et vitesse de la couche 80 m/s.

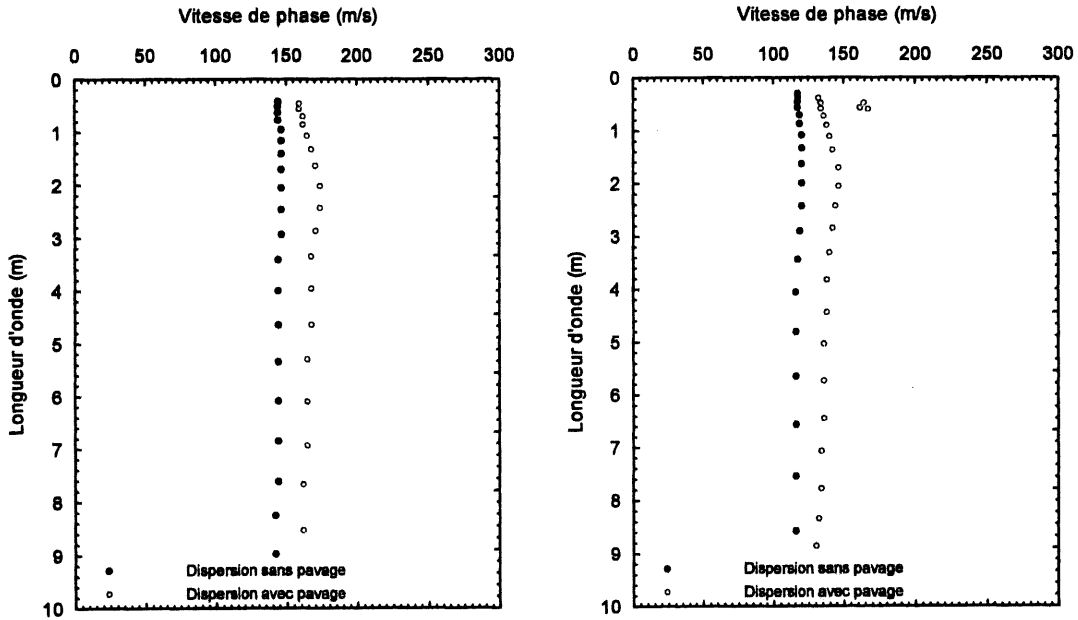


Figure A1-3 Comparaison des courbes de dispersion avec pavage aux courbes sans pavage
 a) vitesse du pavage 975 m/s et vitesse de la couche 160 m/s, b) vitesse du pavage 975 m/s et
 vitesse de la couche 130 m/s.

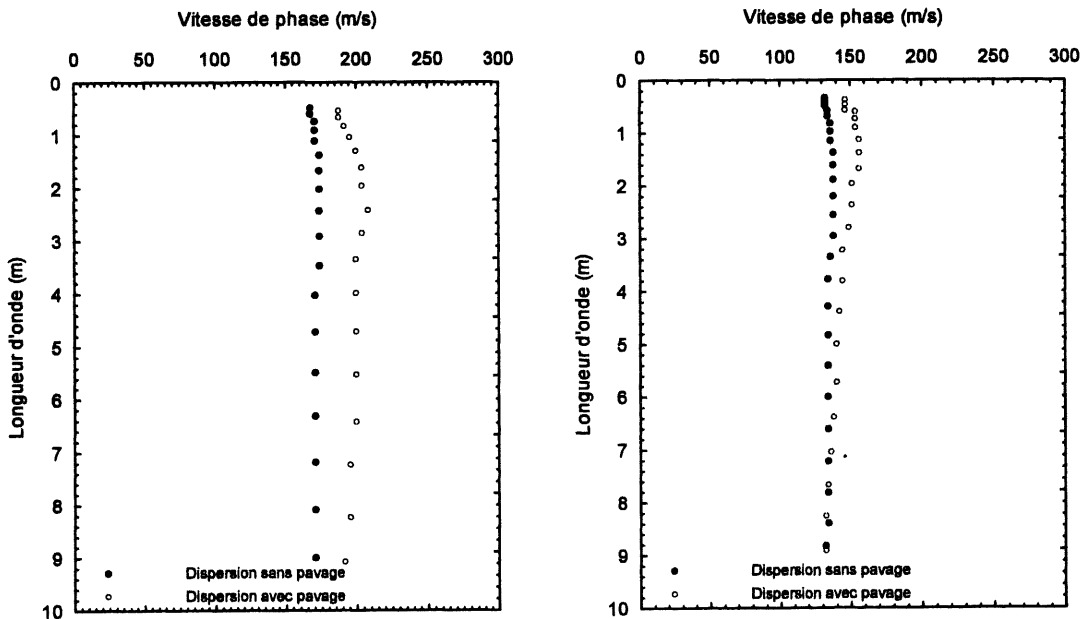


Figure A1-4 Comparaison des courbes de dispersion avec pavage aux courbes sans pavage
 a) vitesse du pavage 1425 m/s et vitesse de la couche 190 m/s, b) vitesse du pavage
 1500 m/s et vitesse de la couche 150 m/s.

ANNEXE 2

**COURBES DE DISPERSION ET PROFILS DES VITESSES DES
ONDES DE CISAILLEMENT DES PROFILS SANS CAVITÉ 2A,
2B ET 2C**

Annexes 2a

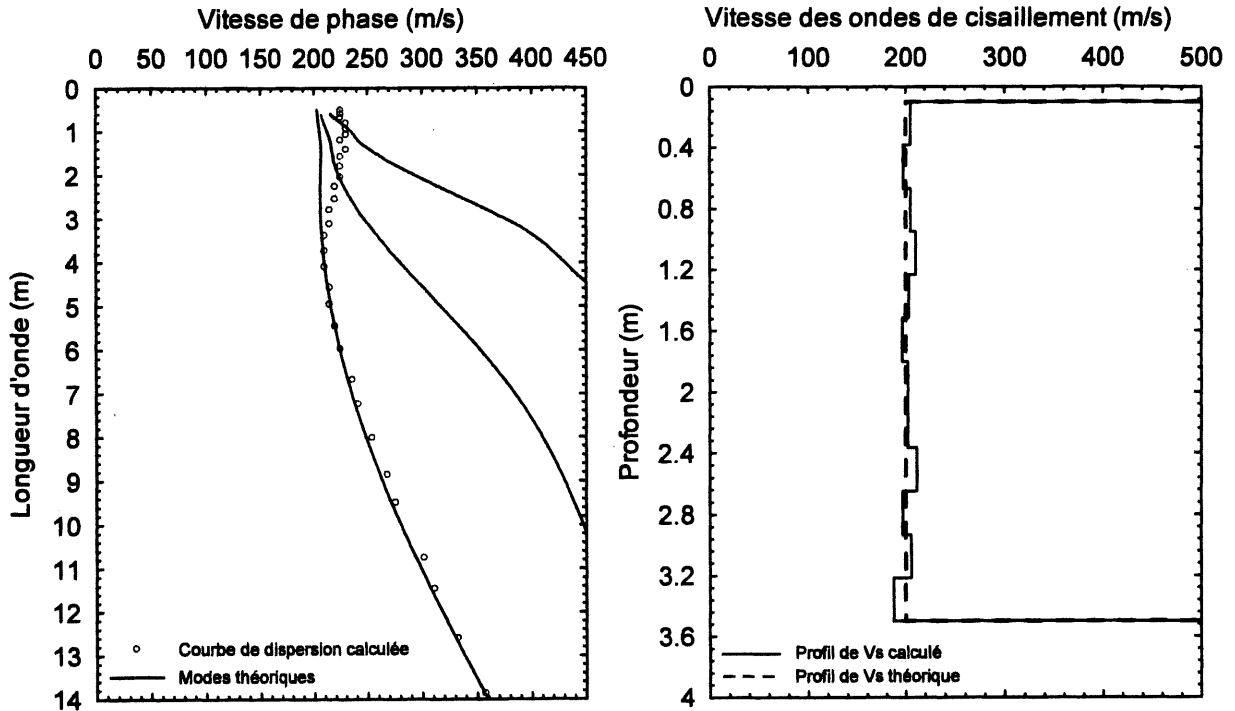


Figure A2a.1 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 1.8 m.

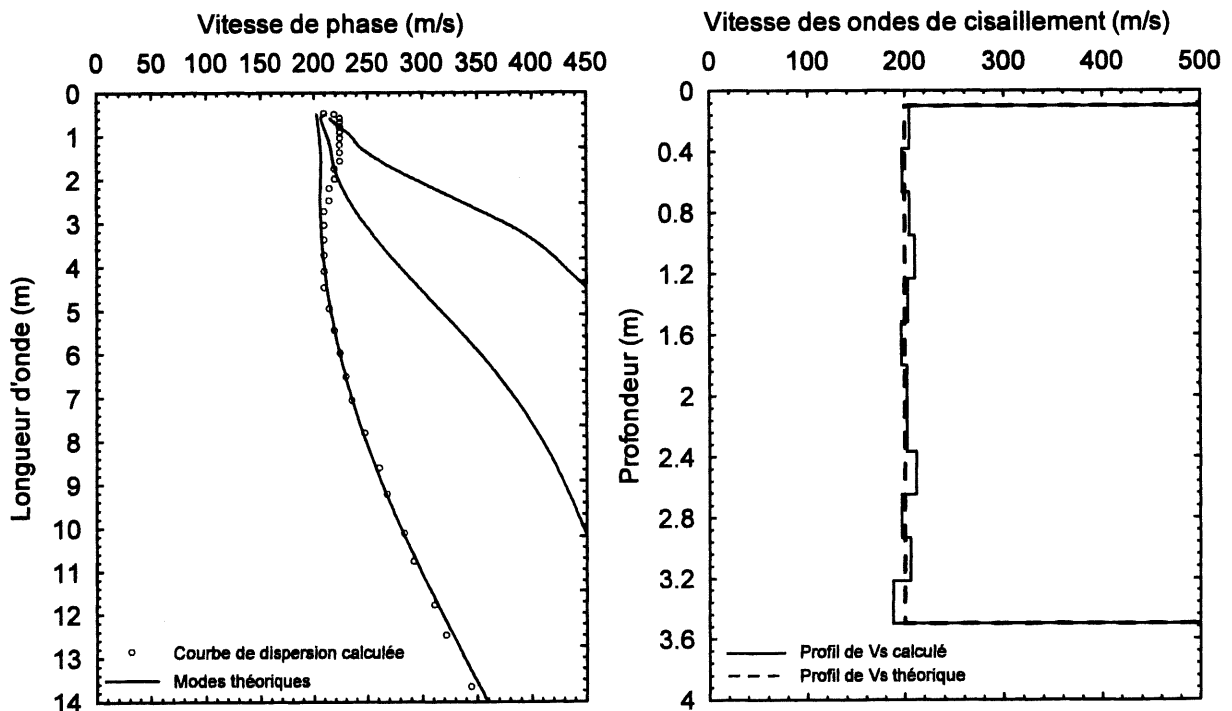


Figure A2a.2 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 2.4 m.

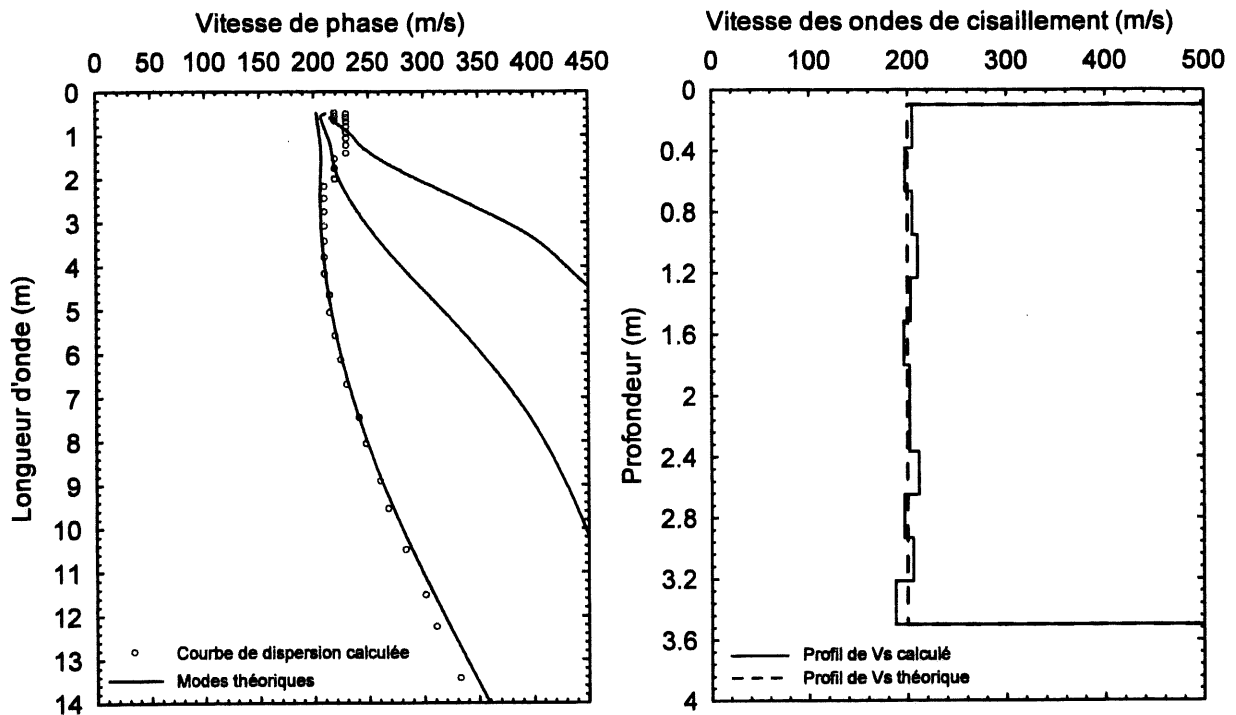


Figure A2a.3 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 3 m.

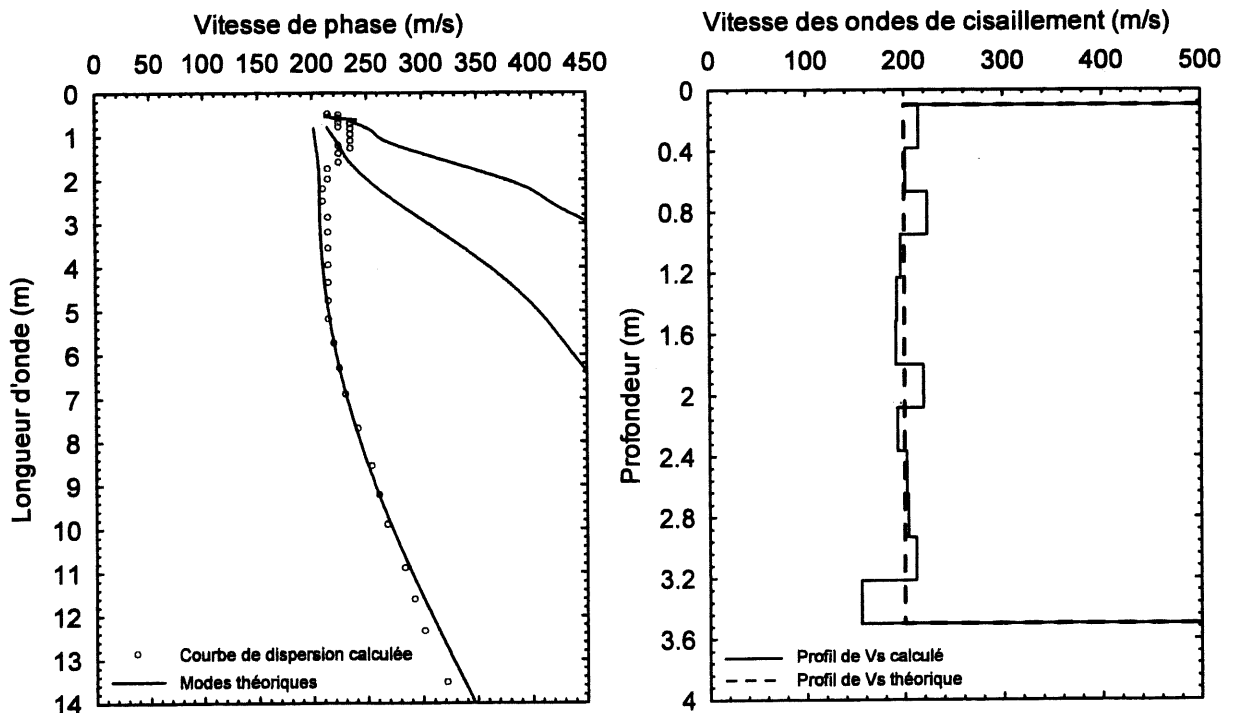


Figure A2a.4 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 3.6 m.

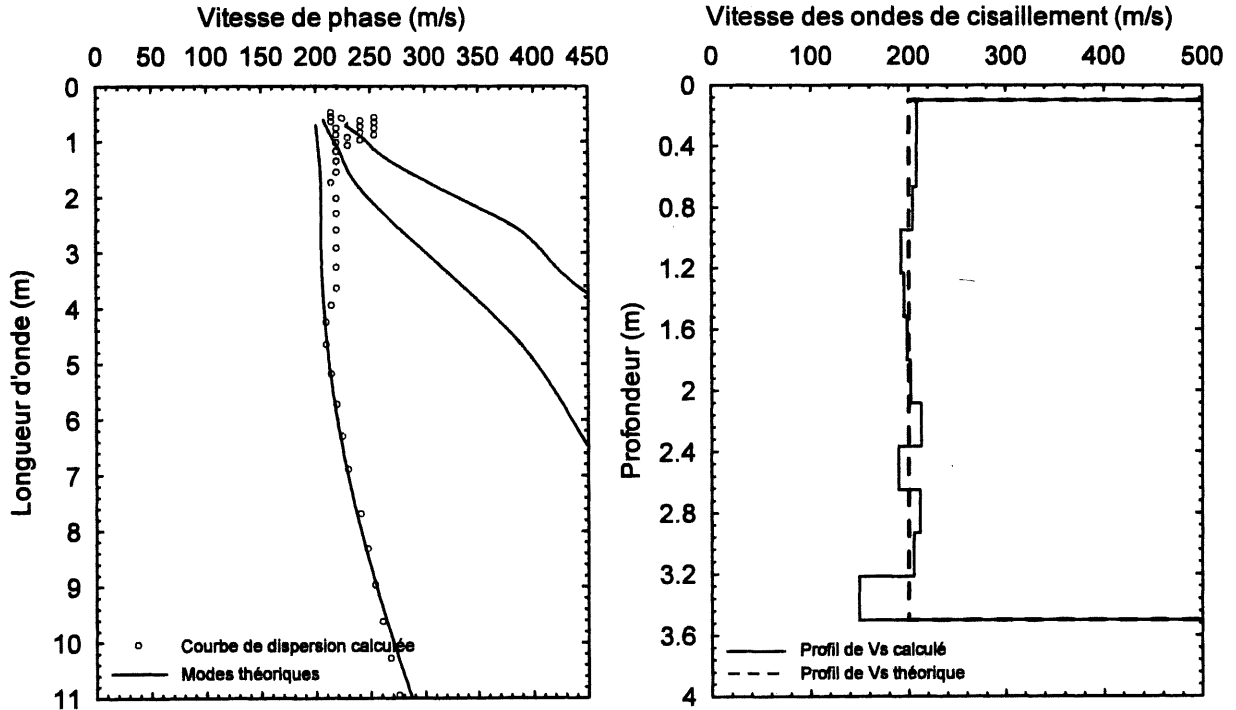


Figure A2a.5 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 4.2 m.

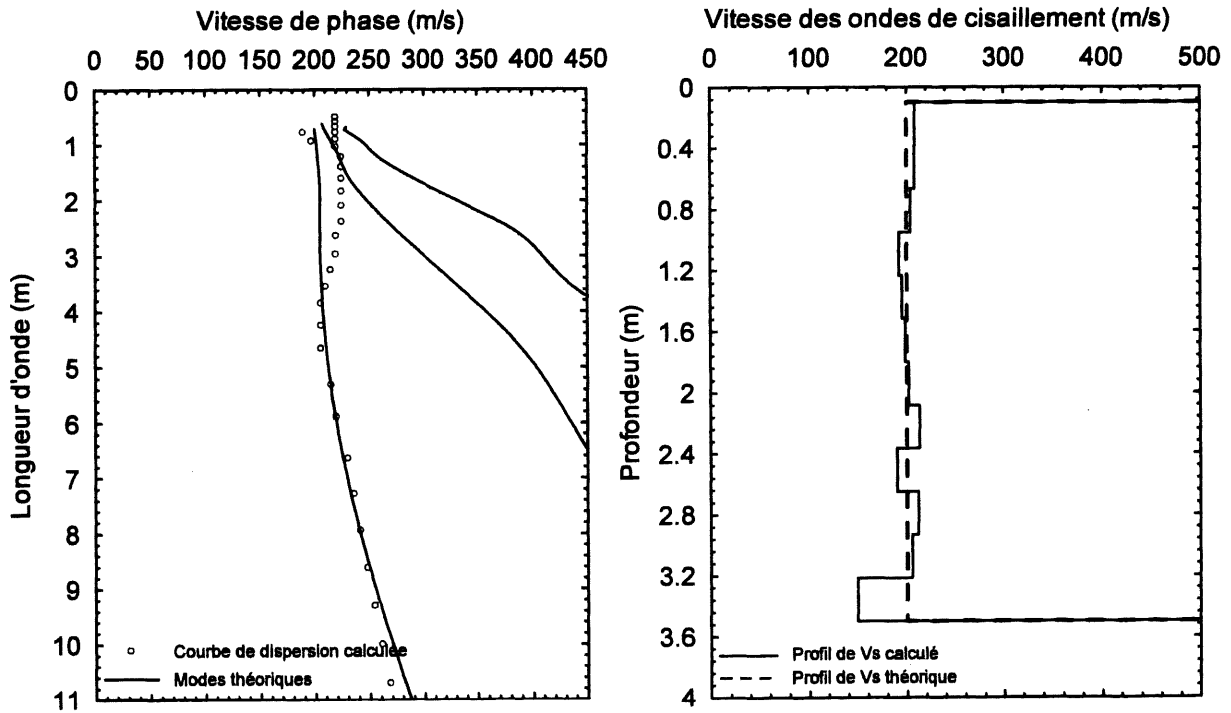


Figure A2a.6 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 4.8 m.

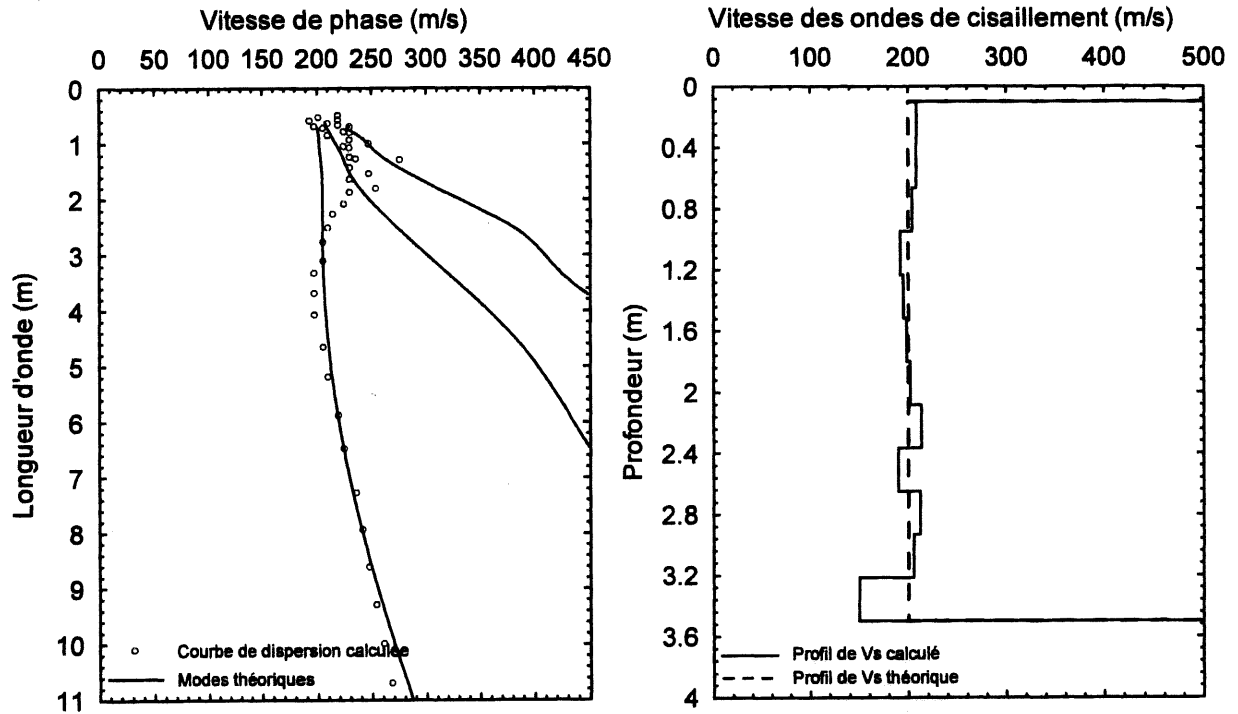


Figure A2a.7 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 5.4 m.

Annexes 2b

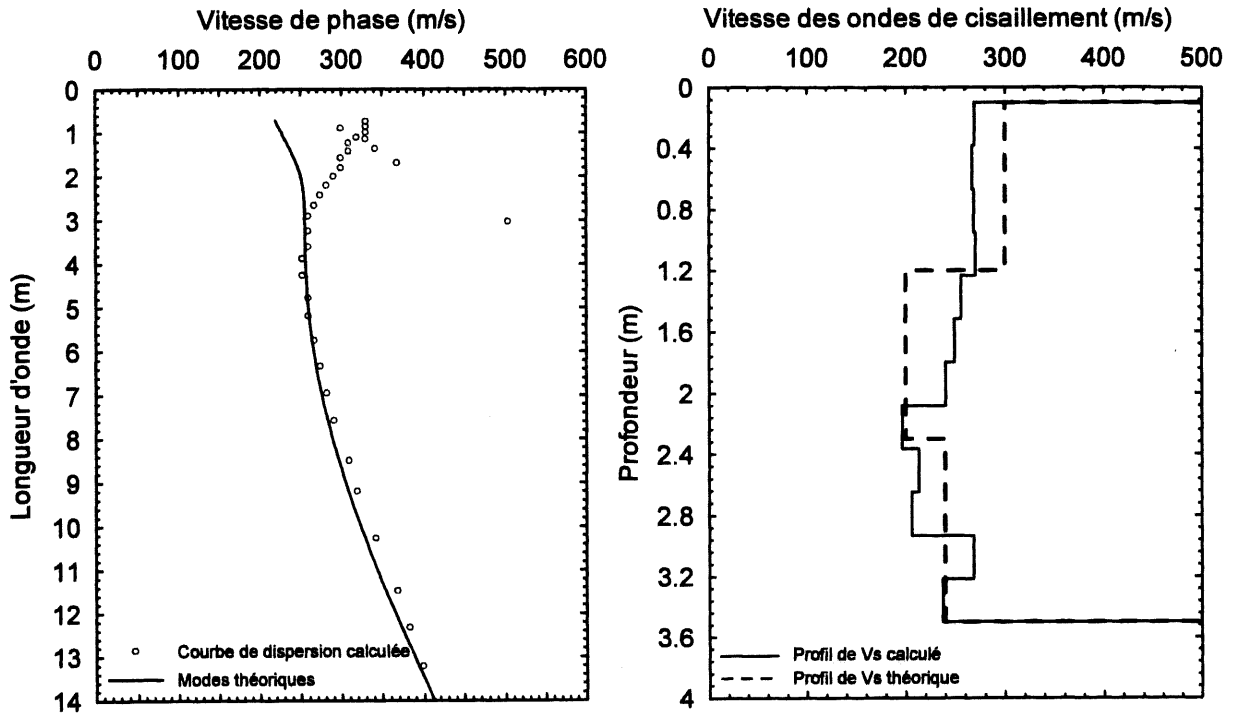


Figure A2b.1 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 1.2 m.

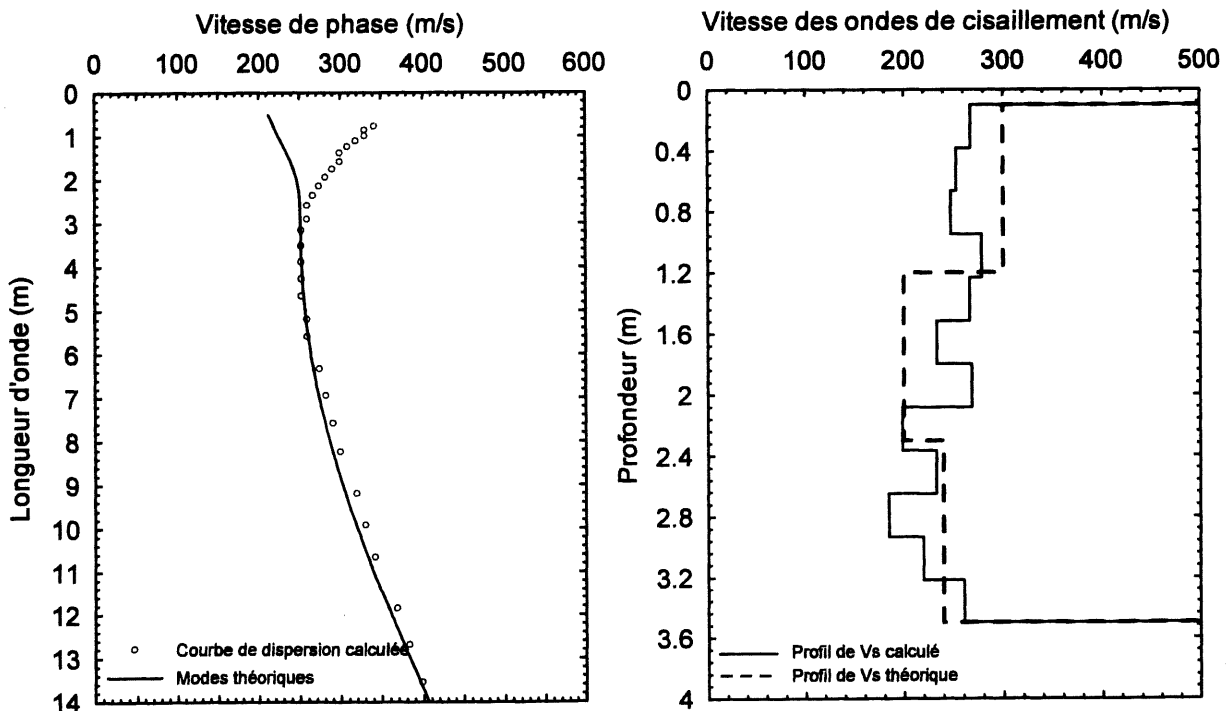


Figure A2b.2 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 1.8 m.

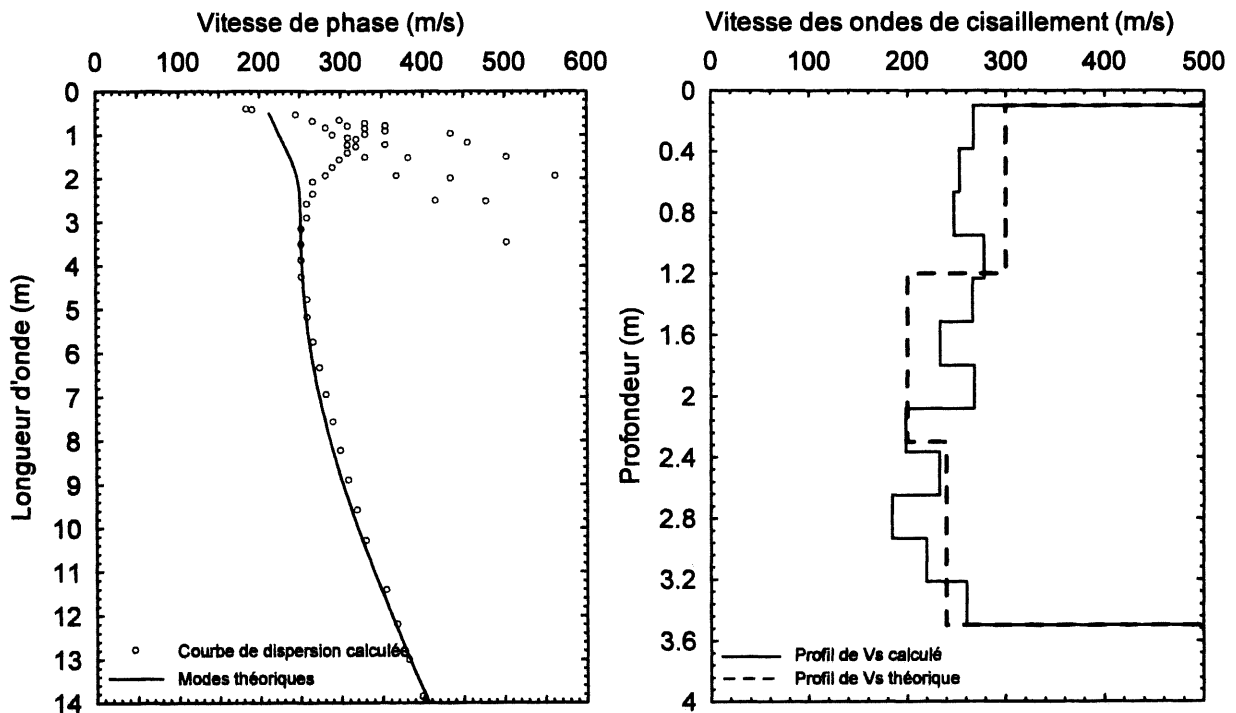


Figure A2b.3 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 2.4 m.

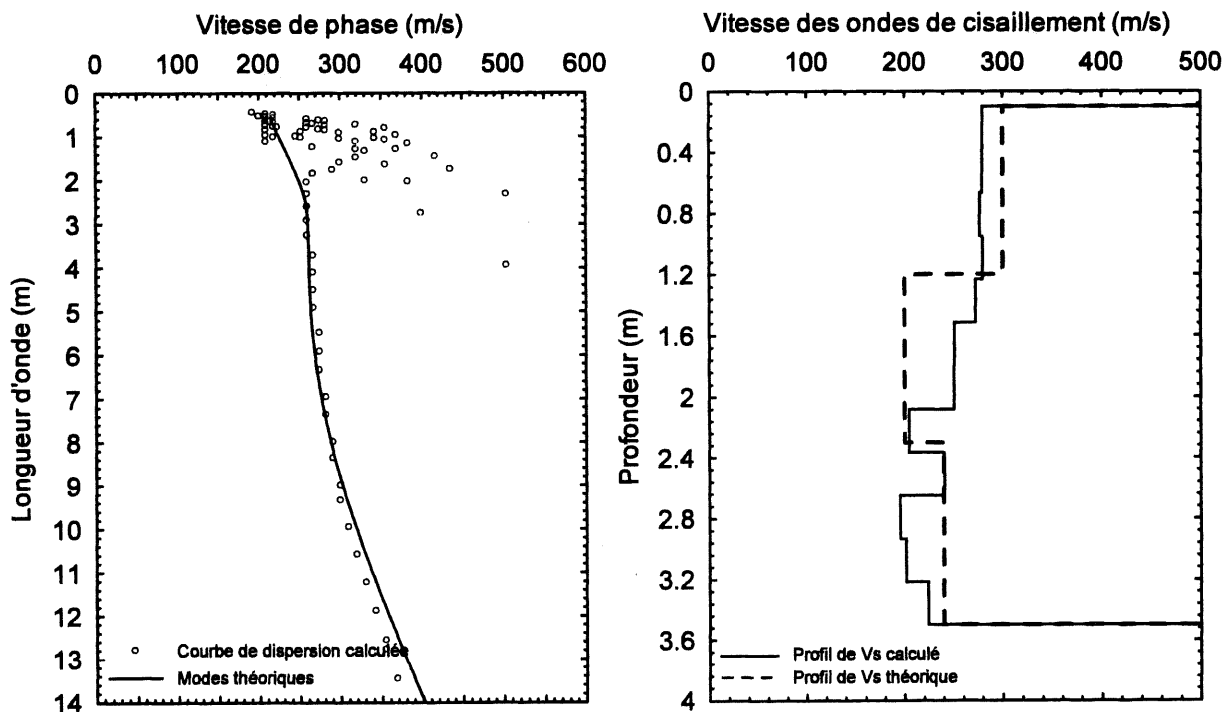


Figure A2b.4 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 3.6 m.

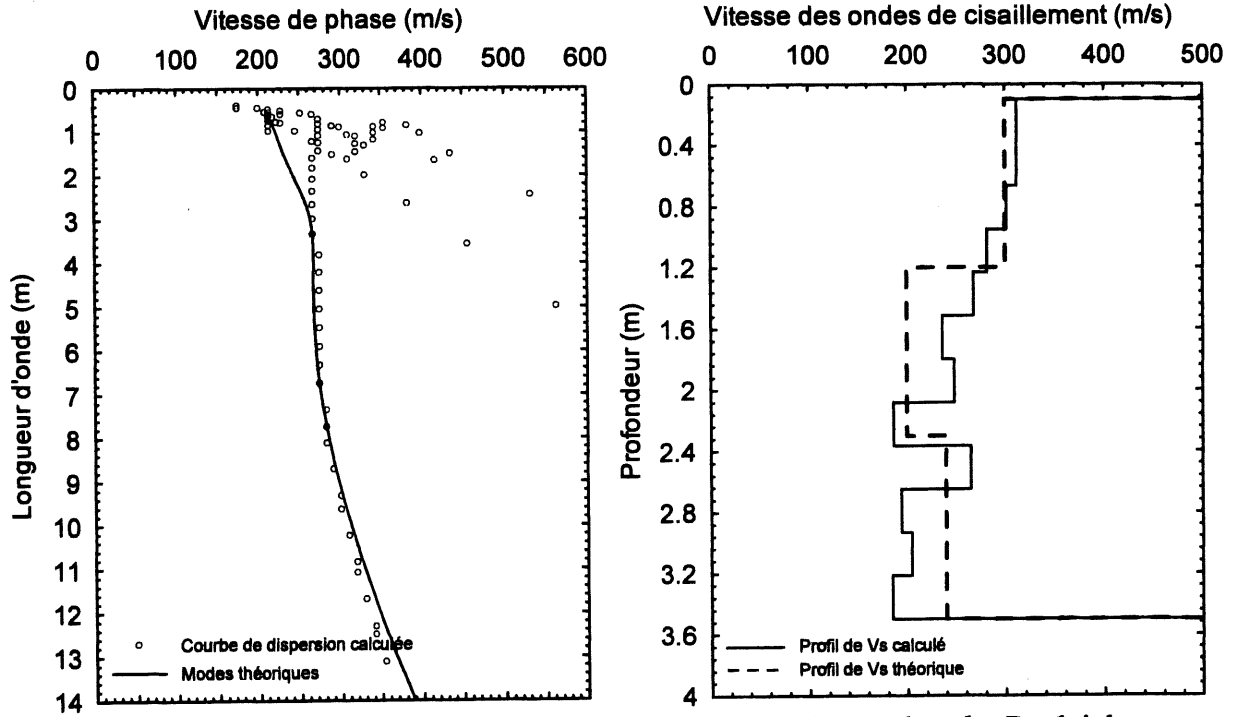


Figure A2b.5 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 4.2 m.

Annexes 2c

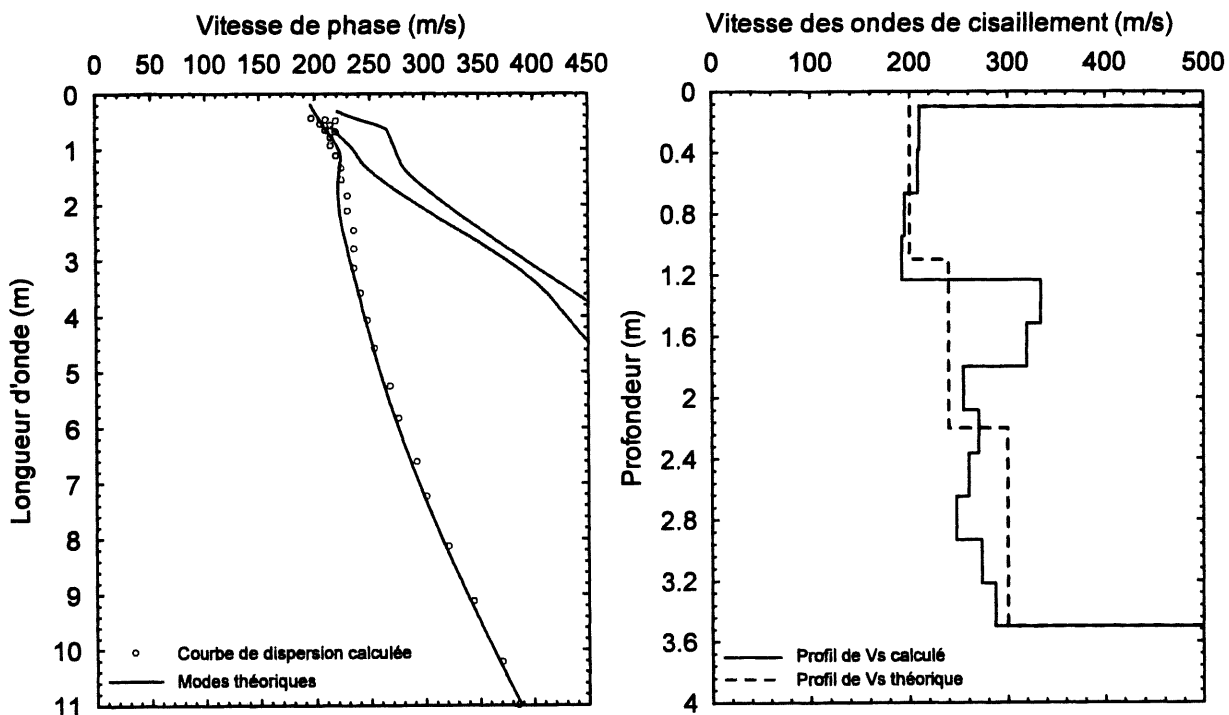


Figure A2c.1 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 1.2 m.

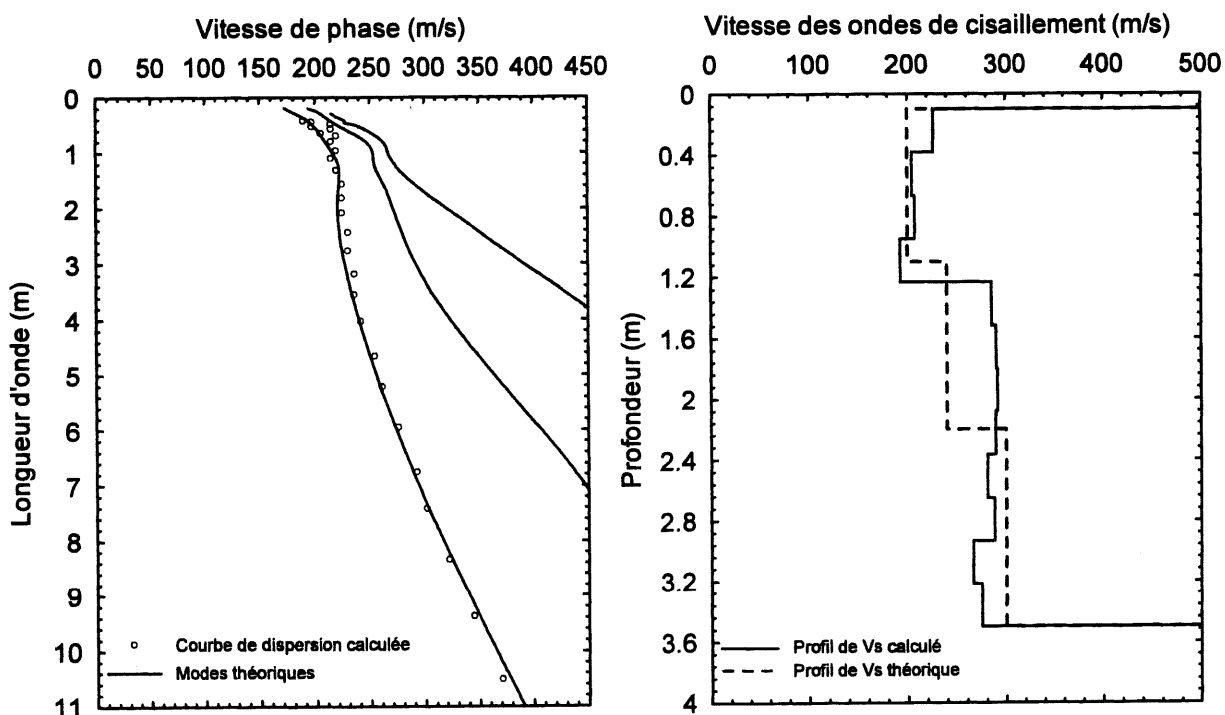


Figure A2c.2 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 1.8 m.

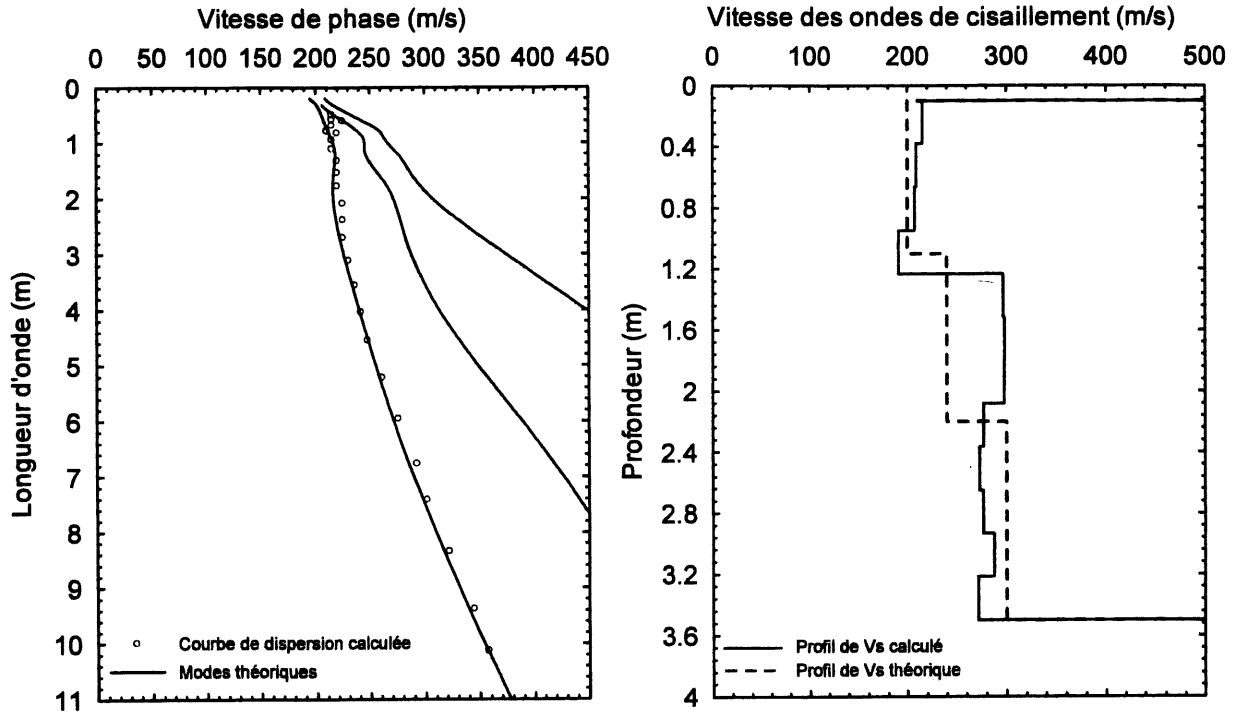


Figure A2c.3 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 2.4 m.

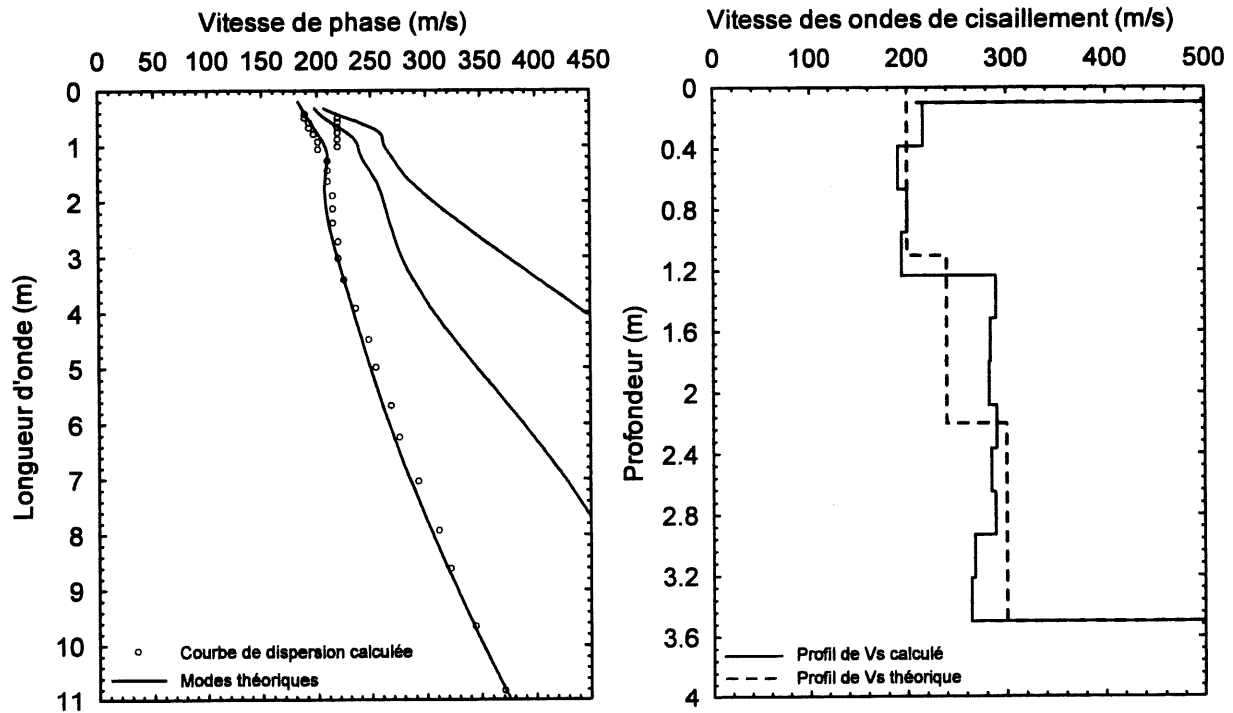


Figure A2c.4 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 3.6 m.

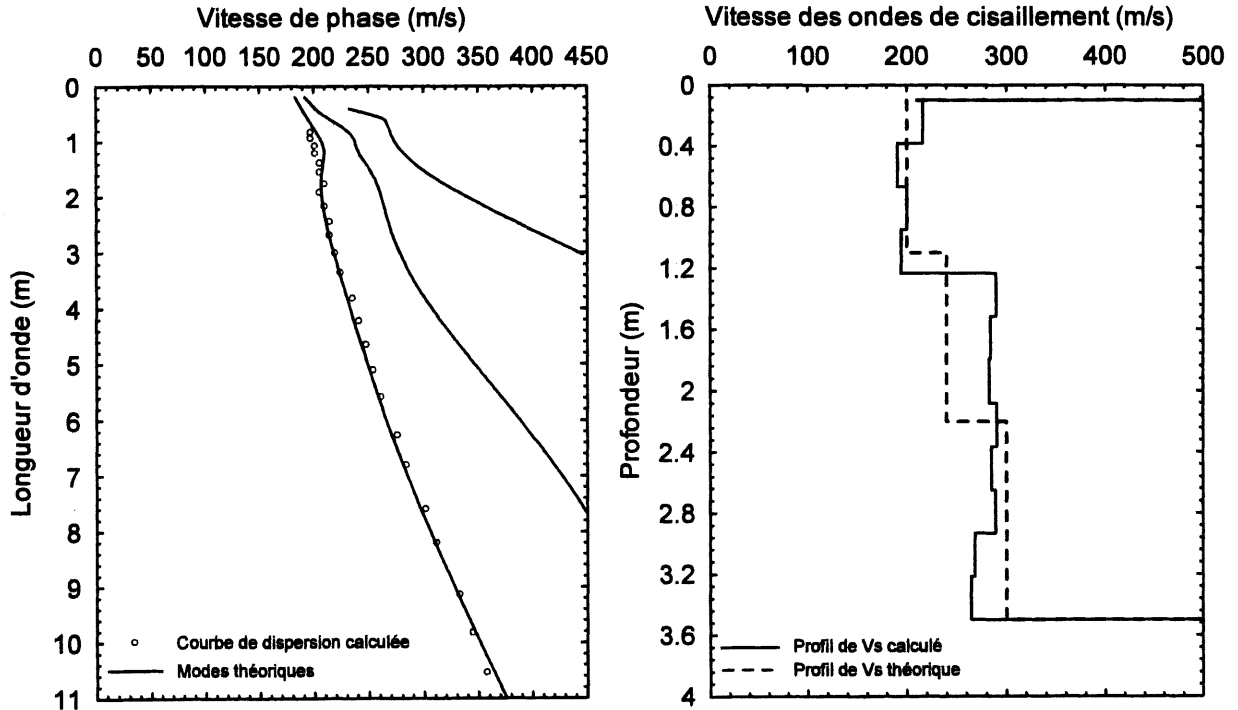


Figure A2c.5 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 4.2 m.

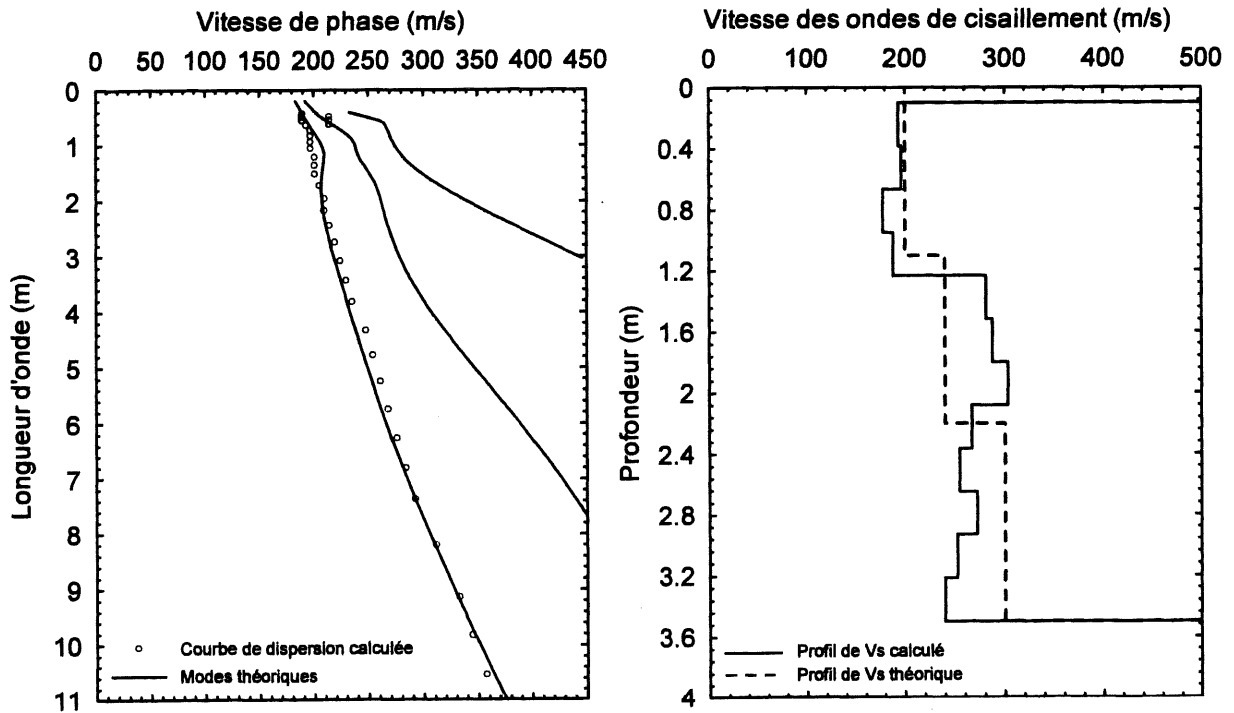


Figure A2c.6 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 4.8 m.

ANNEXE 3

**COURBES DE DISPERSION ET PROFILS DES VITESSES DES
ONDES DE CISAILLEMENT DES PROFILS AVEC CAVITÉ : 3A,
3B ET 3C**

Annexes 3a

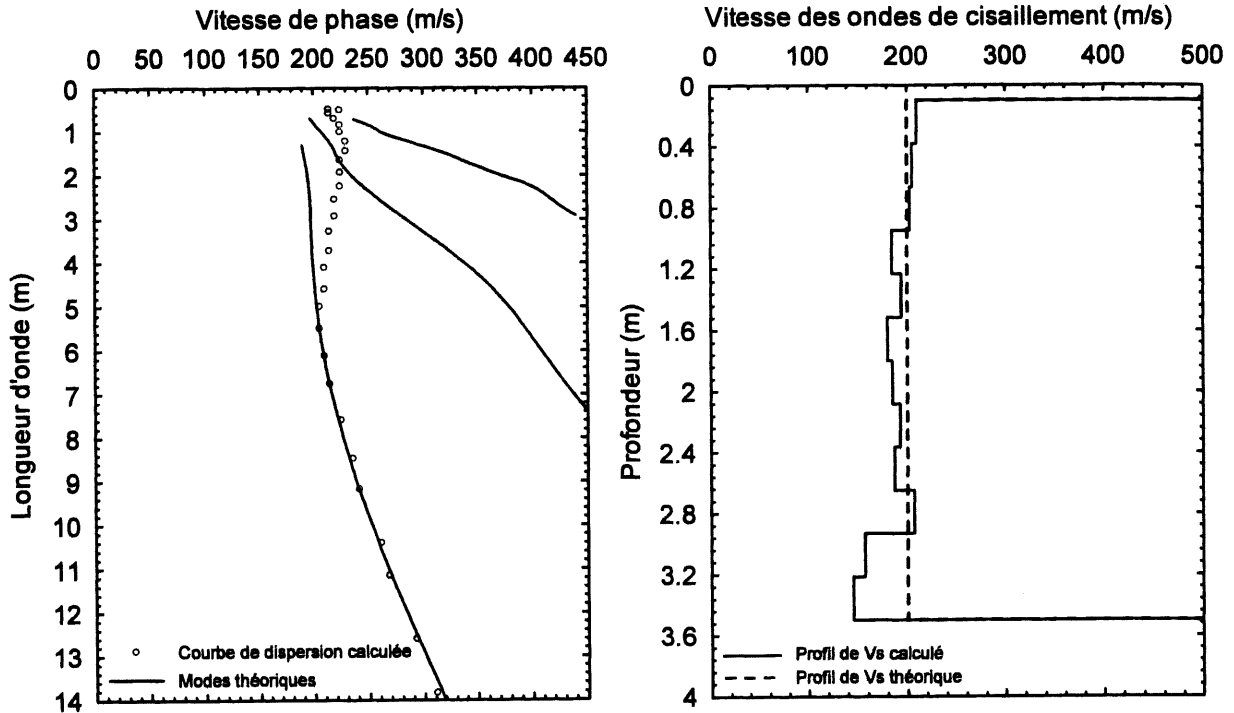


Figure A3a.1 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 1.8 m.

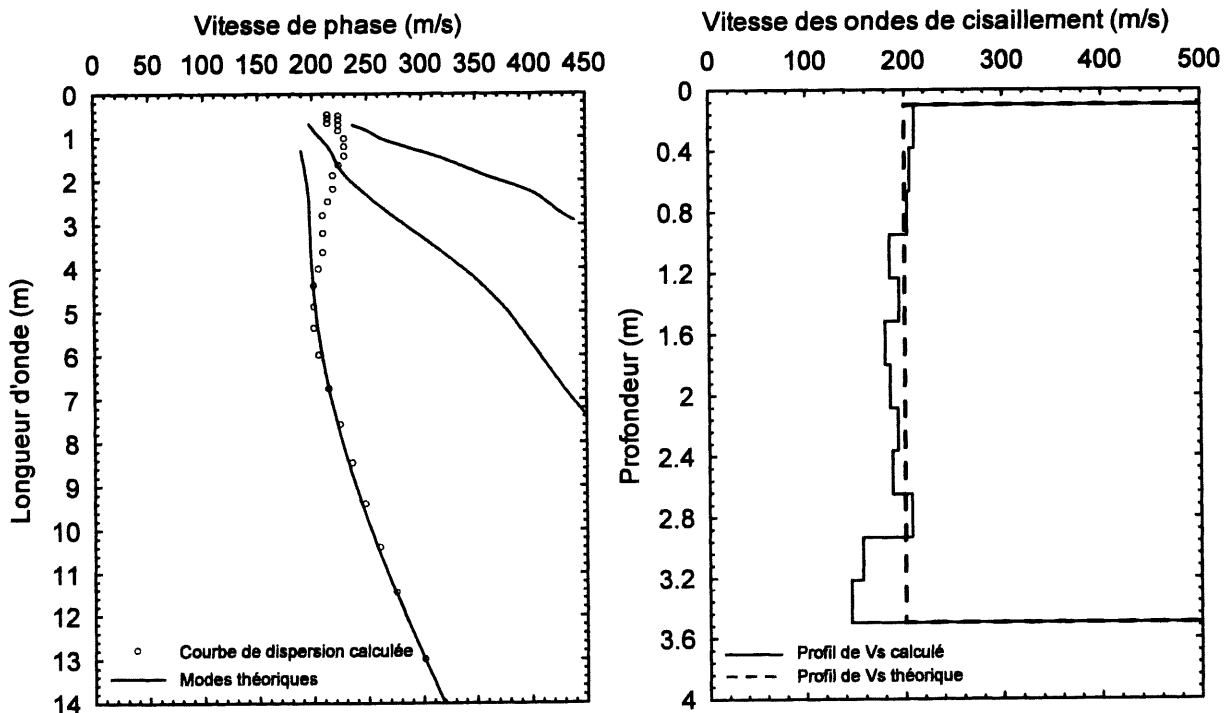


Figure A3a.2 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 2.4 m.

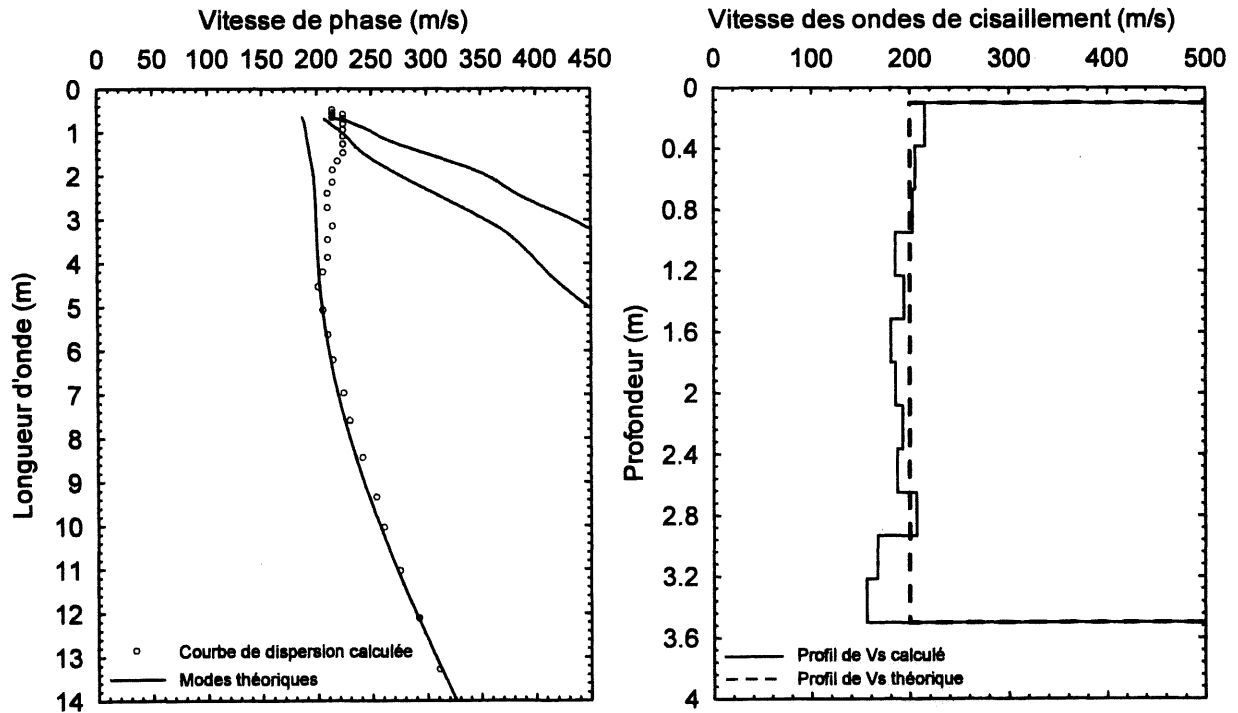


Figure A3a.3 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 3.6 m.

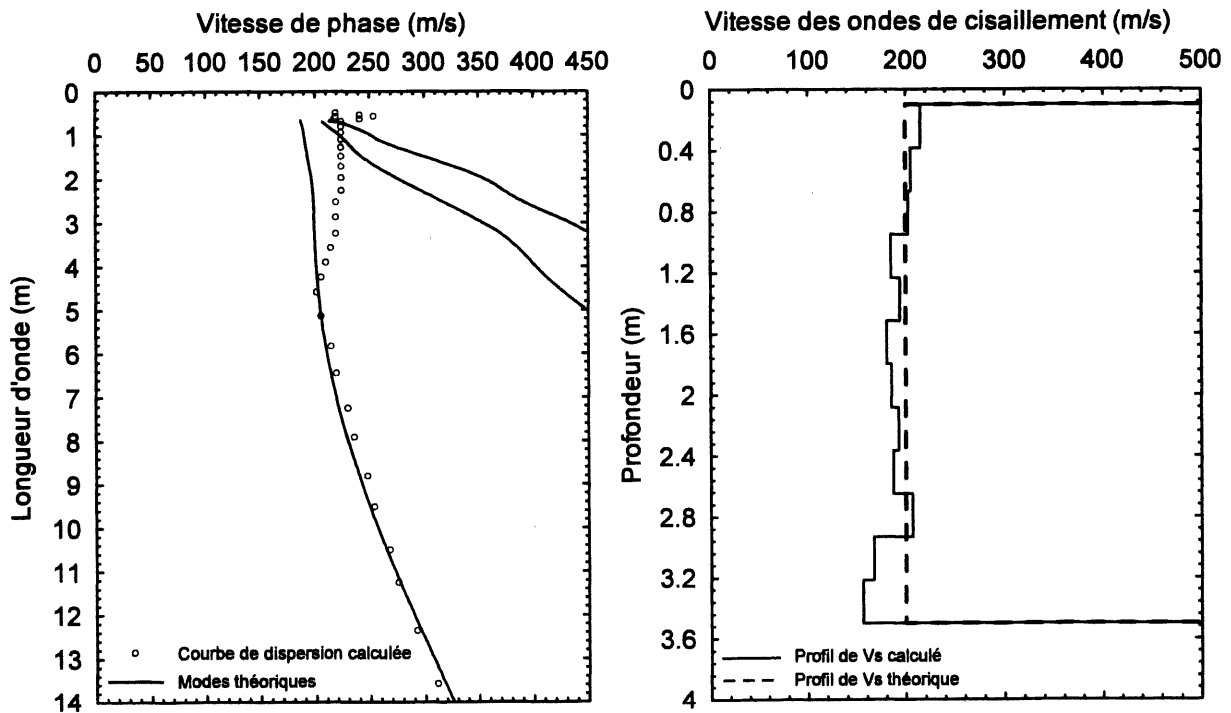


Figure A3a.4 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 4.2 m.

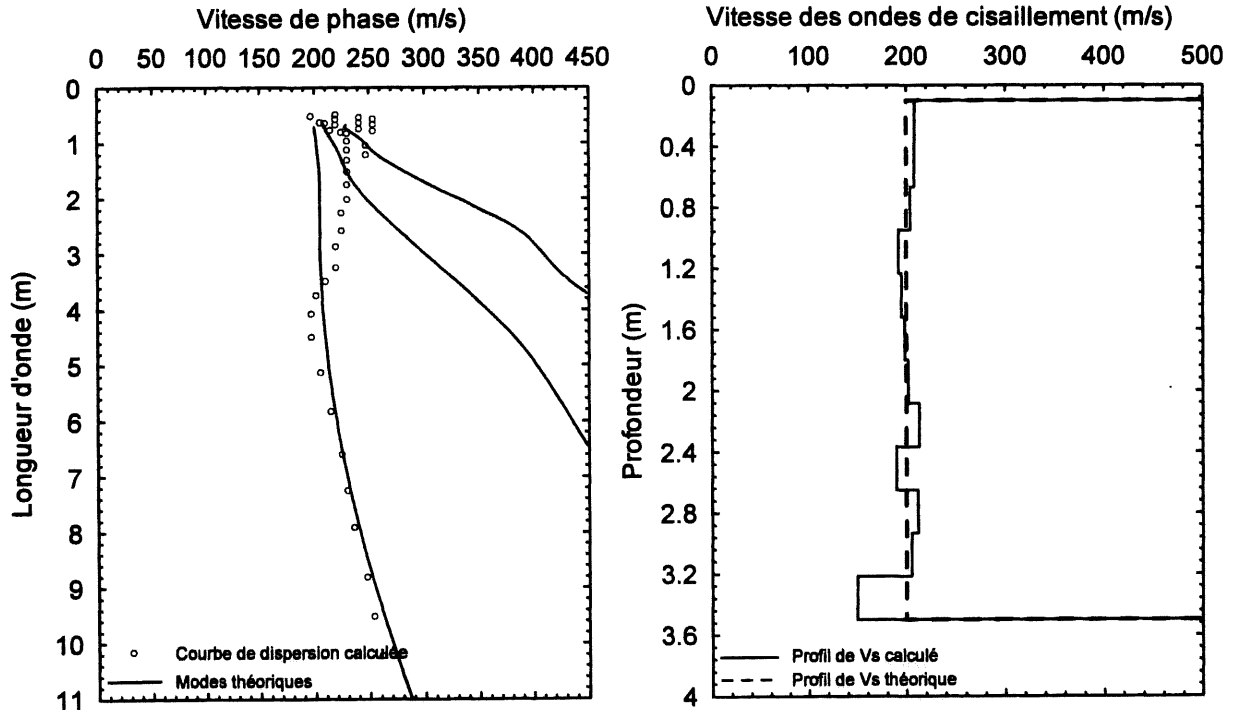


Figure A3a.5 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 4.8 m.

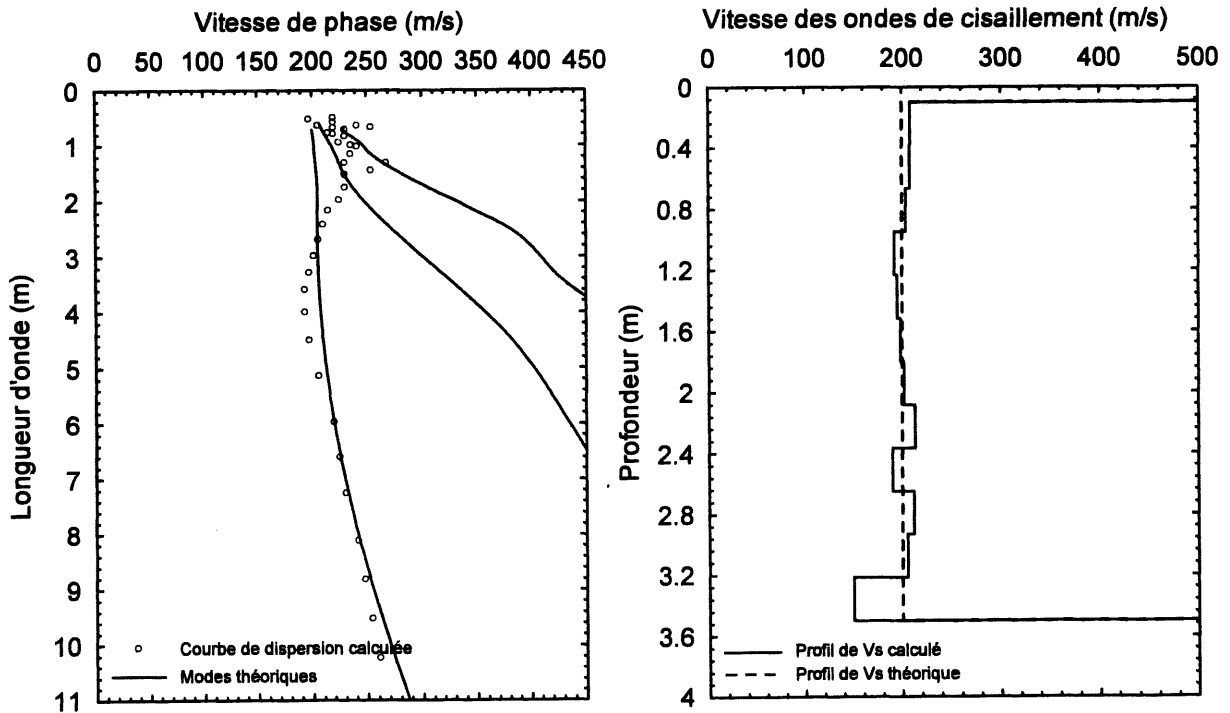


Figure A3a.6 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 5.4 m.

Annexes 3b

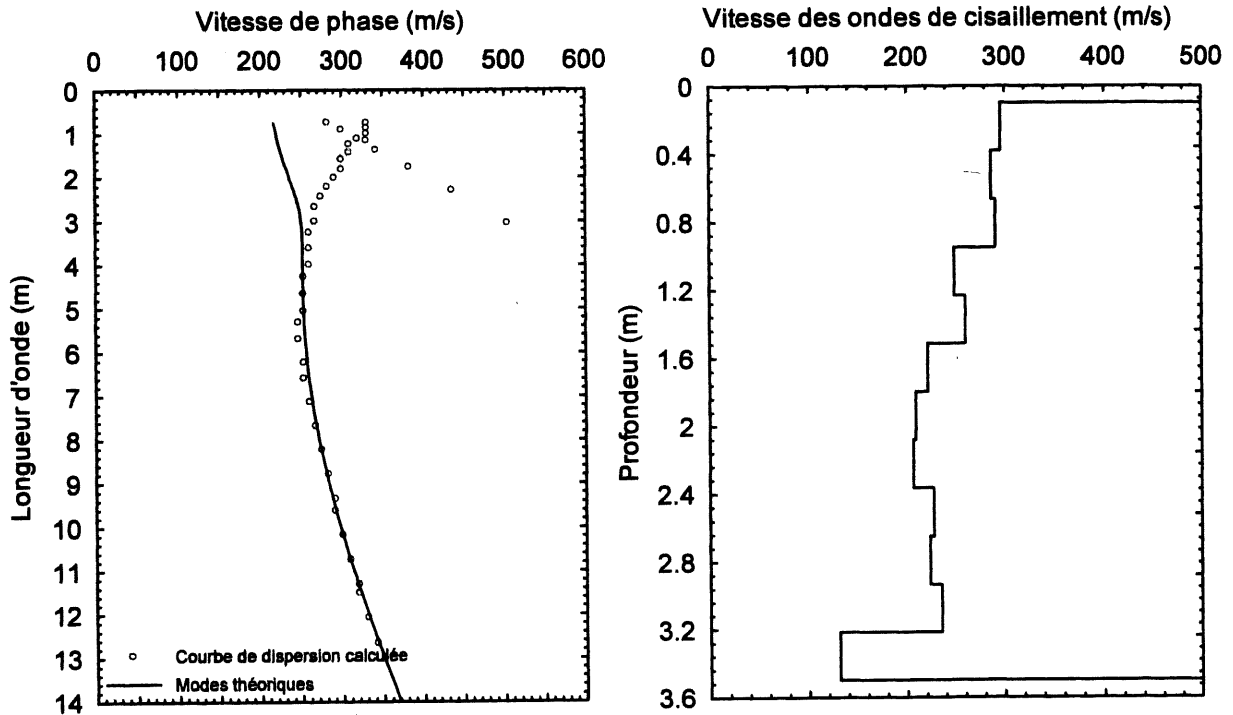


Figure A3b.1 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 1.2 m.

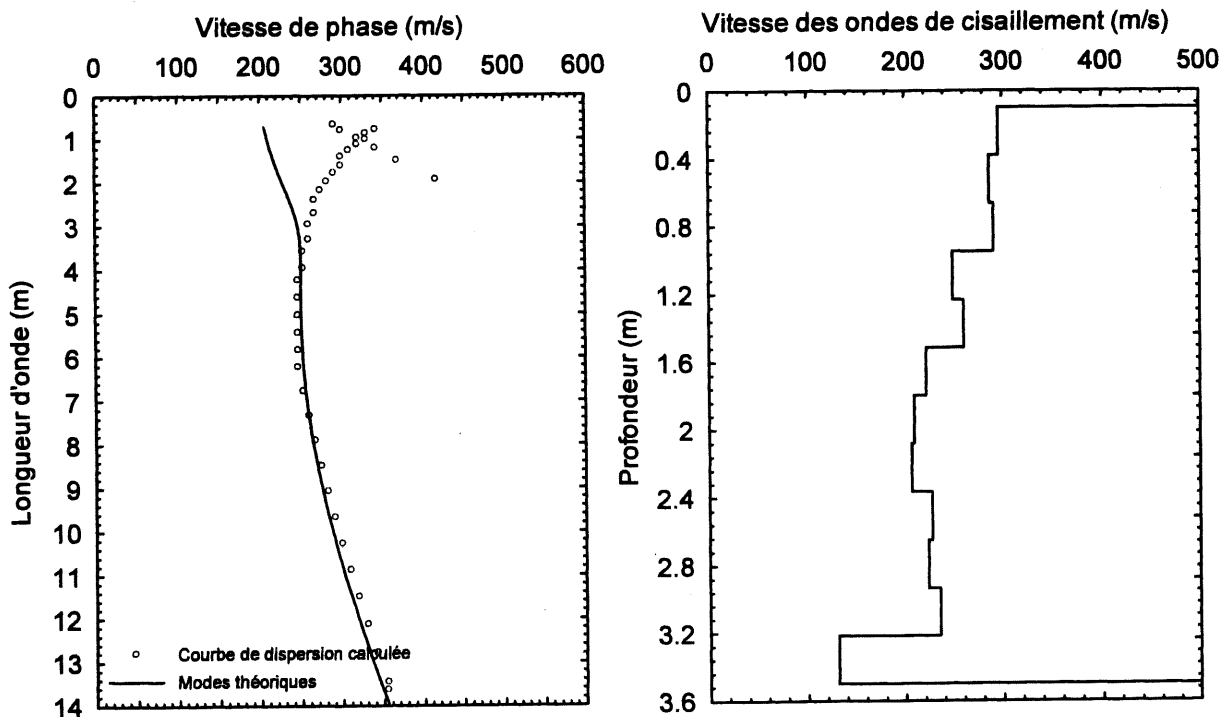


Figure A3b.2 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 1.8 m.

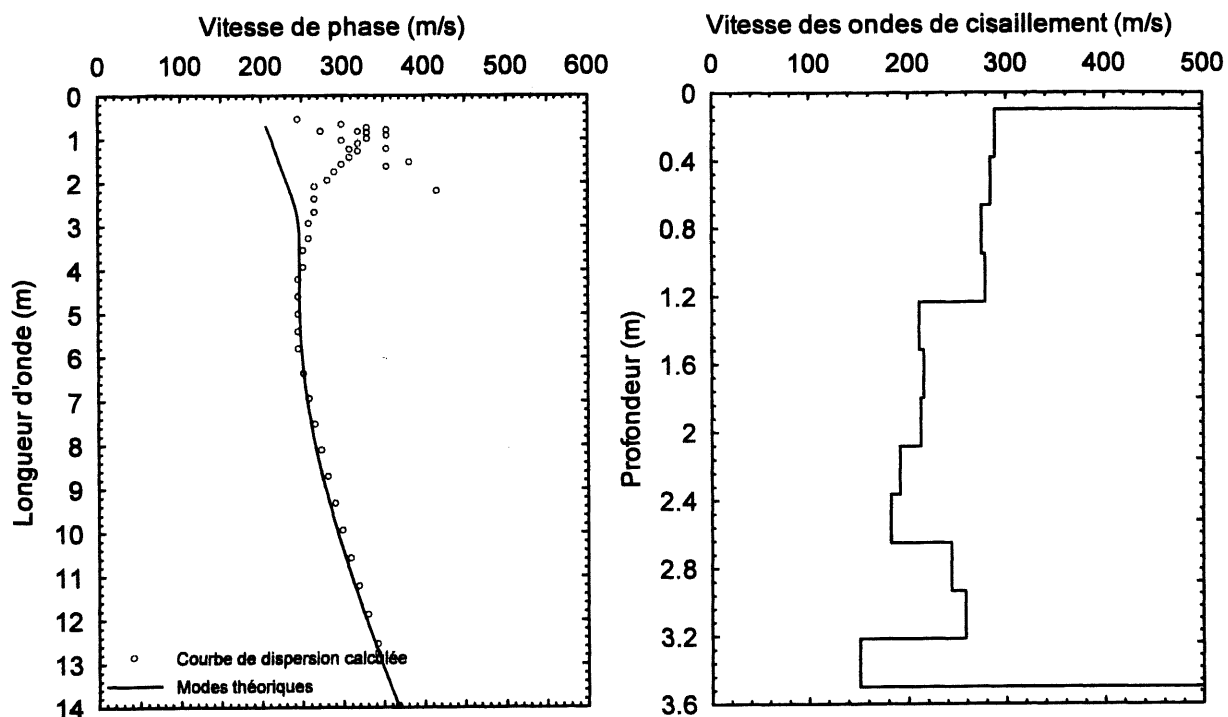


Figure A3b.3 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 2.4 m.

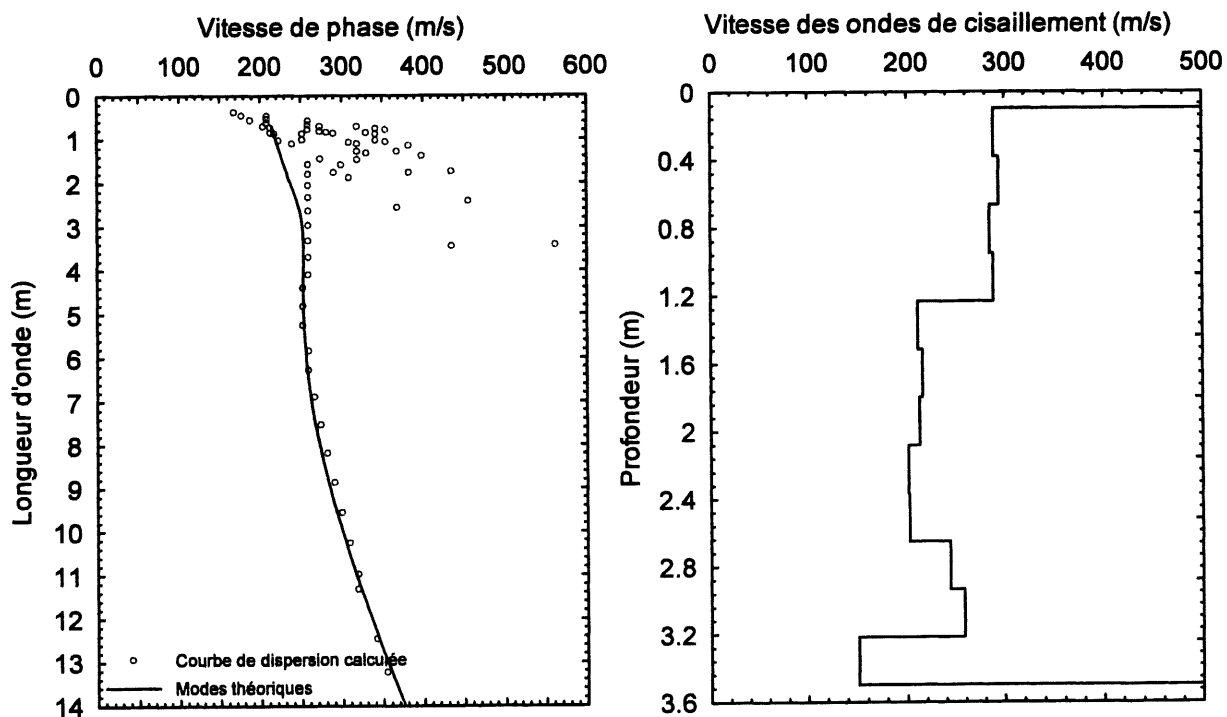


Figure A3b.4 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 3.6 m.

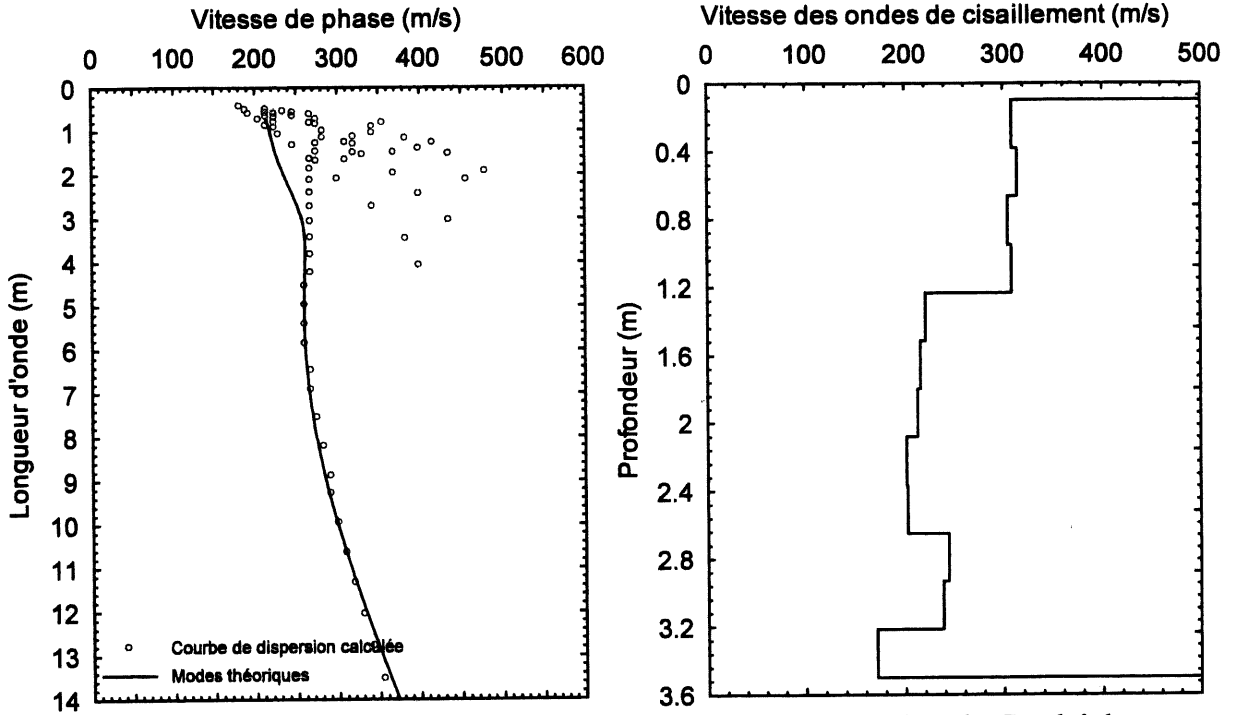


Figure A3b.5 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 4.2 m.

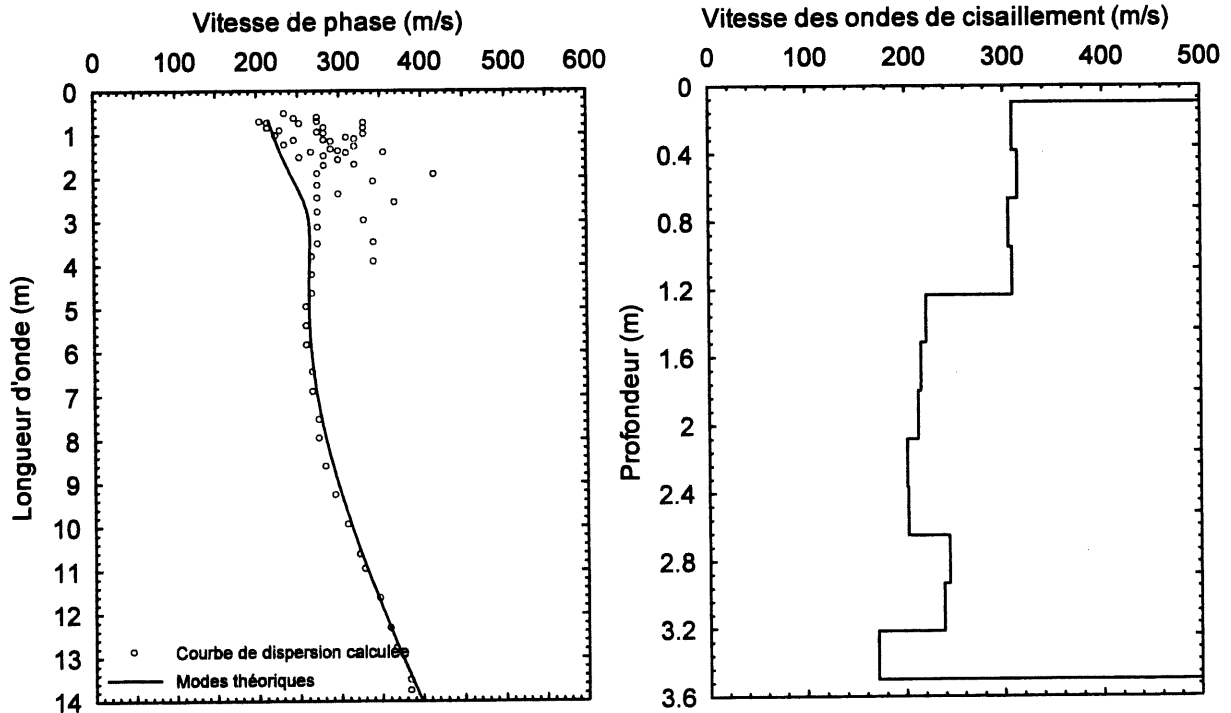


Figure A3b.6 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 4.8 m.

Annexes 3c

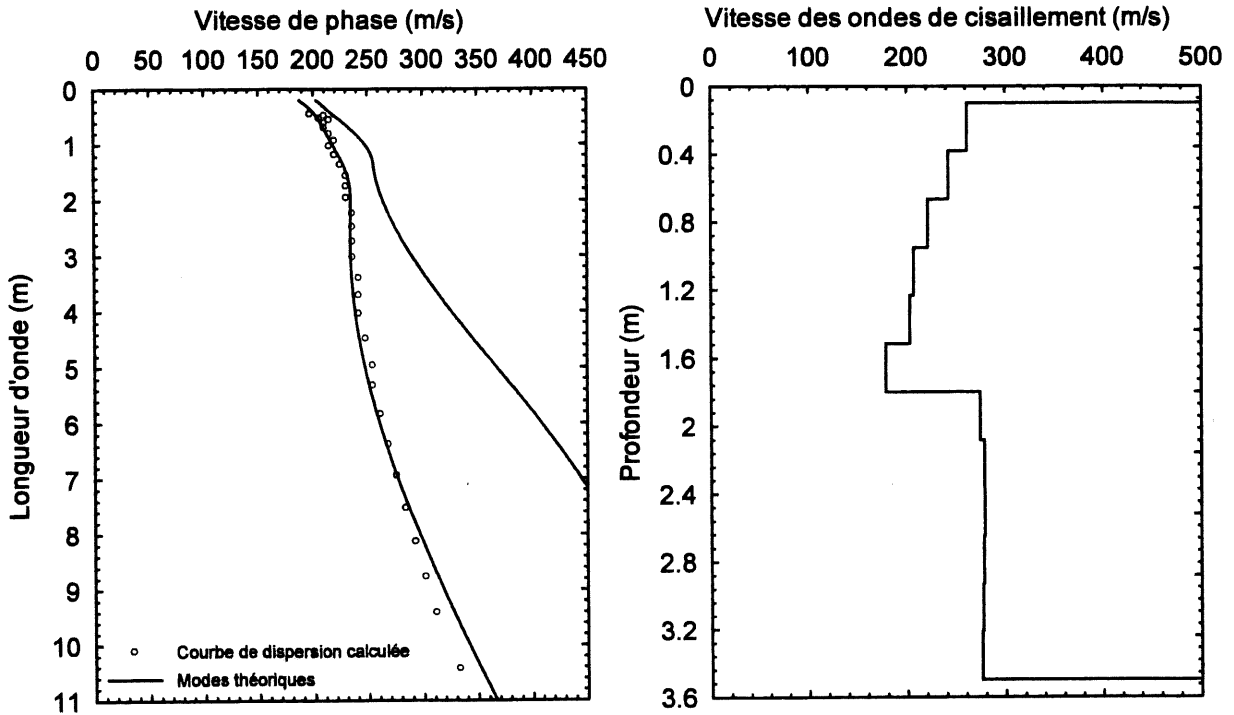


Figure A3c.1 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 1.2 m.

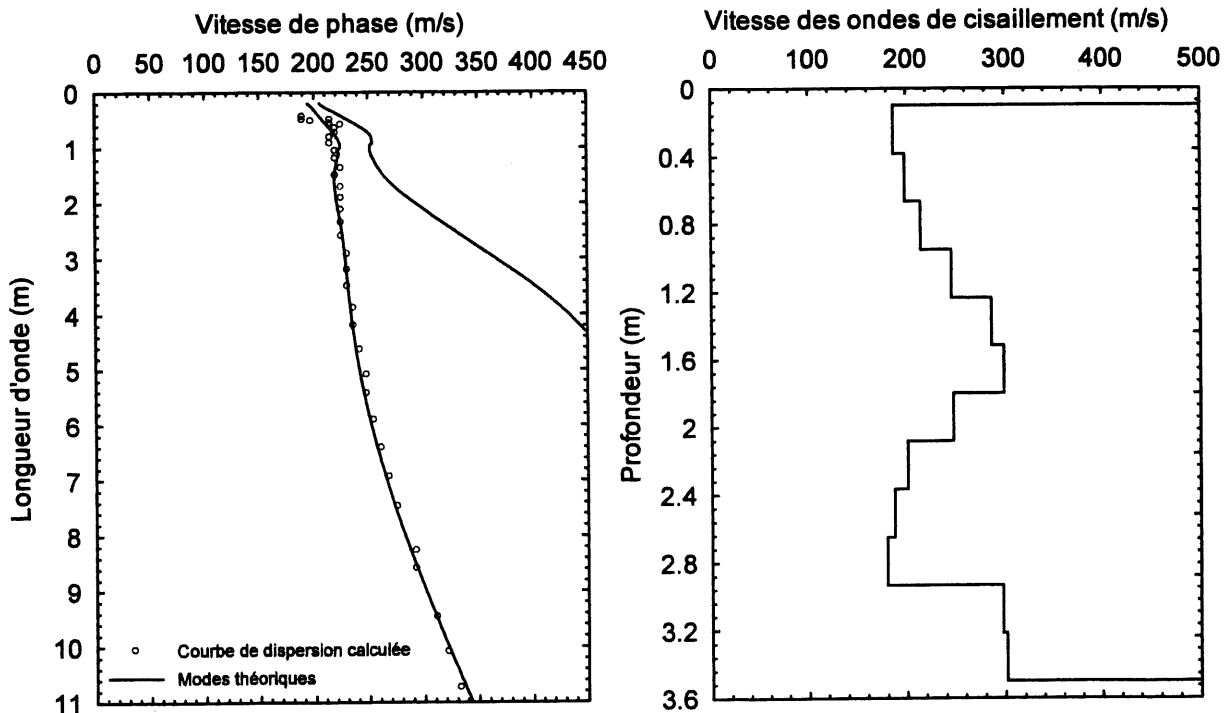


Figure A3c.2 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 1.8 m.

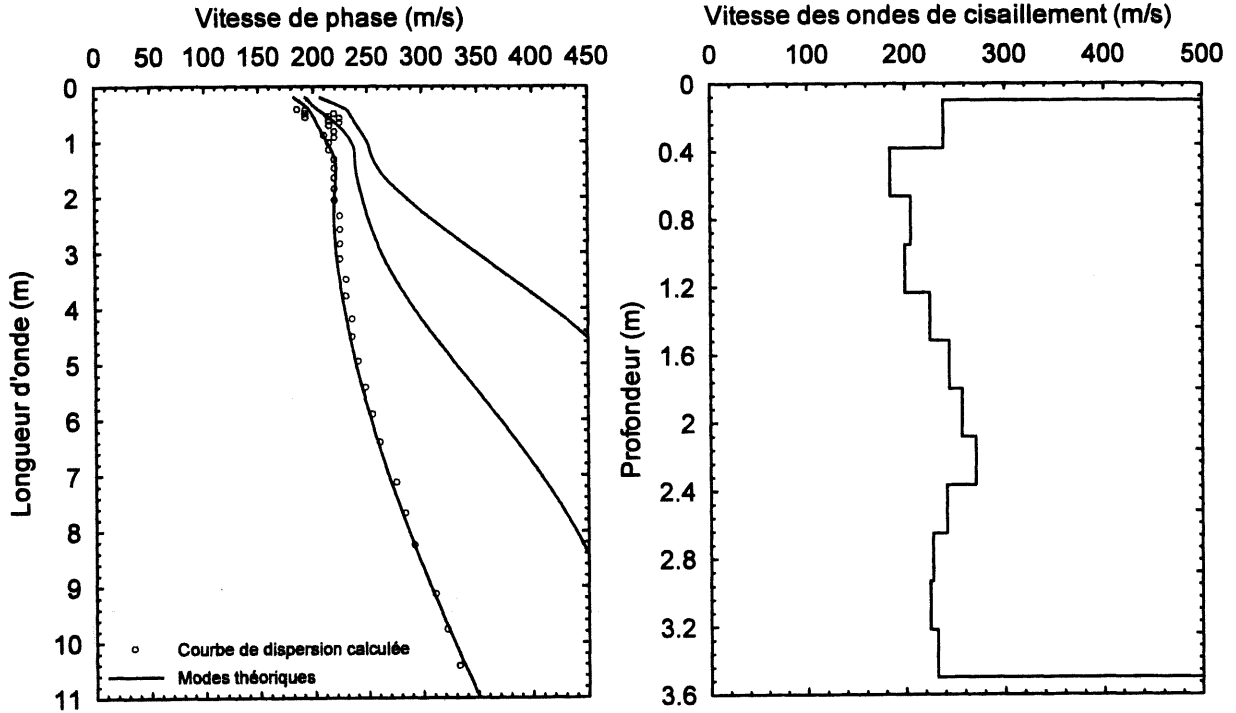


Figure A3c.3 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 2.4 m.

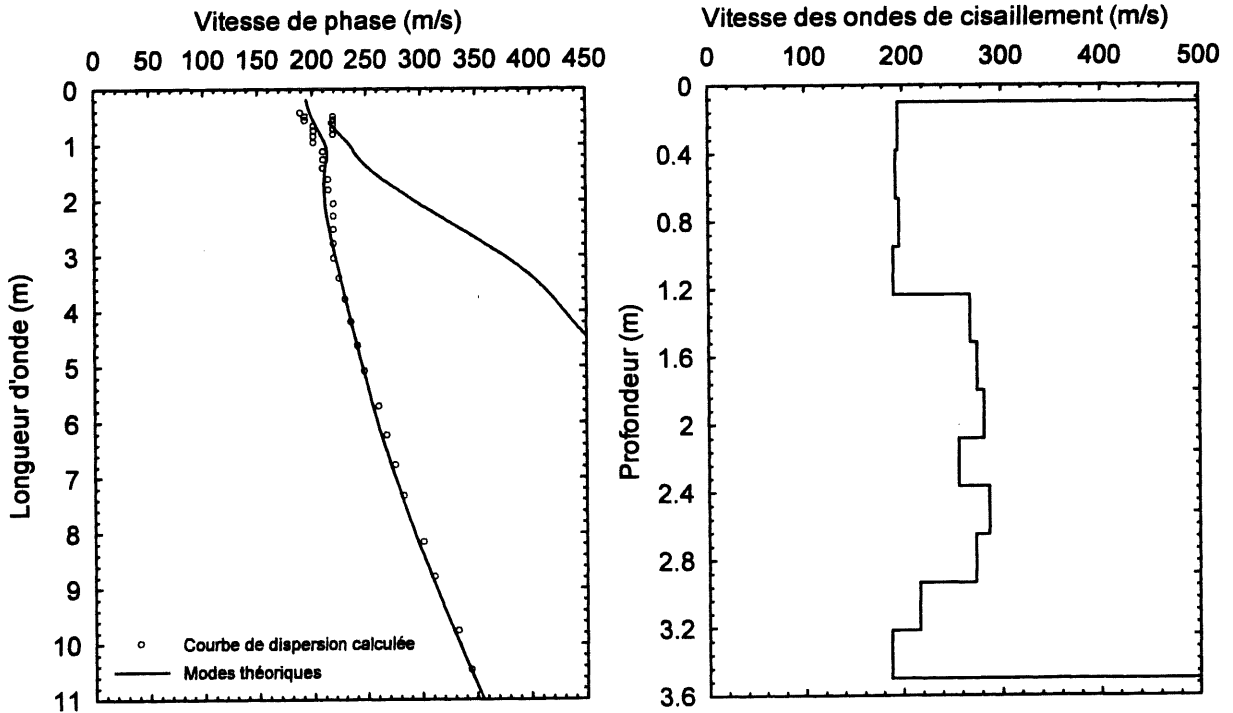


Figure A3c.4 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 3 m.

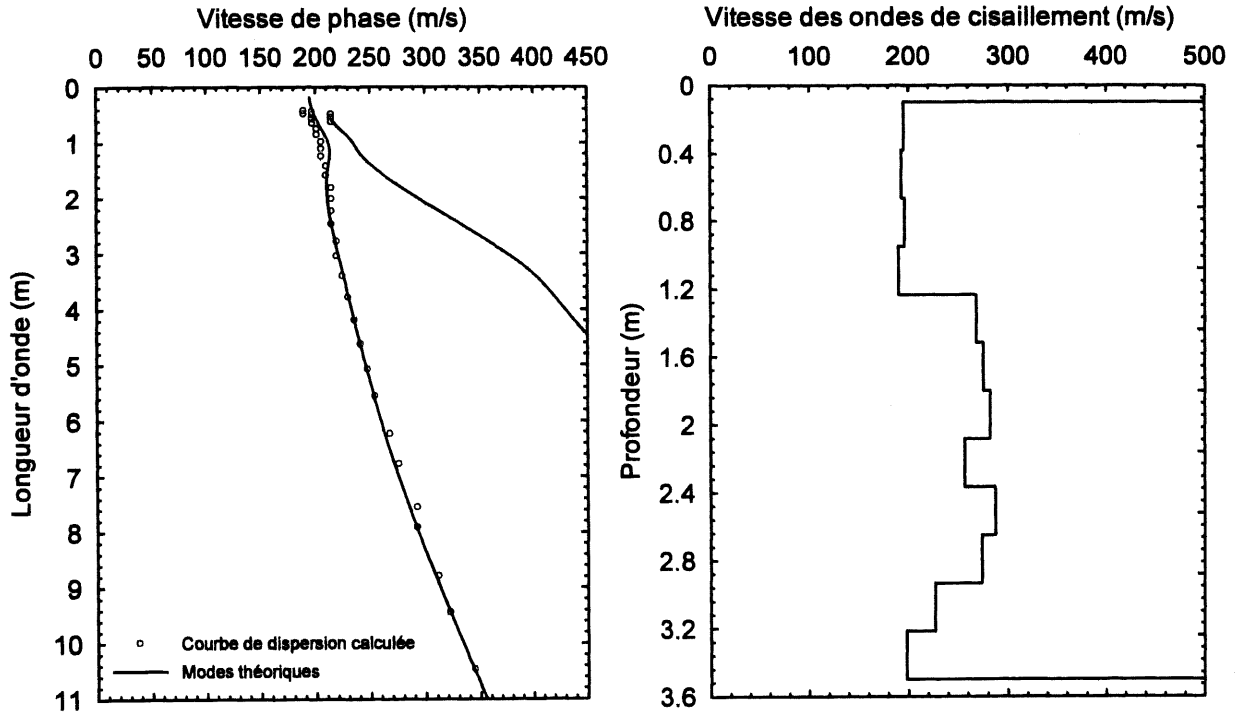


Figure A3c.5 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 3.6 m.

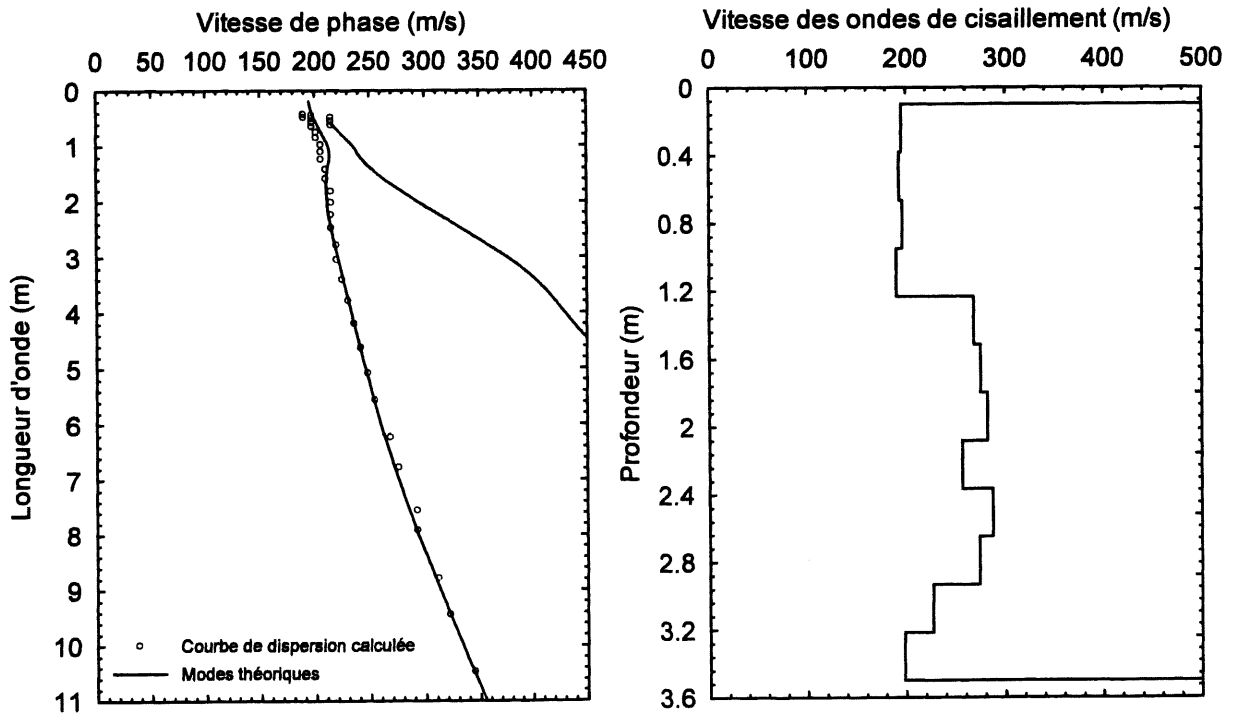


Figure A3c.6 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 4.2 m.

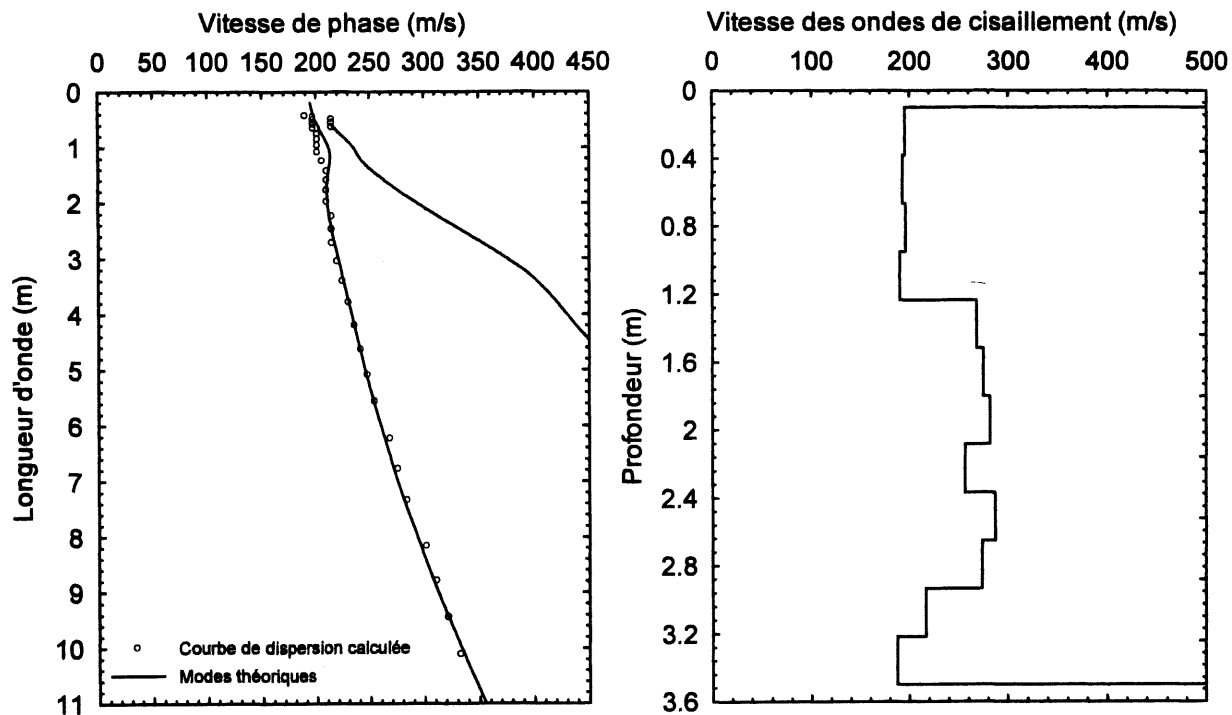


Figure A3c.7 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 4.8 m.

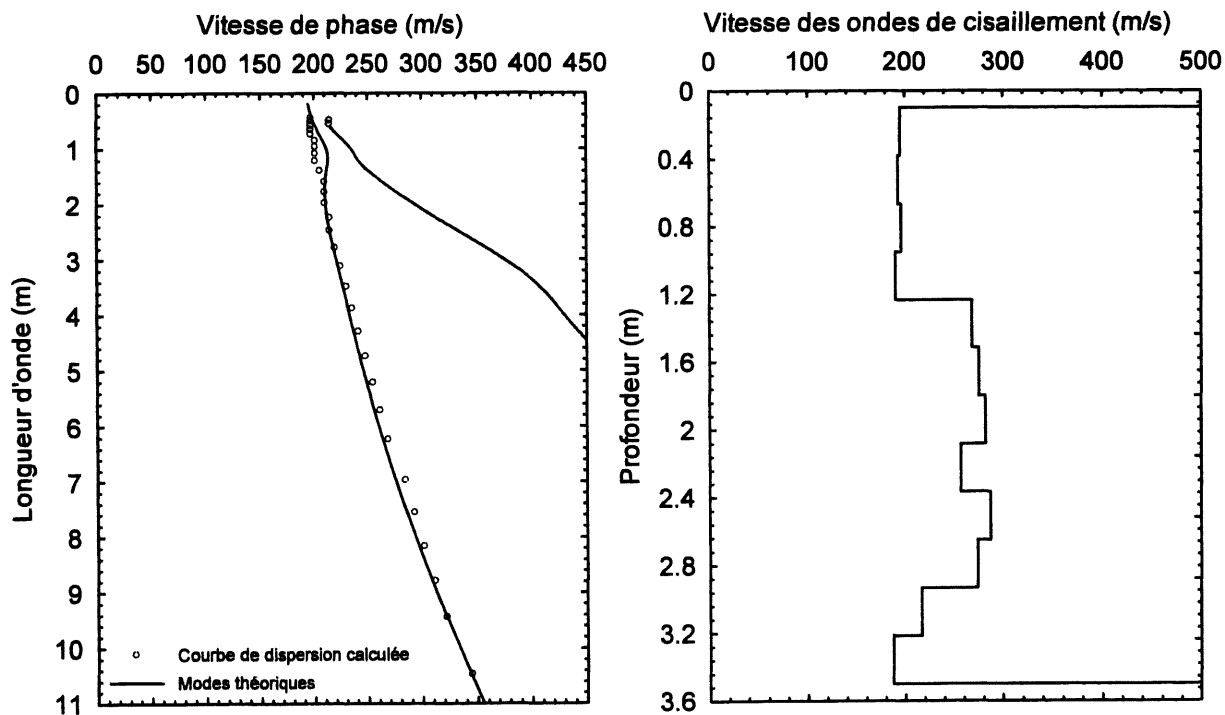


Figure A3c.8 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement à une distance de 5.4 m.

ANNEXE 4

**RÉSULTATS DES ESSAIS MASW
SITE DE SHERBROOKE**

Tableau A-4 Profils de vitesse des ondes de cisaillement, du coefficient de Poisson et du module de cisaillement maximum déterminés à la ligne 1, sur la sortie boulevard Bourque, au chaînage 0+030 (Autoroute 410).

Profond. (m)	Profil 1			Profil 2			Profil 3			Profil 4			Profil 5			Profil 6		
	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)
0.1-0.43	122	0.35	27	100	0.35	18	130	0.35	30	146	0.35	38	106	0.35	20	165	0.35	49
0.43-0.76	172	0.35	53	149	0.35	40	152	0.35	42	163	0.35	48	136	0.35	33	192	0.35	66
0.76-1.09	162	0.35	47	129	0.35	30	148	0.35	39	346	0.35	215	180	0.35	58	128	0.35	29
1.09-1.42	212	0.35	81	212	0.35	81	147	0.35	39	250	0.35	113	250	0.35	113	154	0.35	43
1.42-1.75	285	0.35	146	251	0.35	113	184	0.35	61	233	0.35	98	189	0.35	64	280	0.35	141
1.75-2.08	227	0.35	93	228	0.35	94	212	0.35	81	262	0.35	124	230	0.35	95	249	0.35	112
2.08-2.41	343	0.4	224	223	0.4	94	231	0.4	101	319	0.4	193	231	0.4	101	358	0.4	244
2.41-2.74	357	0.4	242	202	0.4	78	252	0.4	121	352	0.4	235	280	0.4	149	342	0.4	222
2.74-3.07	401	0.4	306	225	0.4	96	253	0.4	122	435	0.4	360	337	0.4	216	364	0.4	252
3.07-3.4	455	0.4	393	288	0.4	158	265	0.4	133	460	0.4	402	375	0.4	267	387	0.4	285
3.4-3.73	409	0.4	318	302	0.4	173	252	0.4	121	497	0.4	469	414	0.4	326	359	0.4	245
3.73-4.06	465	0.4	411	332	0.4	209	247	0.4	116	514	0.4	502	362	0.4	249	355	0.4	239
4.06-4.39	453	0.4	390	326	0.4	202	236	0.4	106	525	0.4	524	382	0.4	277	362	0.4	249
4.39-4.72	455	0.4	393	339	0.4	218	228	0.4	99	537	0.4	548	305	0.4	177	324	0.4	199
4.72-5.17	453	0.4	390	341	0.4	221	238	0.4	108	562	0.4	600	317	0.4	191	332	0.4	209

ANNEXE 5

**COURBES DE DISPERSION ET PROFILS DE VITESSE DES
ONDES DE CISAILLEMENT DES ESSAIS MASW SUR LA
LIGNE 1
SITE DE SHERBROOKE**

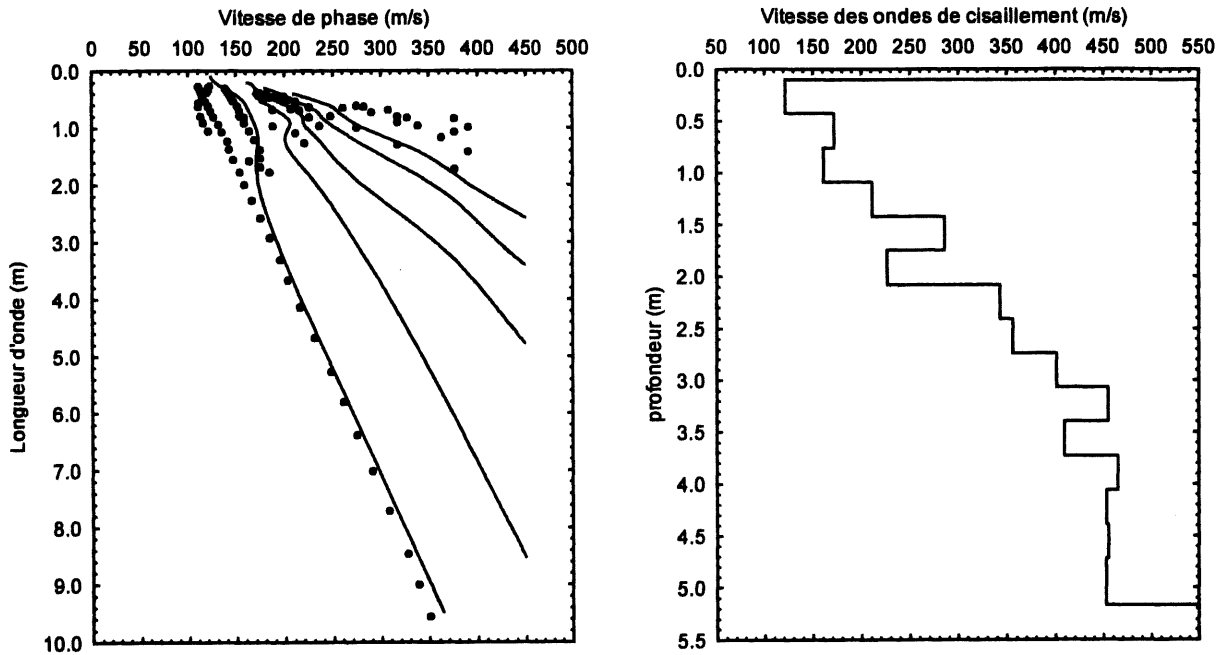


Figure A5.1 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement CH: 0+030 - ligne N° 1 - profil N° 1.

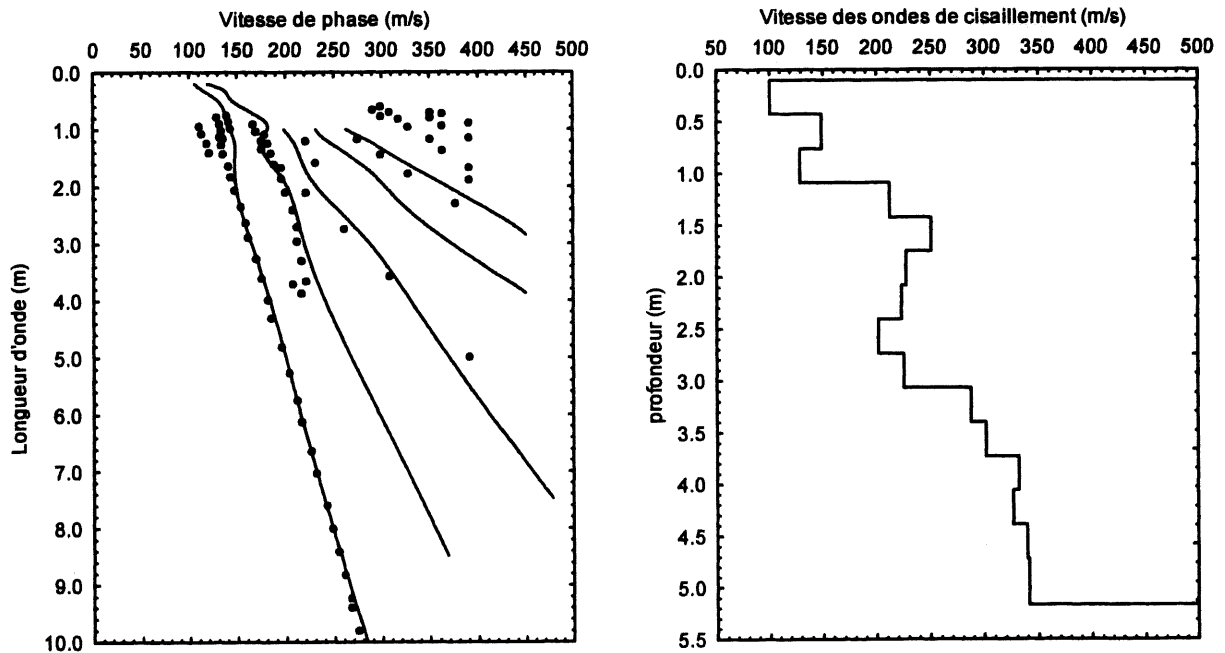


Figure A5.2 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement CH: 0+030 - ligne N° 1 - profil N° 2.

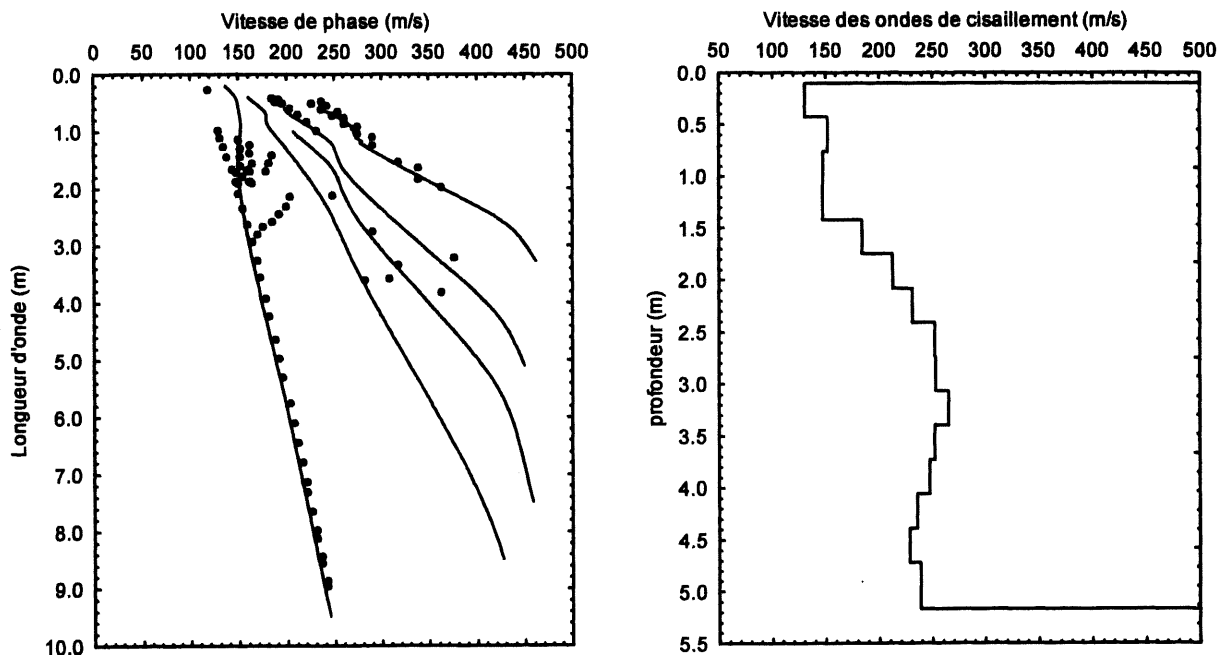


Figure A5.3 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement CH: 0+030 - ligne N° 1 - profil N° 3.

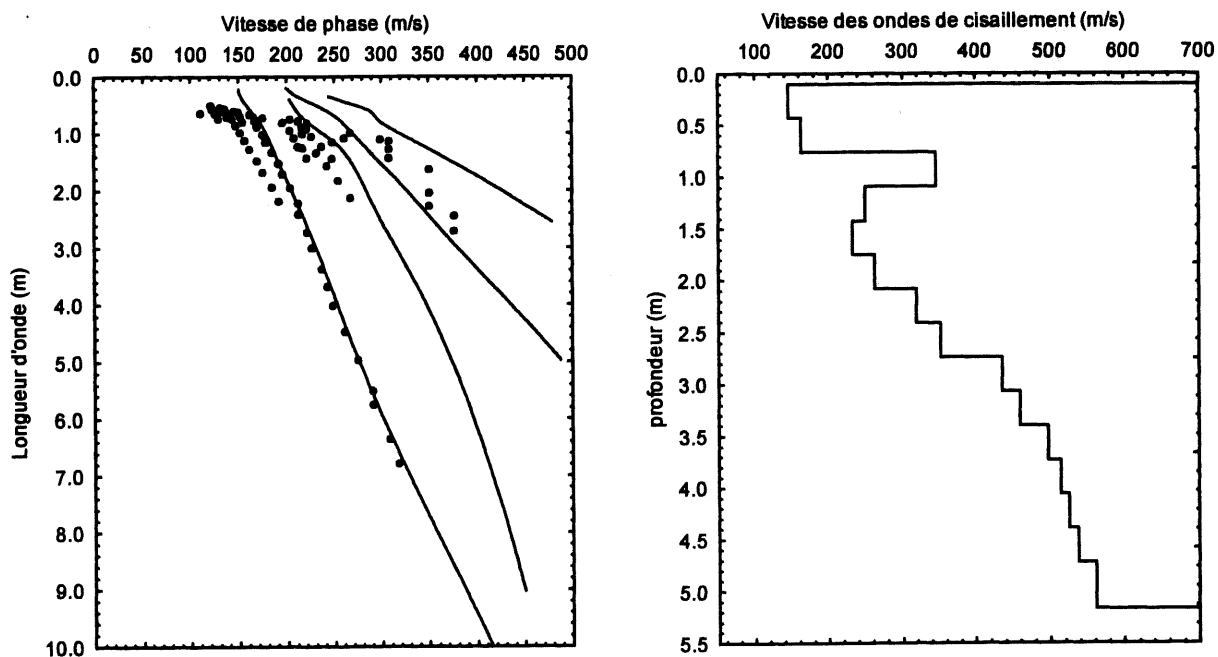


Figure A5.4 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement CH: 0+030 - ligne N° 1 - profil N° 4.

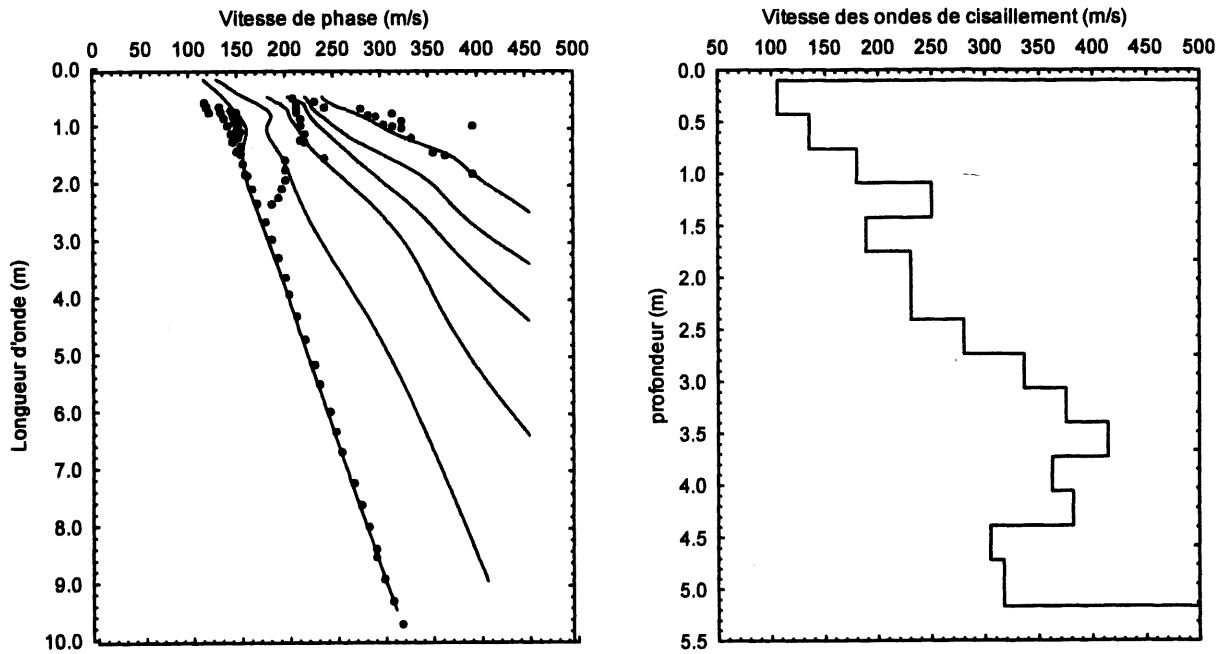


Figure A5.5 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement CH: 0+030 - ligne N° 1 - profil N° 5.

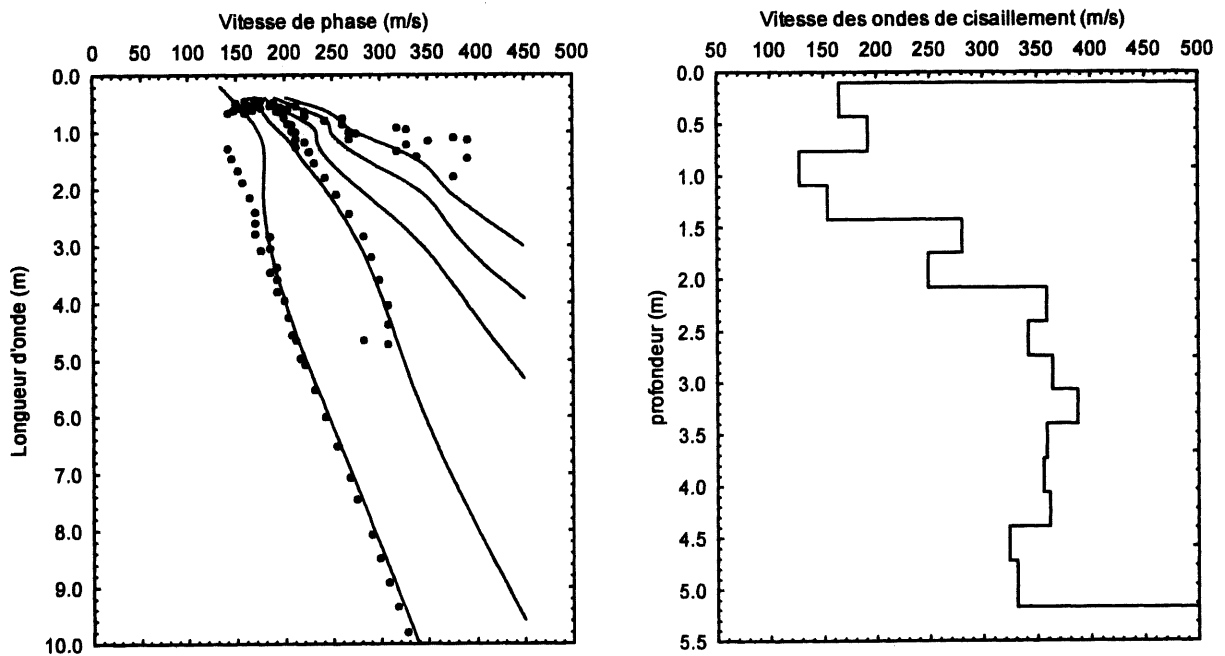


Figure A5.6 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement CH: 0+030 - ligne N° 1 - profil N° 6.

ANNEXE 6

**COURBES DE DISPERSION ET PROFILS DE VITESSE DES
ONDES DE CISAILLEMENT DES ESSAIS MASW SUR LA
LIGNE 2
SITE DE SHERBROOKE**

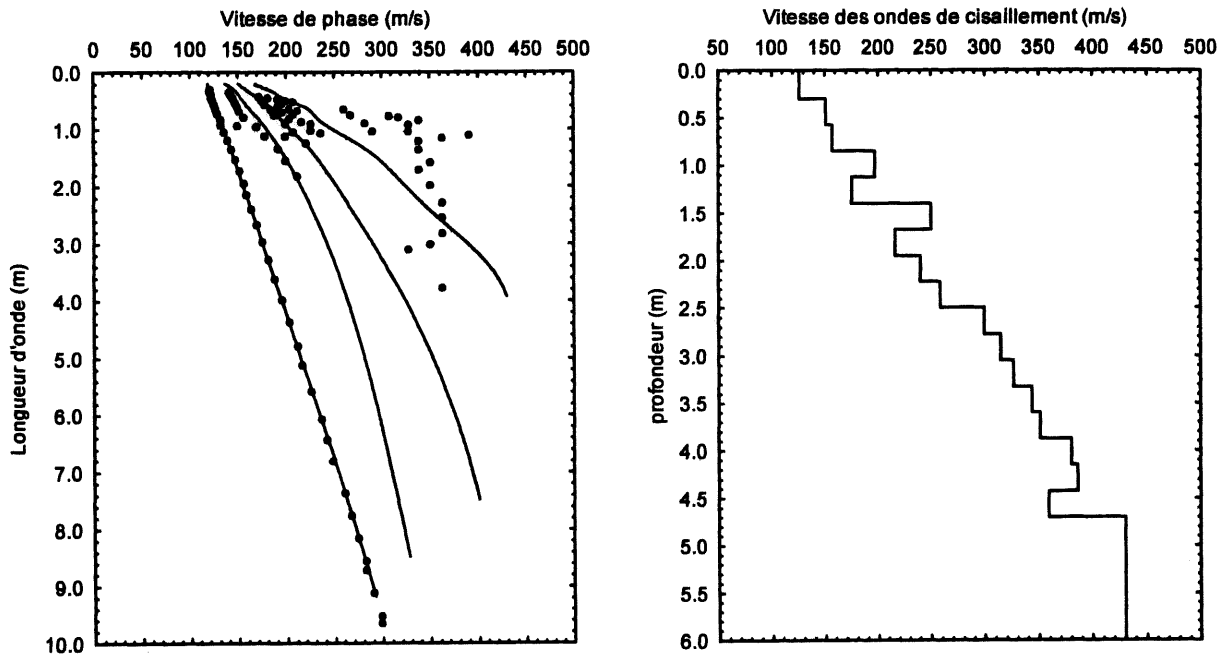


Figure A6.1 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement CH: 0+030 - ligne N° 2 - profil N° 1.

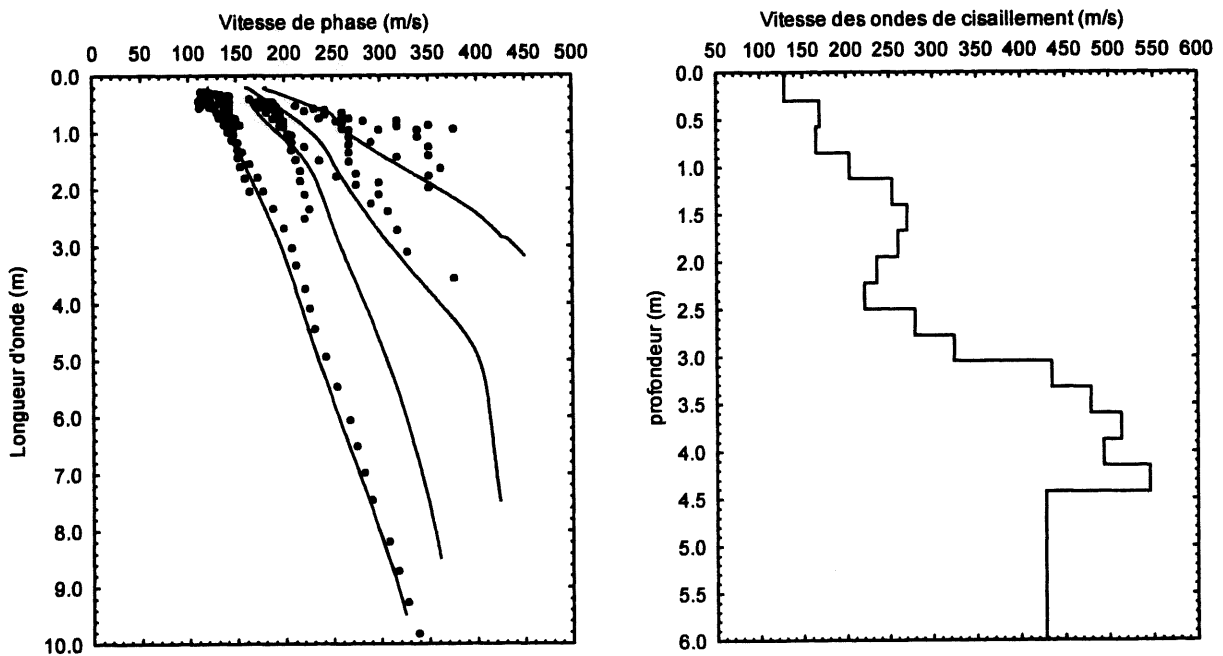


Figure A6.2 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement CH: 0+030 - ligne N° 2 - profil N° 2.

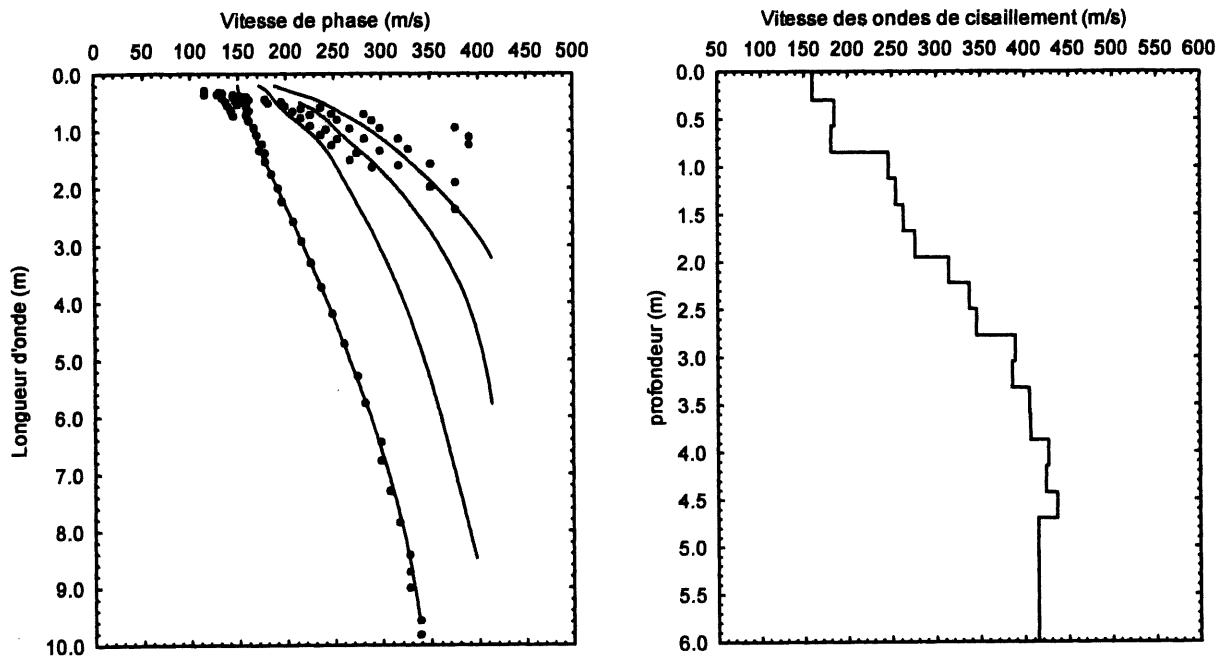


Figure A6.3 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement CH: 0+030 - ligne N° 2 - profil N° 3.

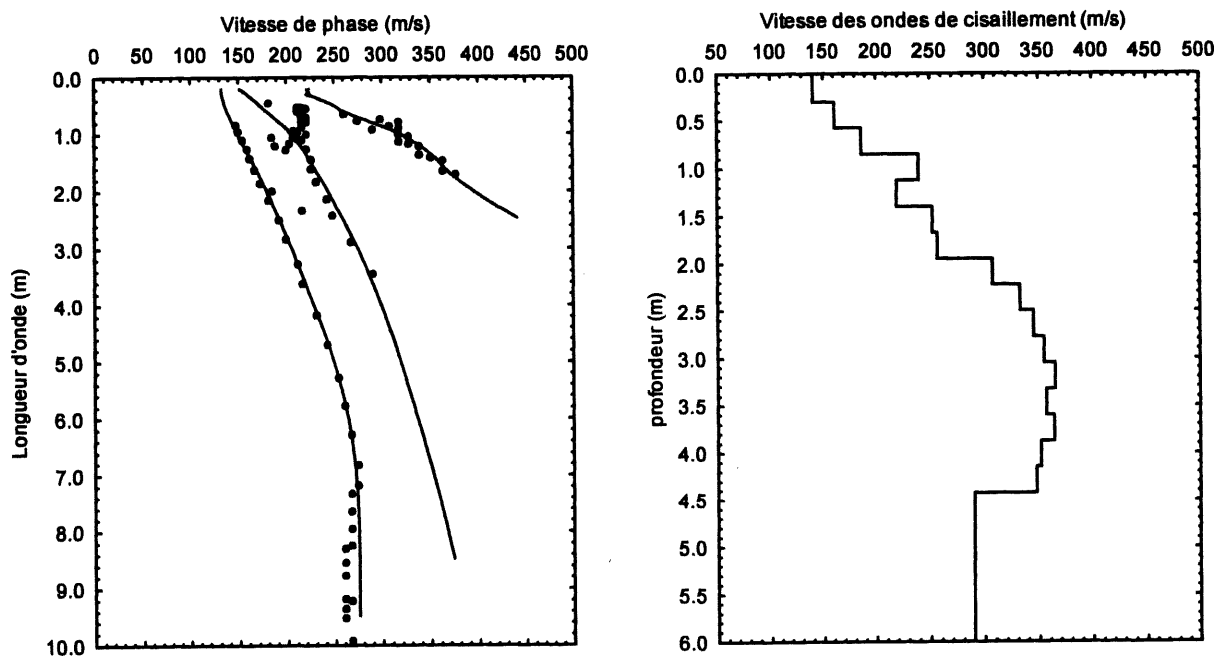


Figure A6.4 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement CH: 0+030 - ligne N° 2 - profil N° 4.

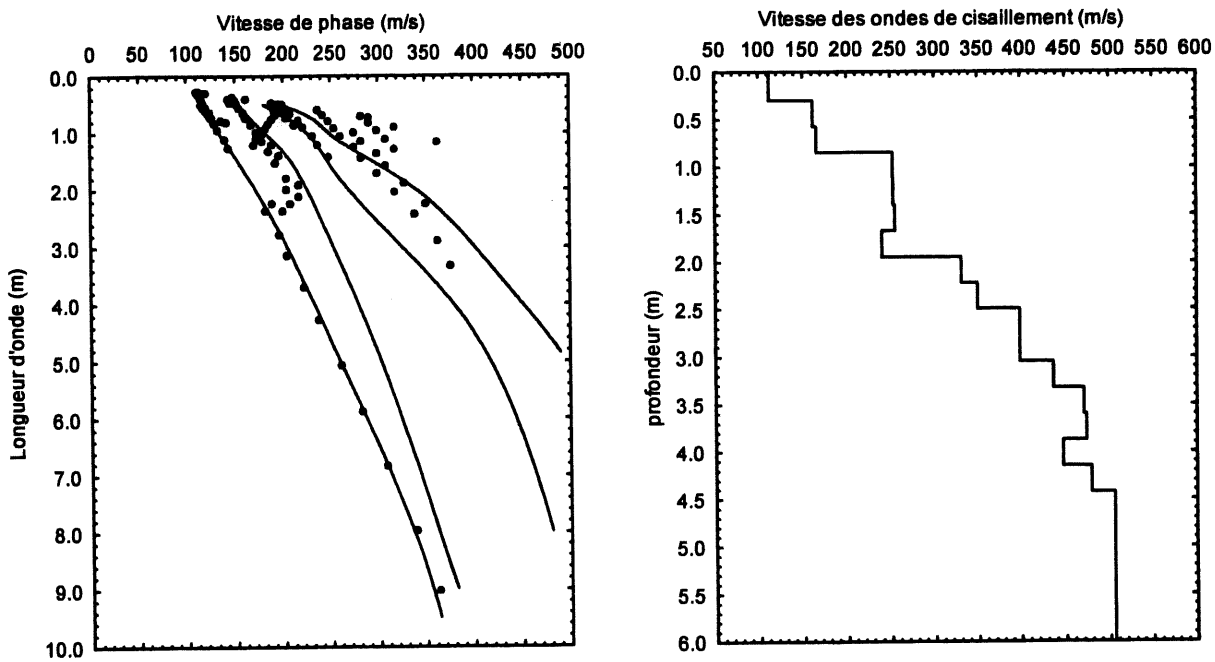


Figure A6.5 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement CH: 0+030 - ligne N° 2 - profil N° 5.

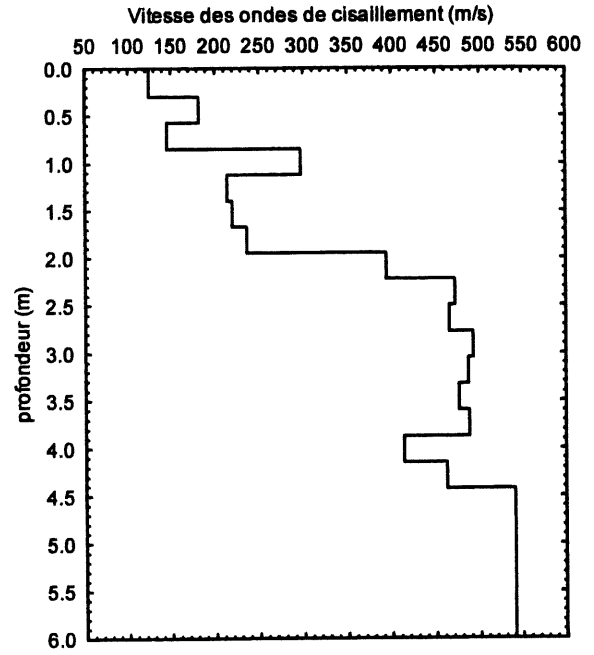
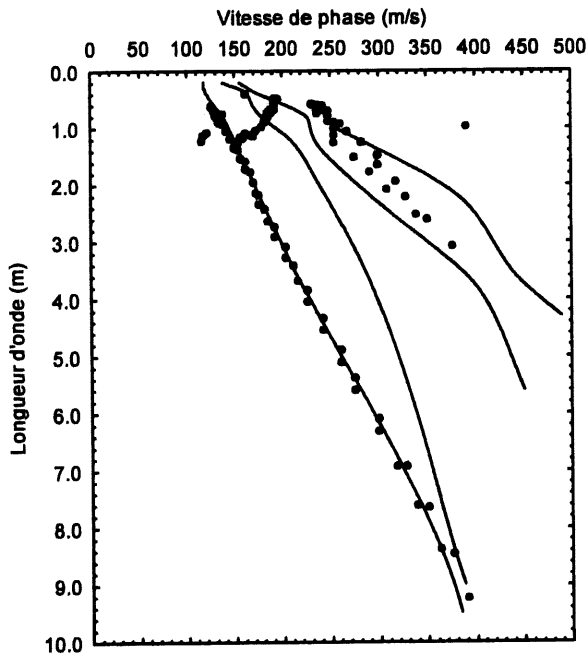


Figure A6.6 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement CH: 0+030 - ligne N° 2 - profil N° 6.

ANNEXE 7

COURBES DE DISPERSION ET PROFILS DE VITESSE DES ONDES DE CISAILLEMENT DES ESSAIS MASW SUR LA LIGNE 1 SITE DE SAINTE-AGATHE

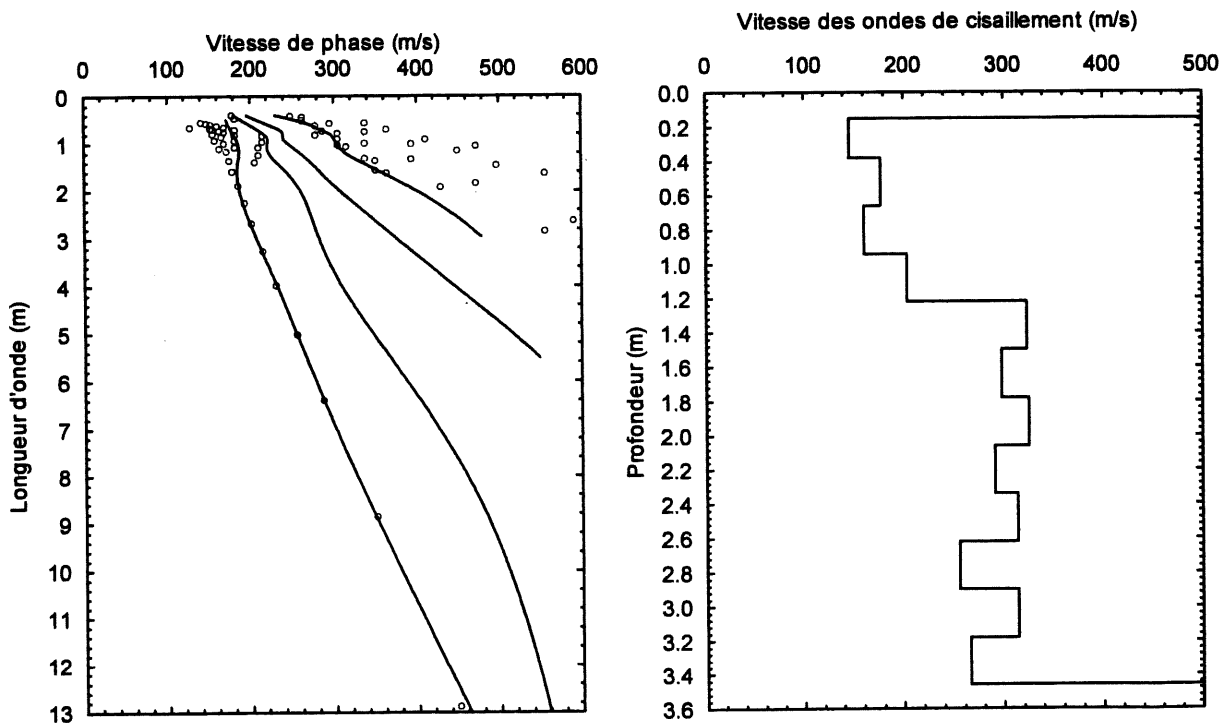


Figure A7.1 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 1 - profil N° 1.

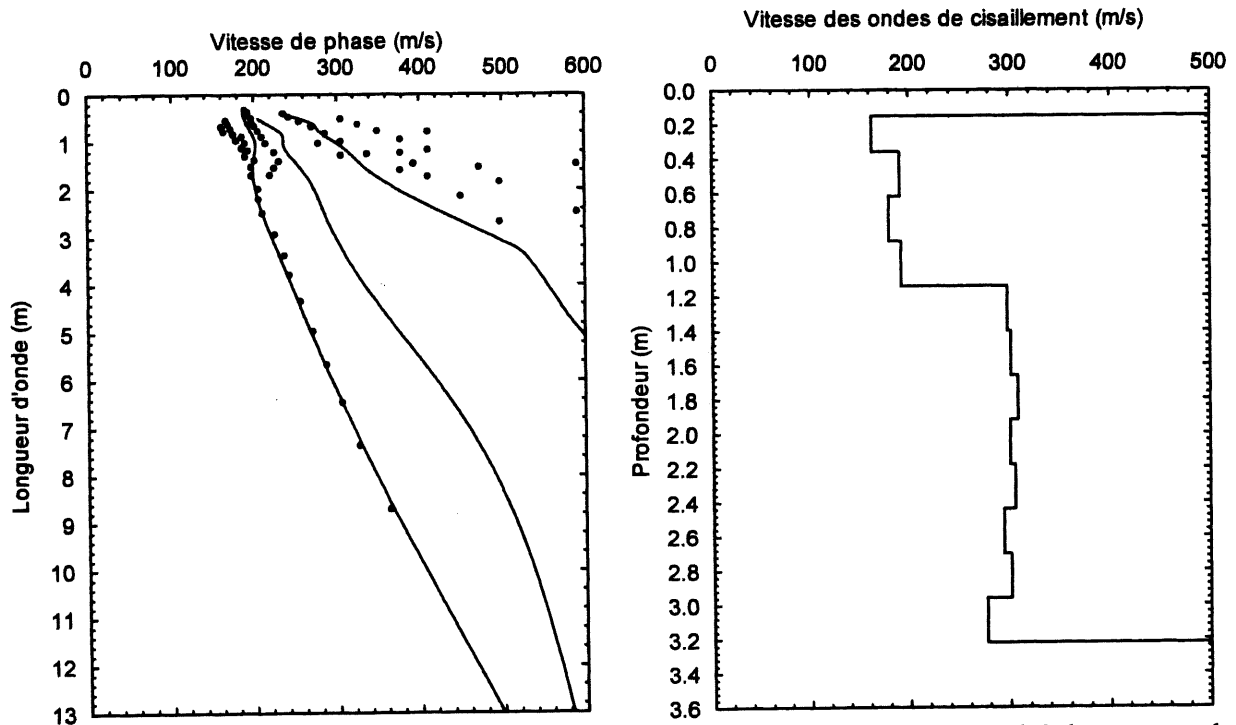


Figure A7.2 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 1 - profil N° 2.

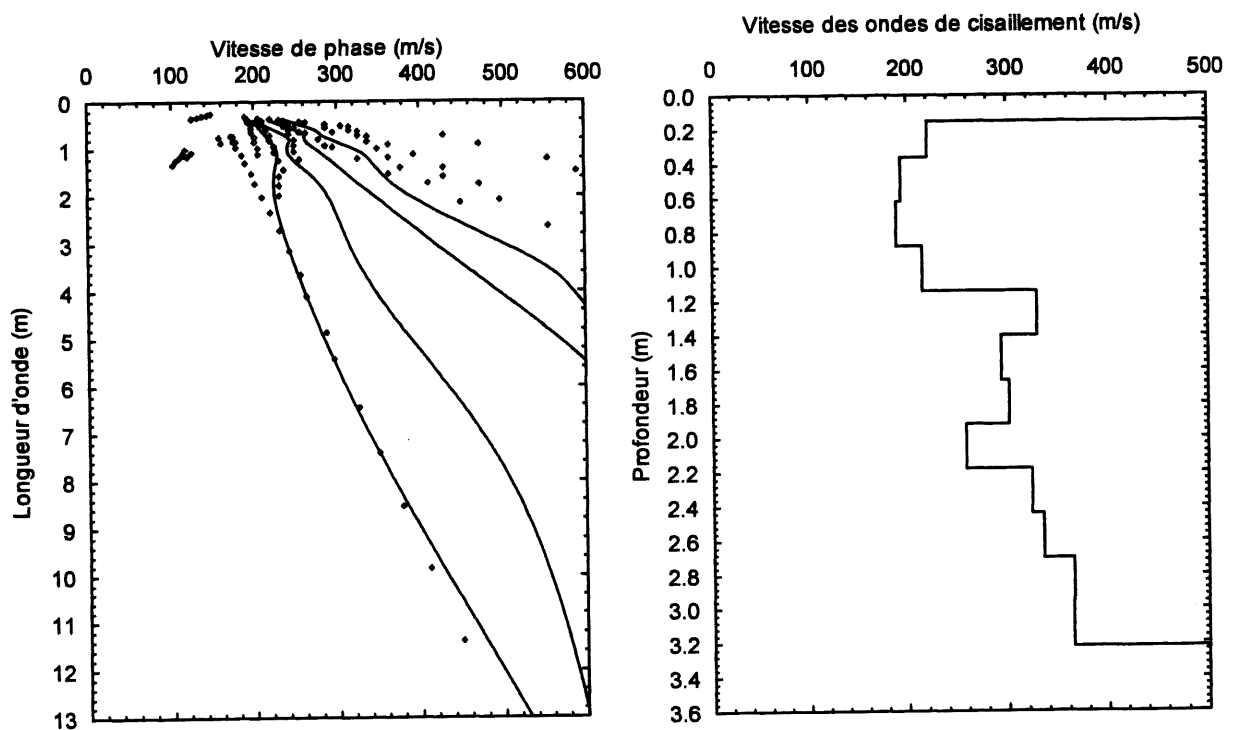


Figure A7.3 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 1 - profil N° 3.

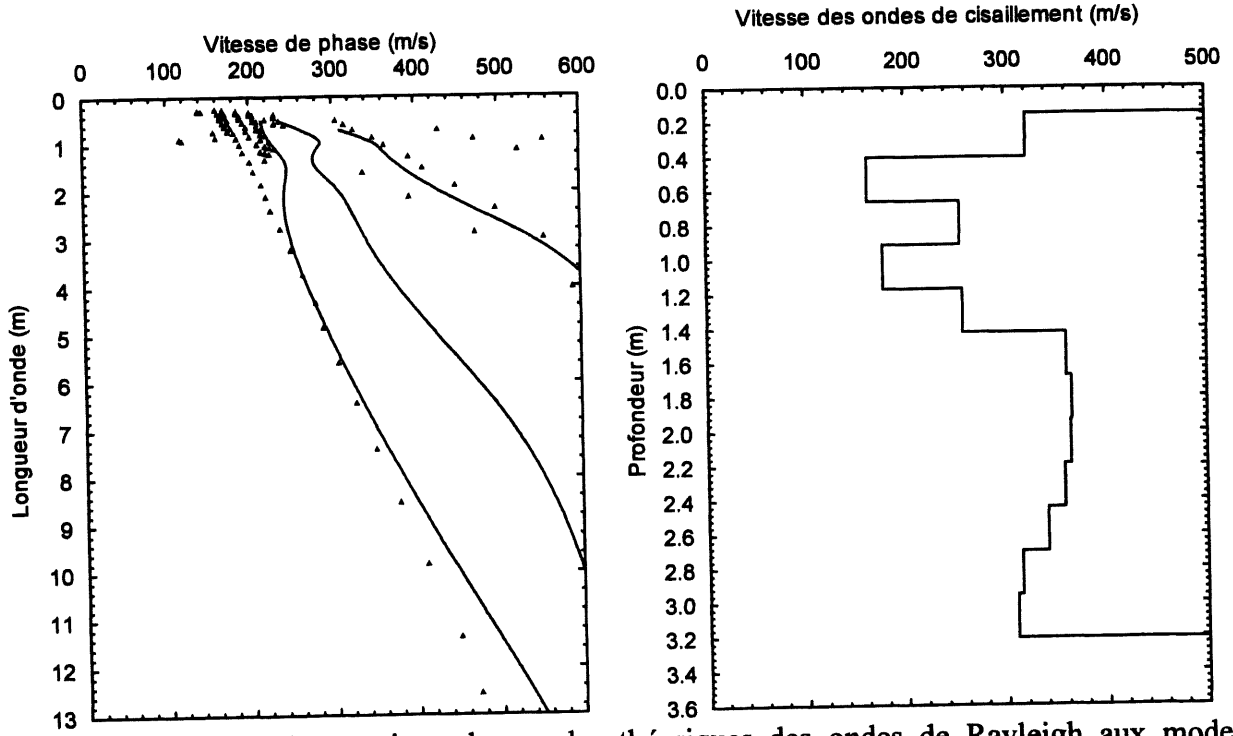


Figure A7.4 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 1 - profil N° 4.

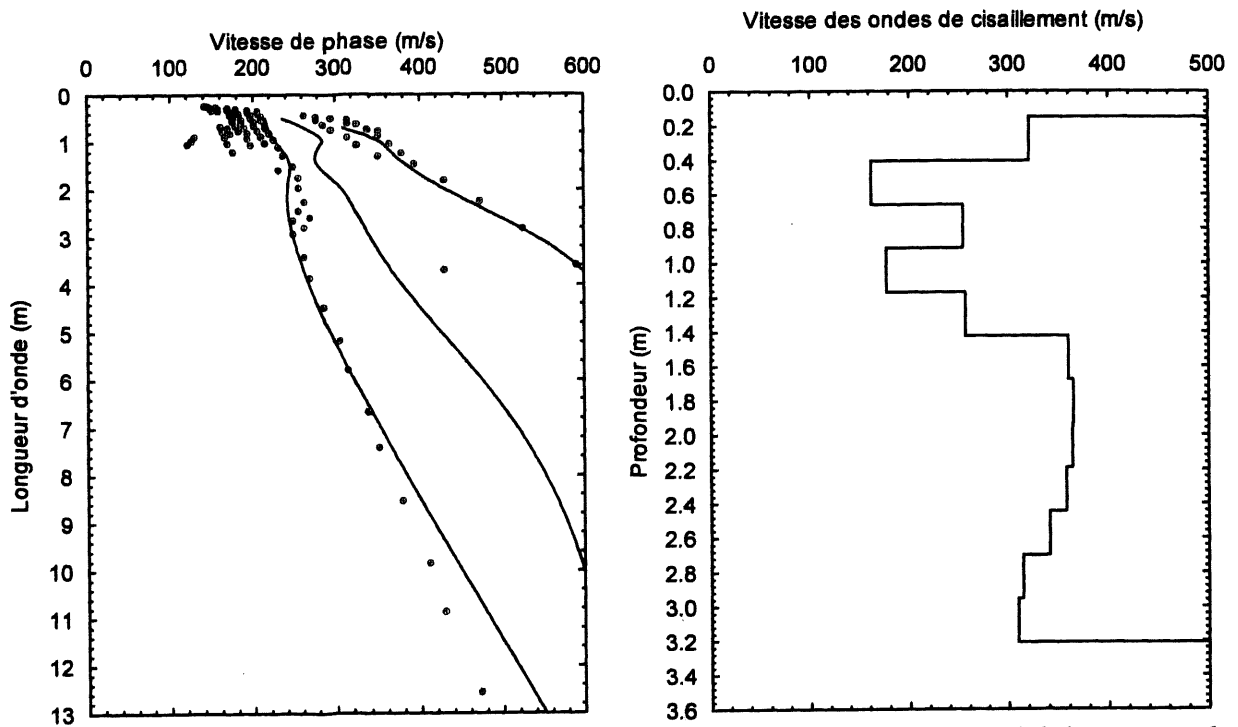


Figure A7.5 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 1 - profil N° 5.

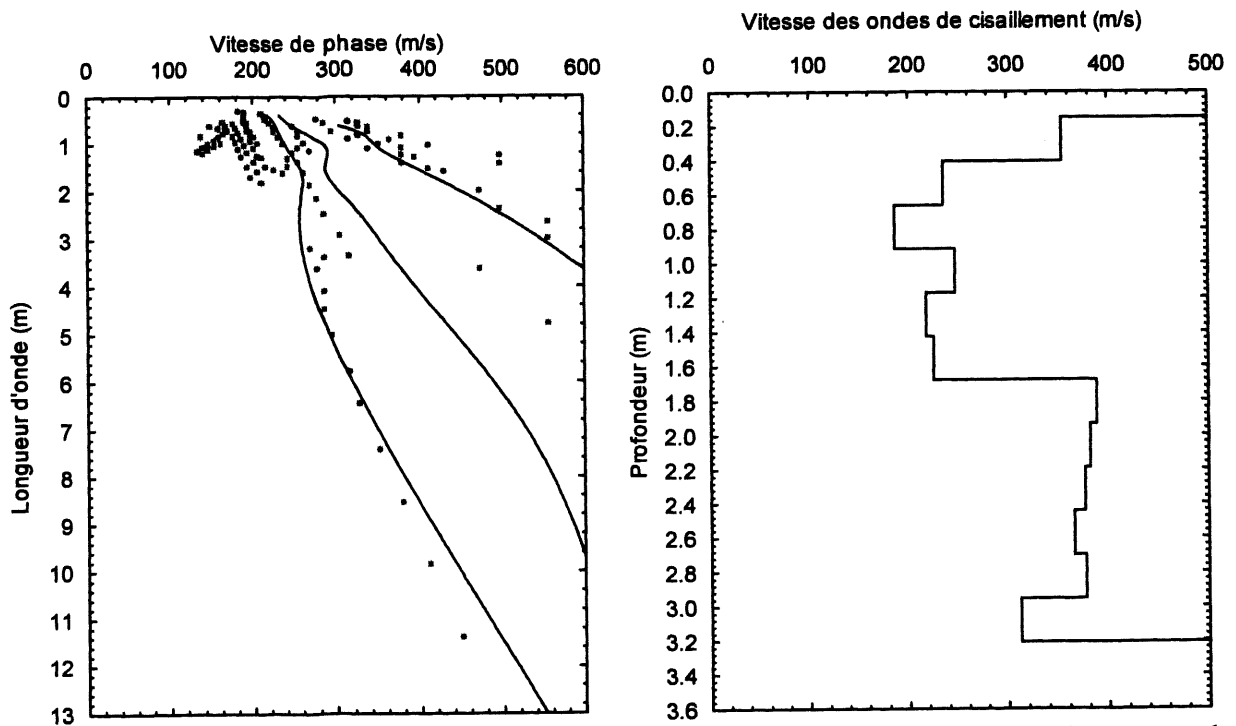


Figure A7.6 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 1 - profil N° 6.

ANNEXE 8

**COURBES DE DISPERSION ET PROFILS DE VITESSE DES
ONDES DE CISAILLEMENT DES ESSAIS MASW SUR LA
LIGNE 2
SITE DE SAINTE-AGATHE**

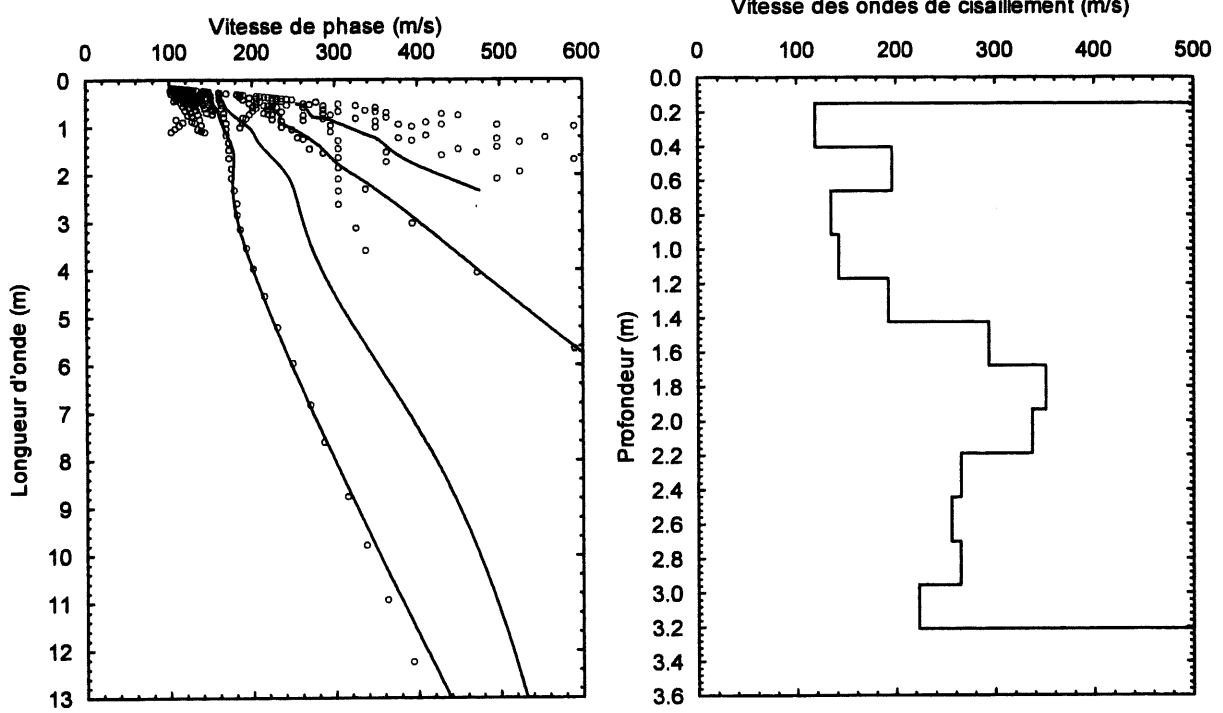


Figure A8.1 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 2 - profil N° 1.

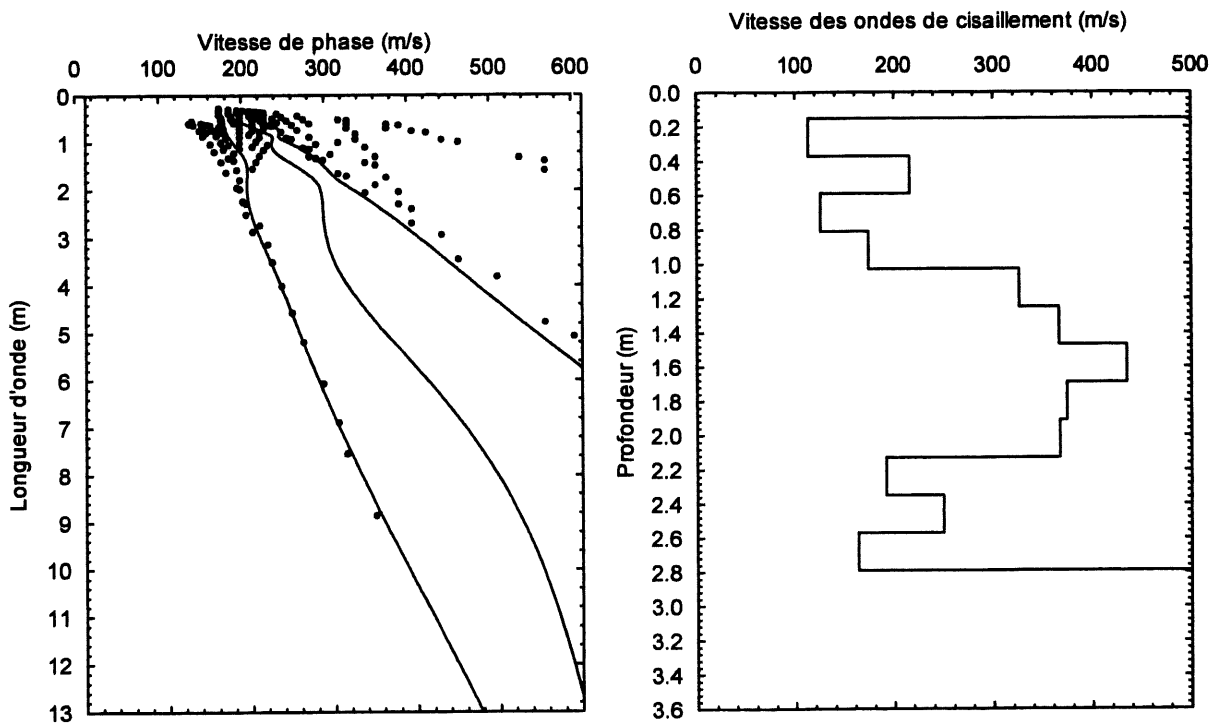


Figure A8.2 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 2 - profil N° 2.

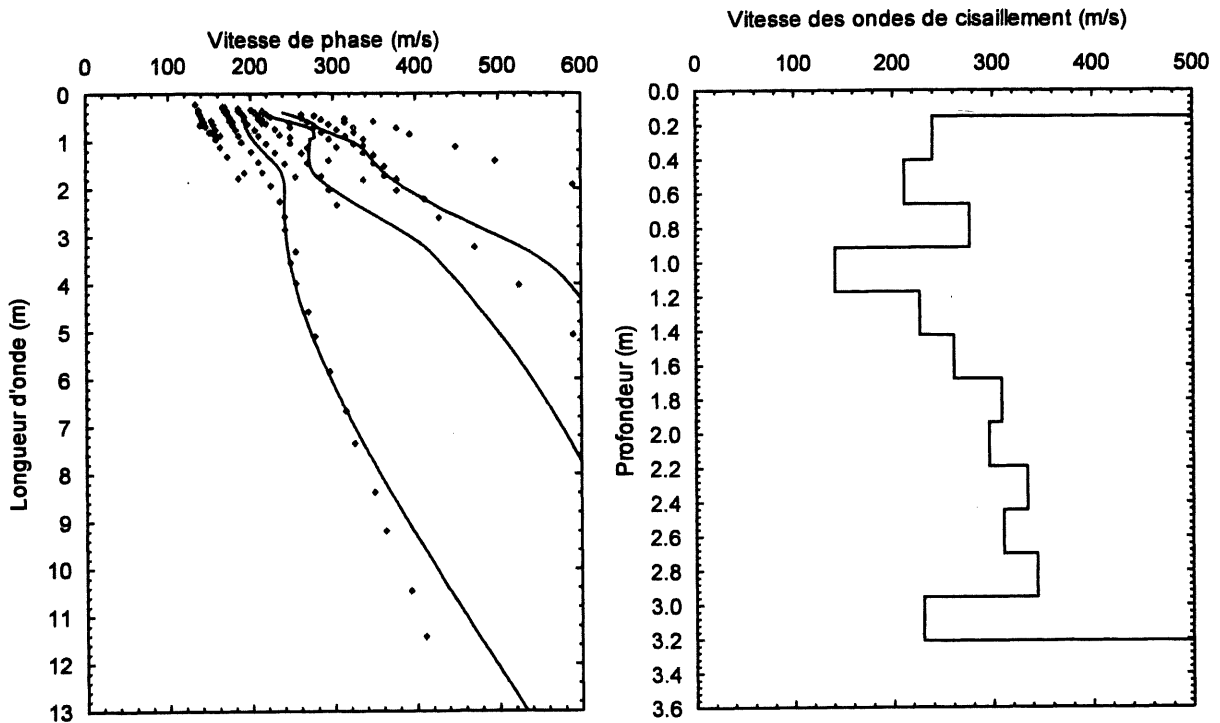


Figure A8.3 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 2 - profil N° 3.

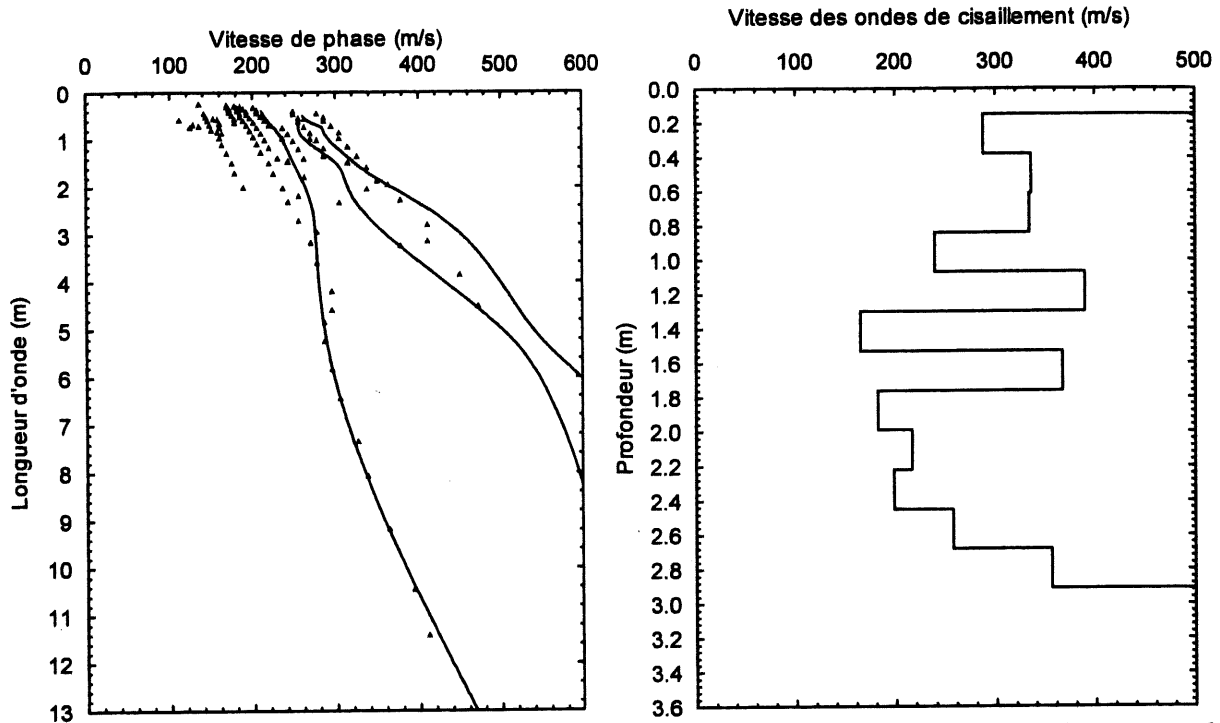


Figure A8.4 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 2 - profil N° 4.

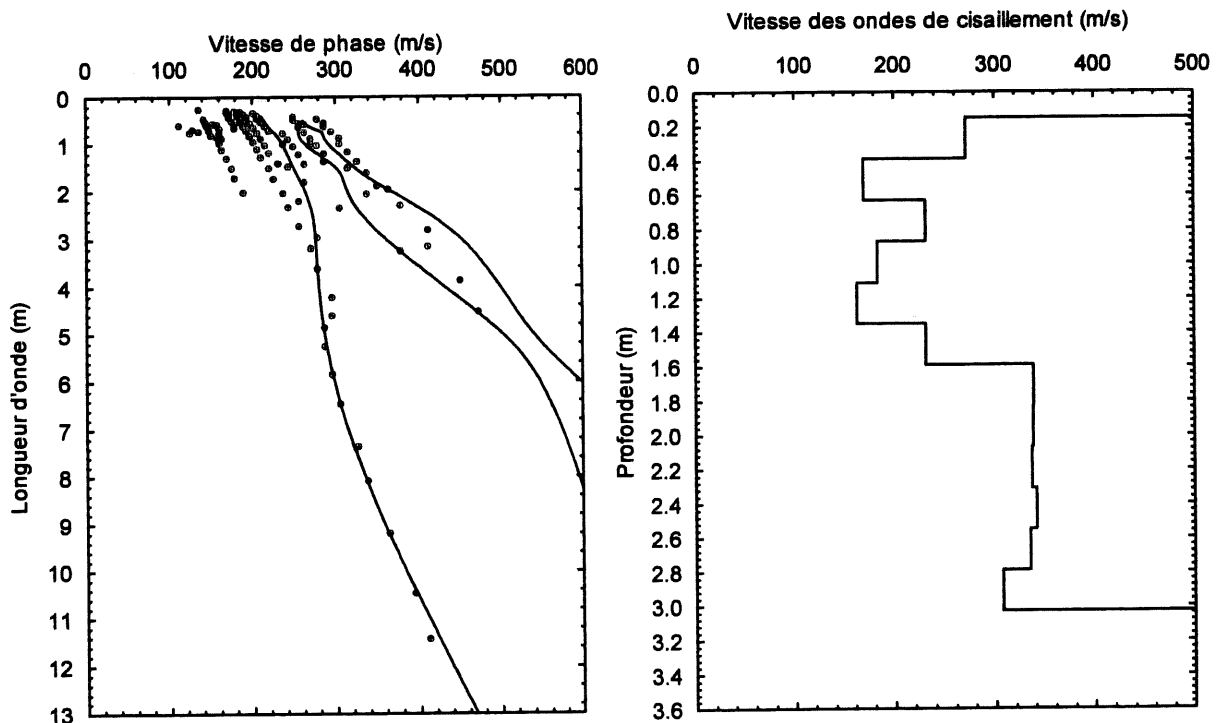


Figure A8.5 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 2 - profil N° 5.

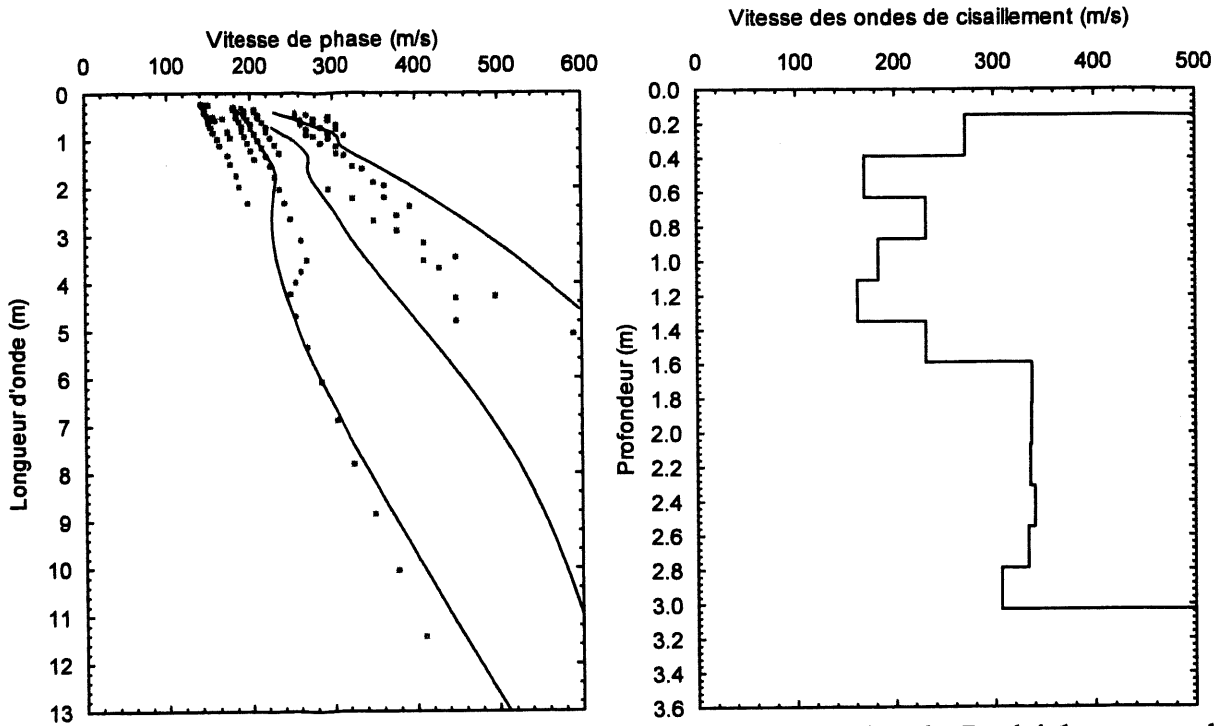


Figure A8.6 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 2 - profil N° 6.

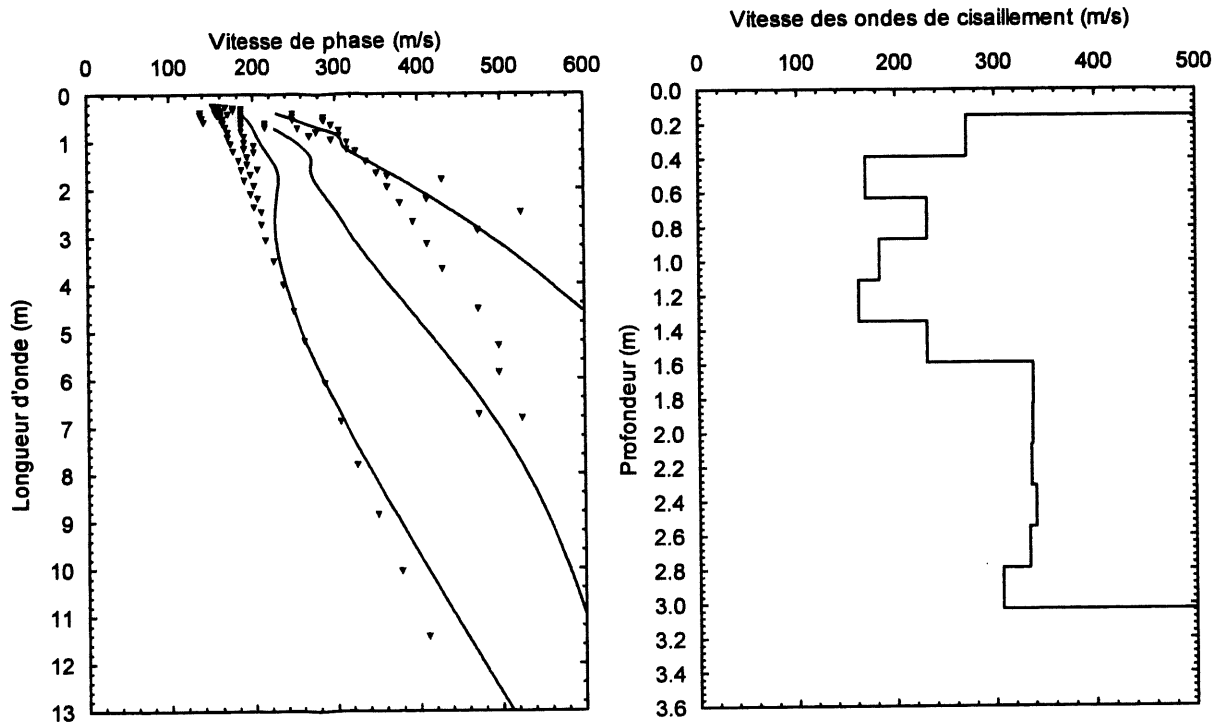


Figure A8.7 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 2 - profil N° 7.

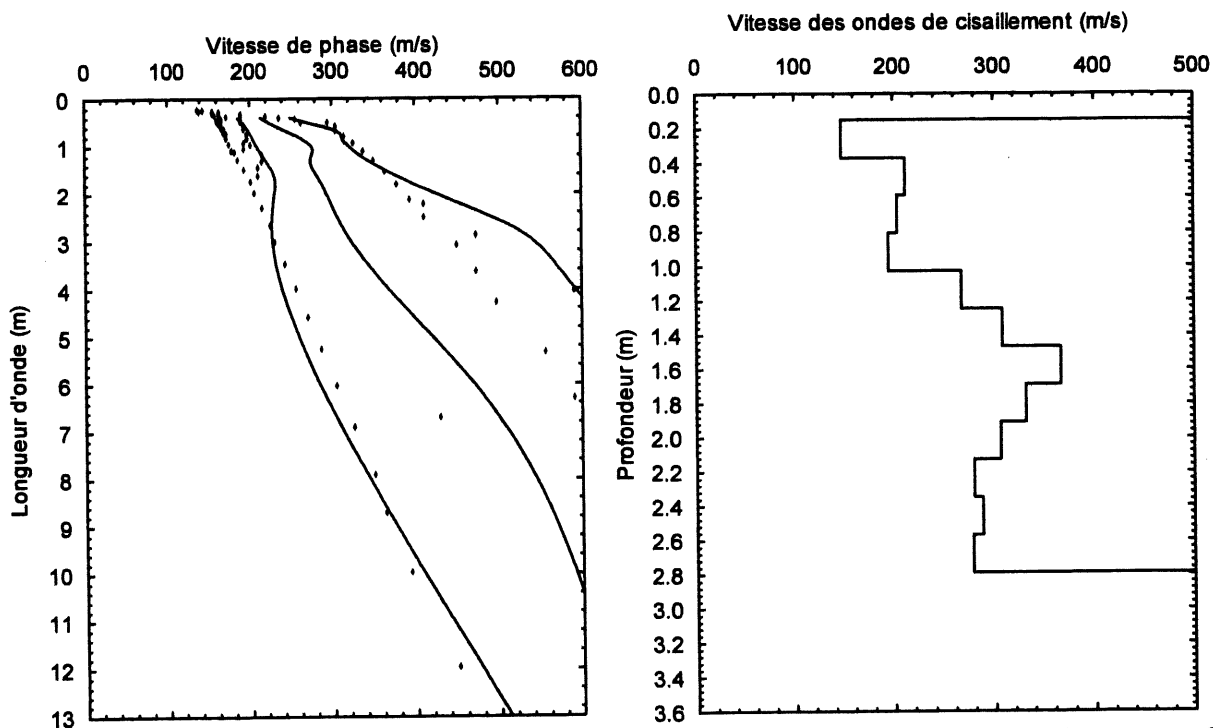


Figure A8.8 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 2 - profil N° 8.

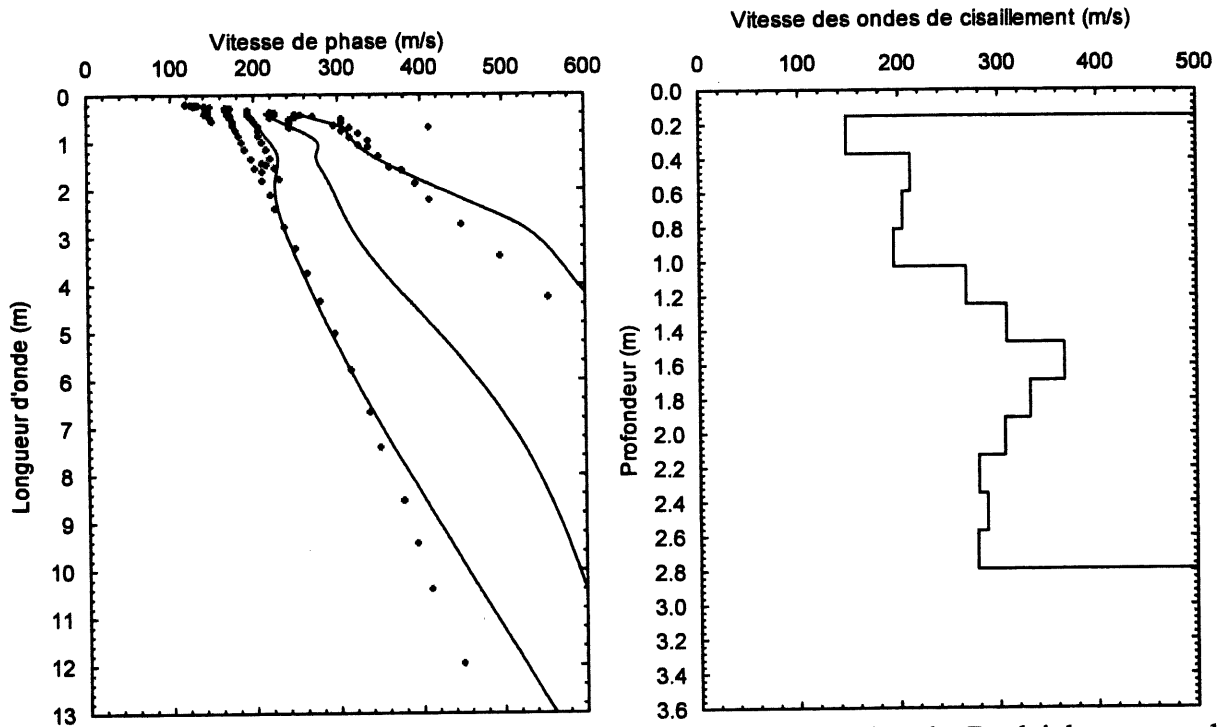


Figure A8.9 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 2 - profil N° 9.

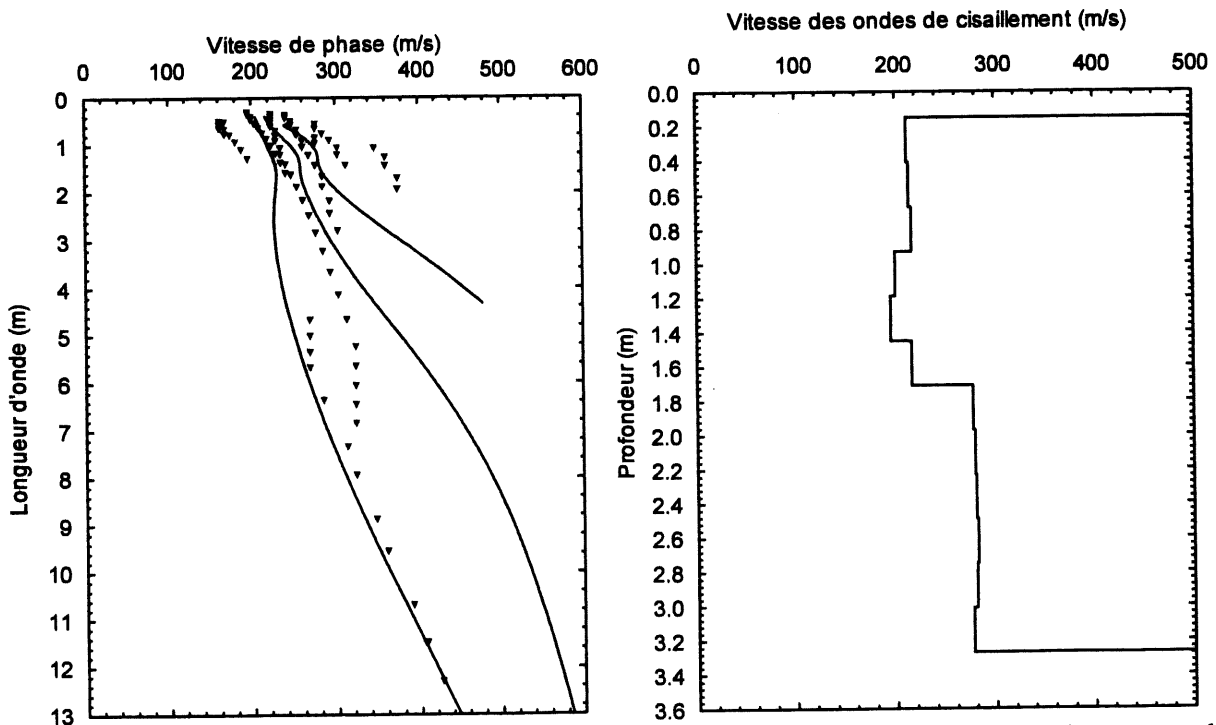


Figure A8.10 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 2 - profil N° 10.

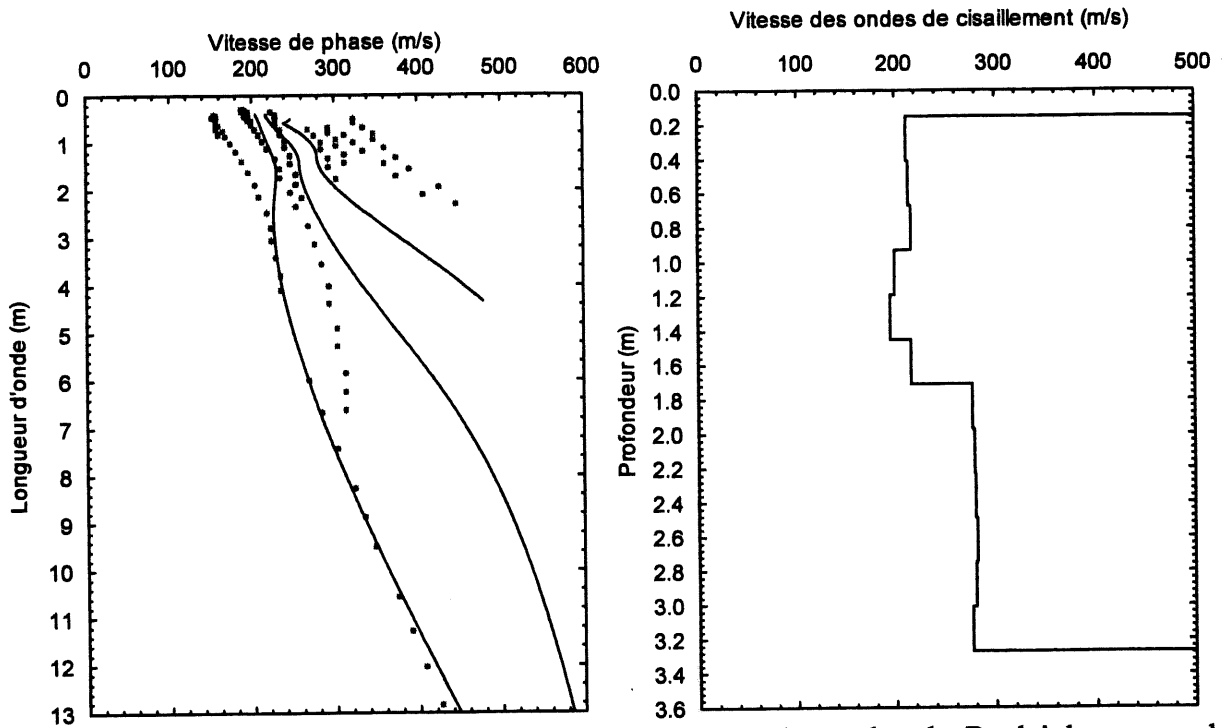


Figure A8.11 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 2 - profil N° 11.

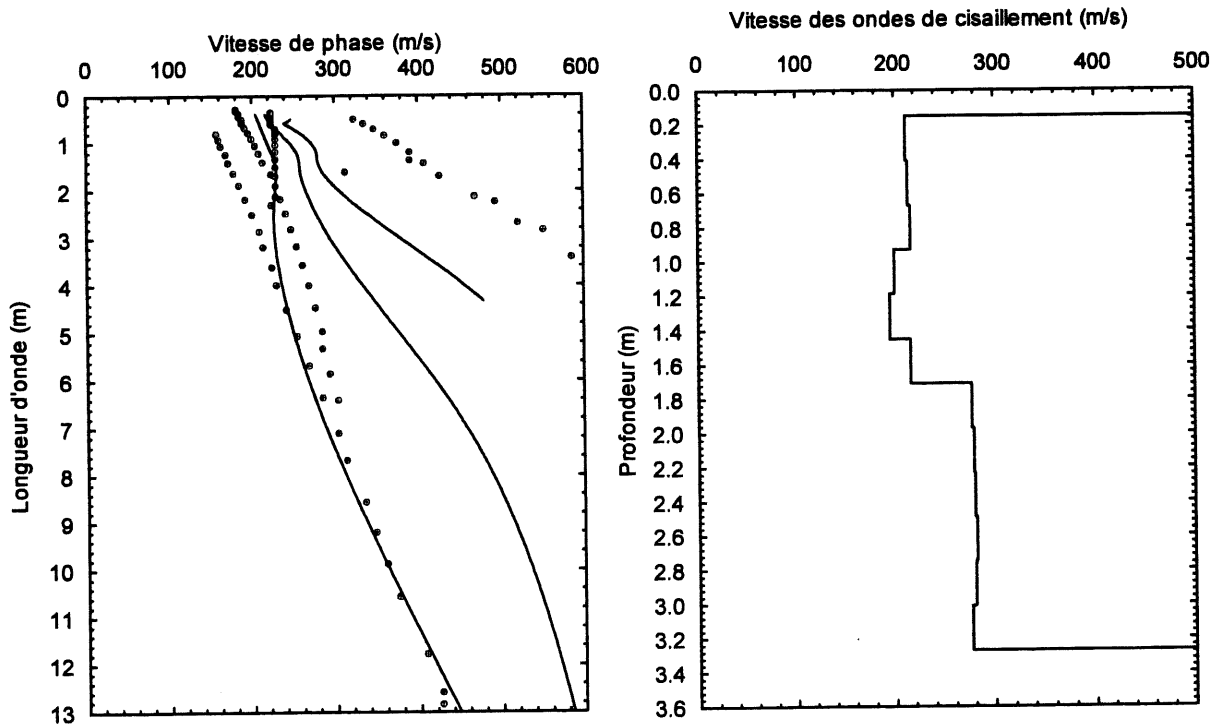


Figure A8.12 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 2 - profil N° 12.

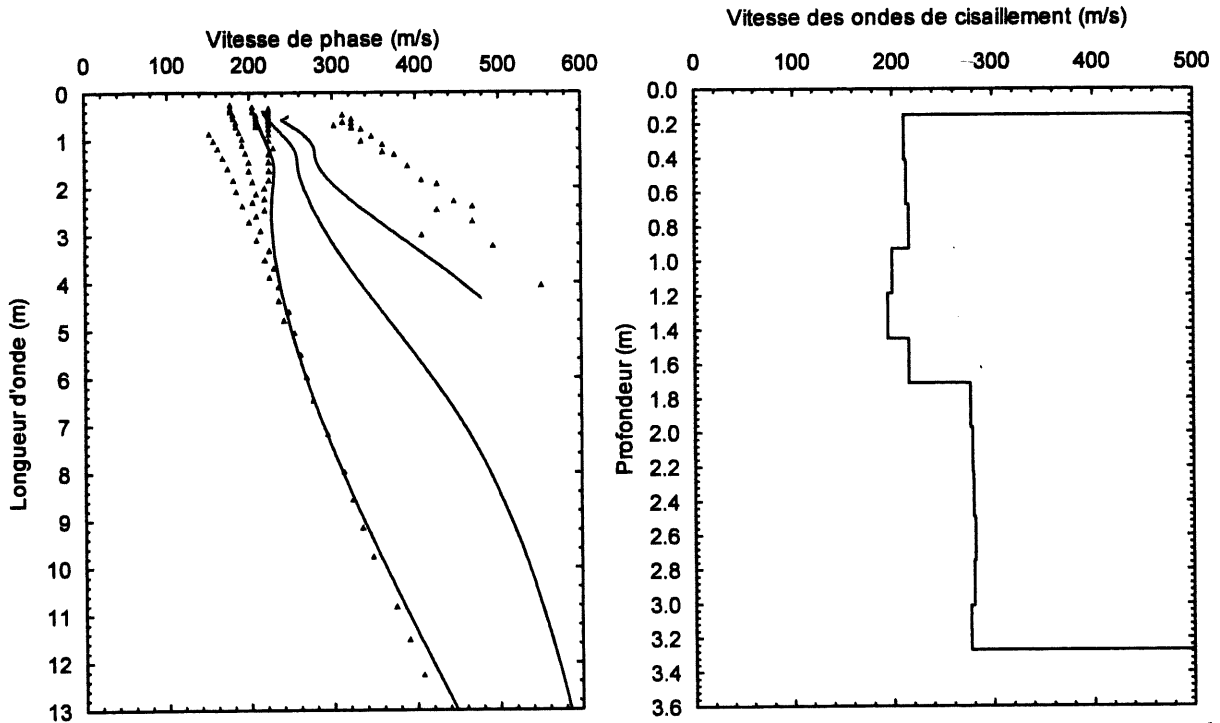


Figure A8.13 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 2 - profil N° 13.

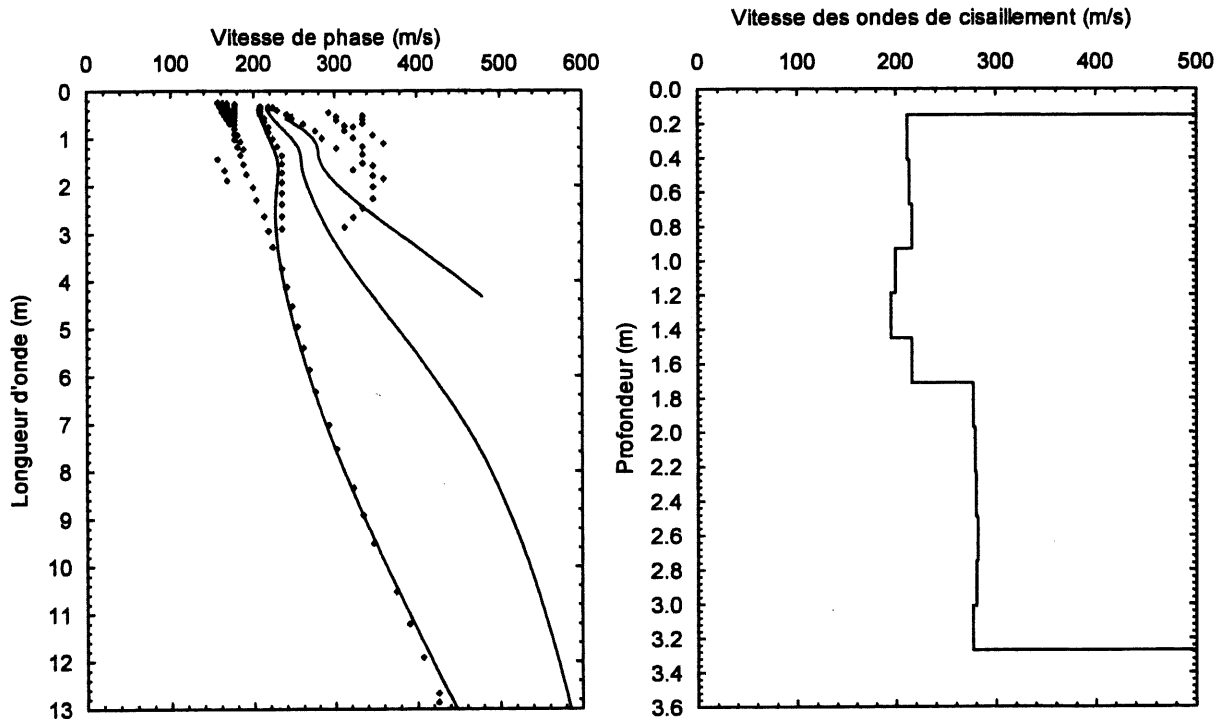


Figure A8.14 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 2 - profil N° 14.

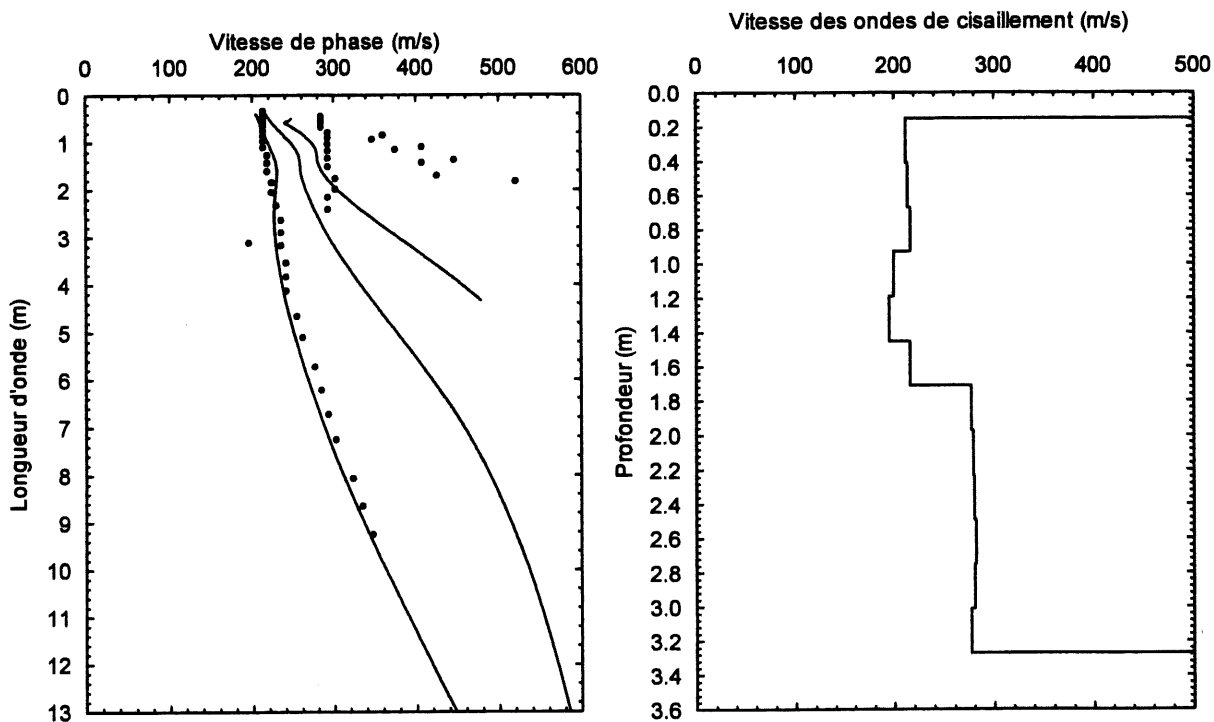


Figure A8.15 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 2 - profil N° 15.

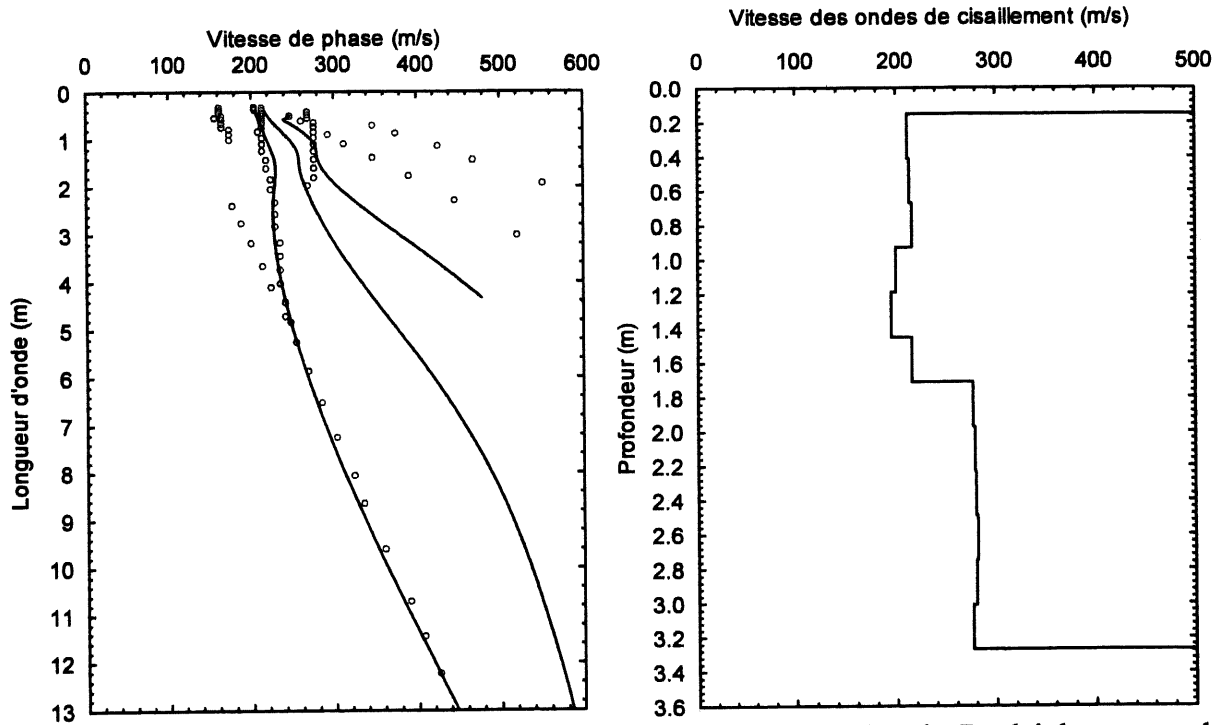


Figure A8.16 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 2 - profil N° 16.

ANNEXE 9

COURBES DE DISPERSION ET PROFILS DE VITESSE DES
ONDES DE CISAILLEMENT DES ESSAIS MASW SUR LA
LIGNE 3
SITE DE SAINTE-AGATHE

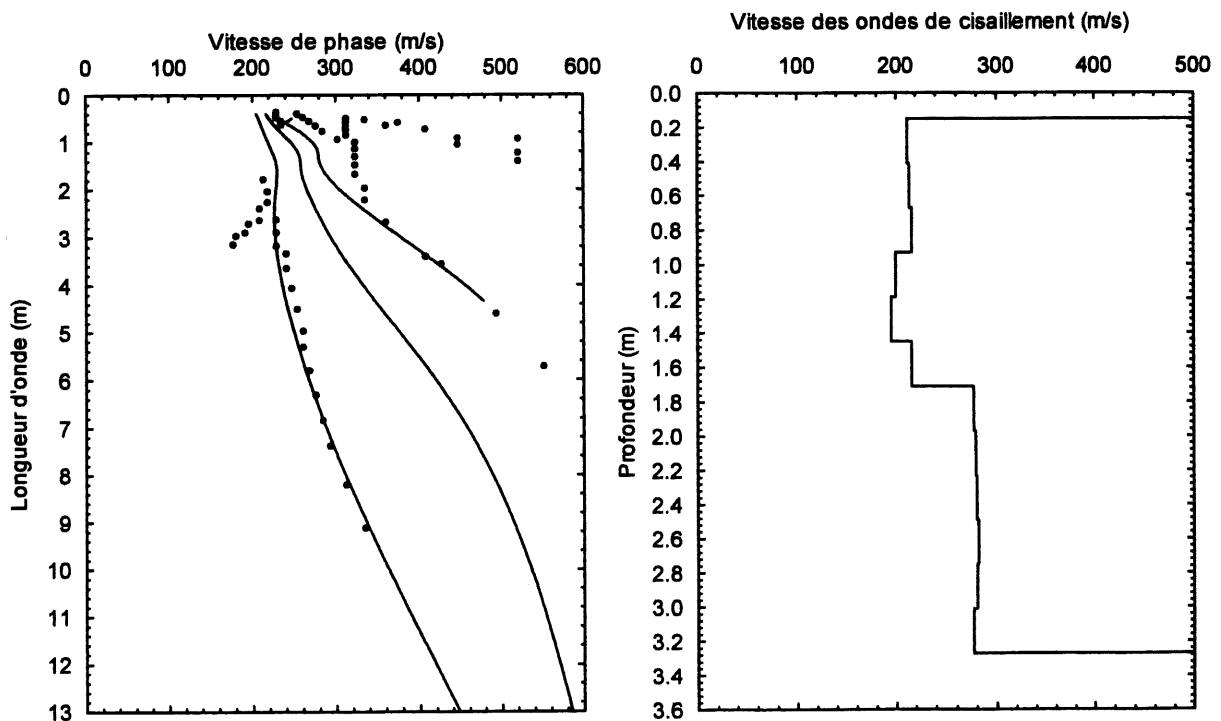


Figure A9.1 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 3 - profil N° 1.

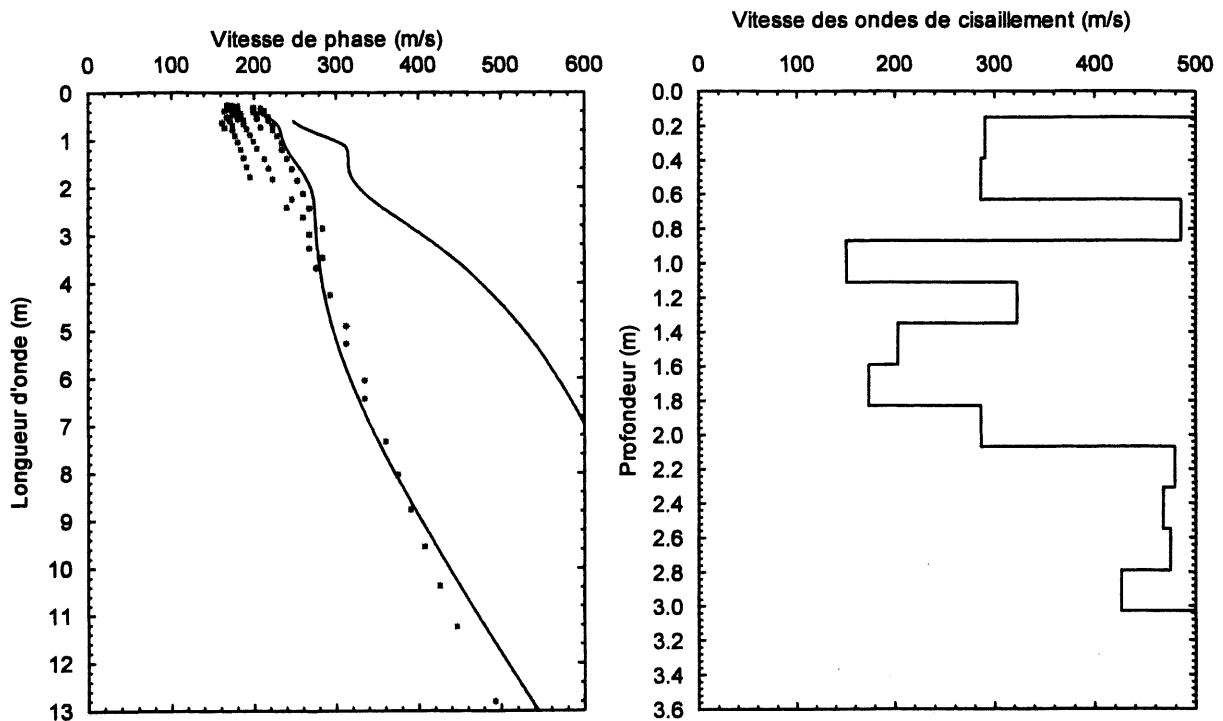


Figure A9.2 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 3 - profil N° 2.

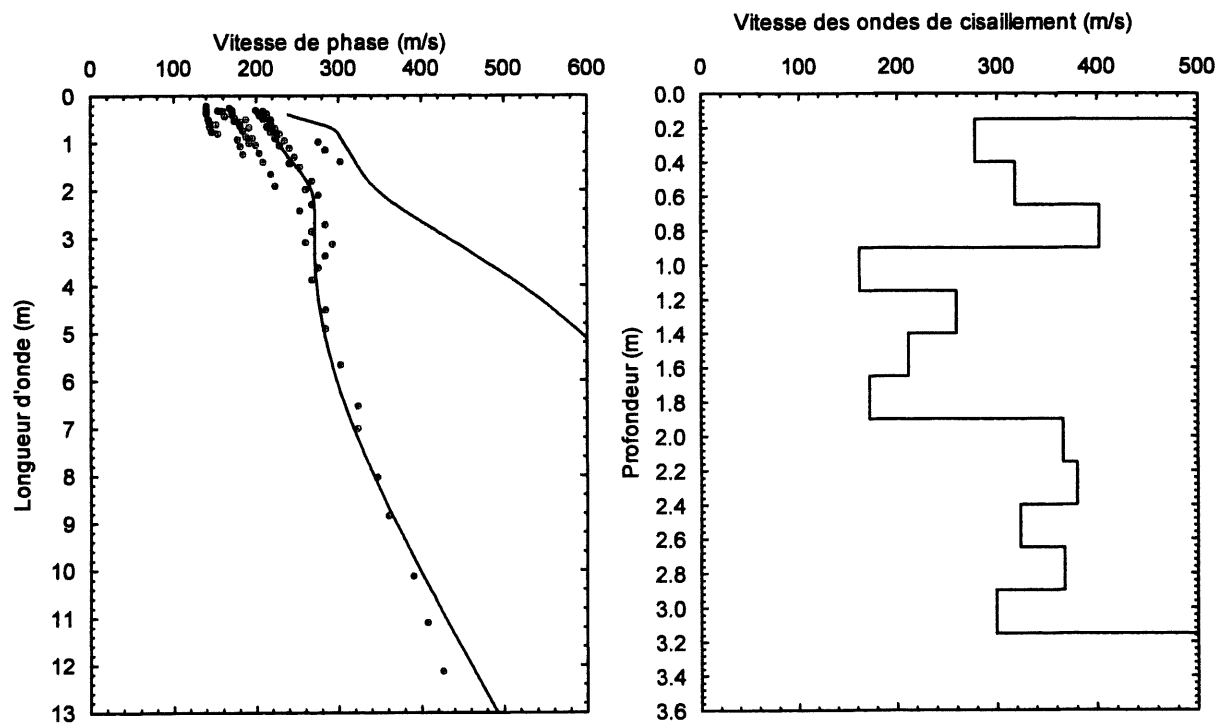


Figure A9.3 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 3 - profil N° 3.

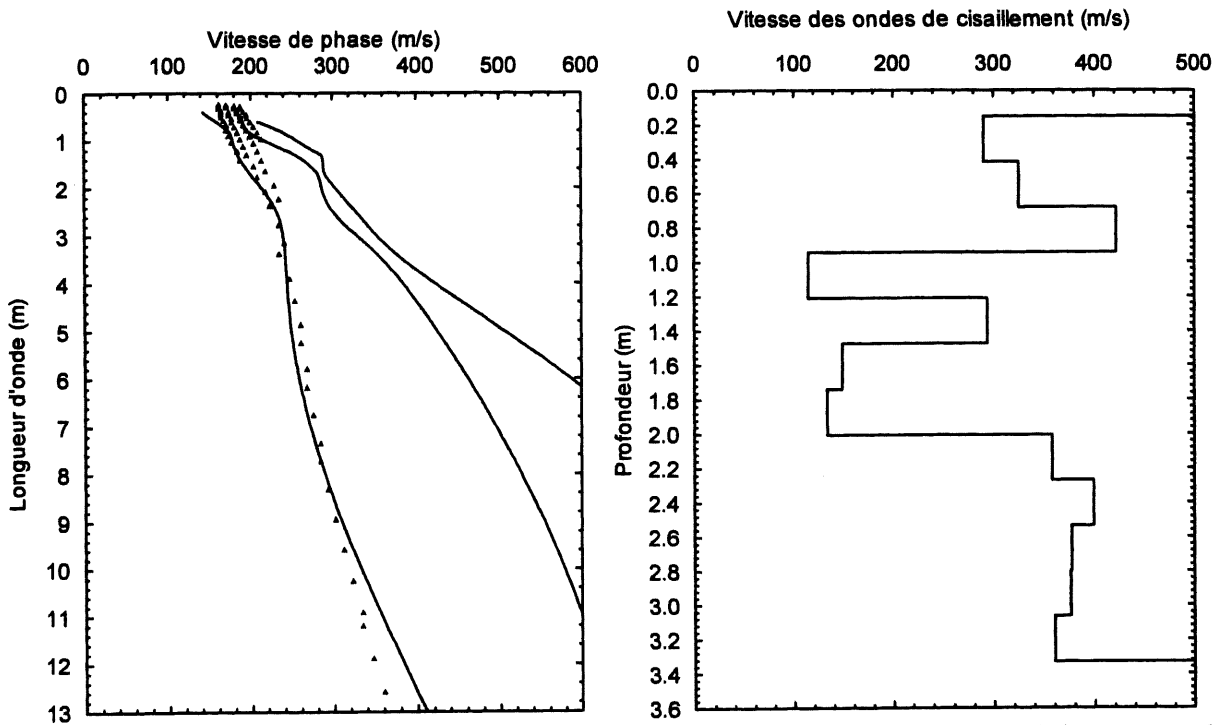


Figure A9.4 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 3 - profil N° 4.

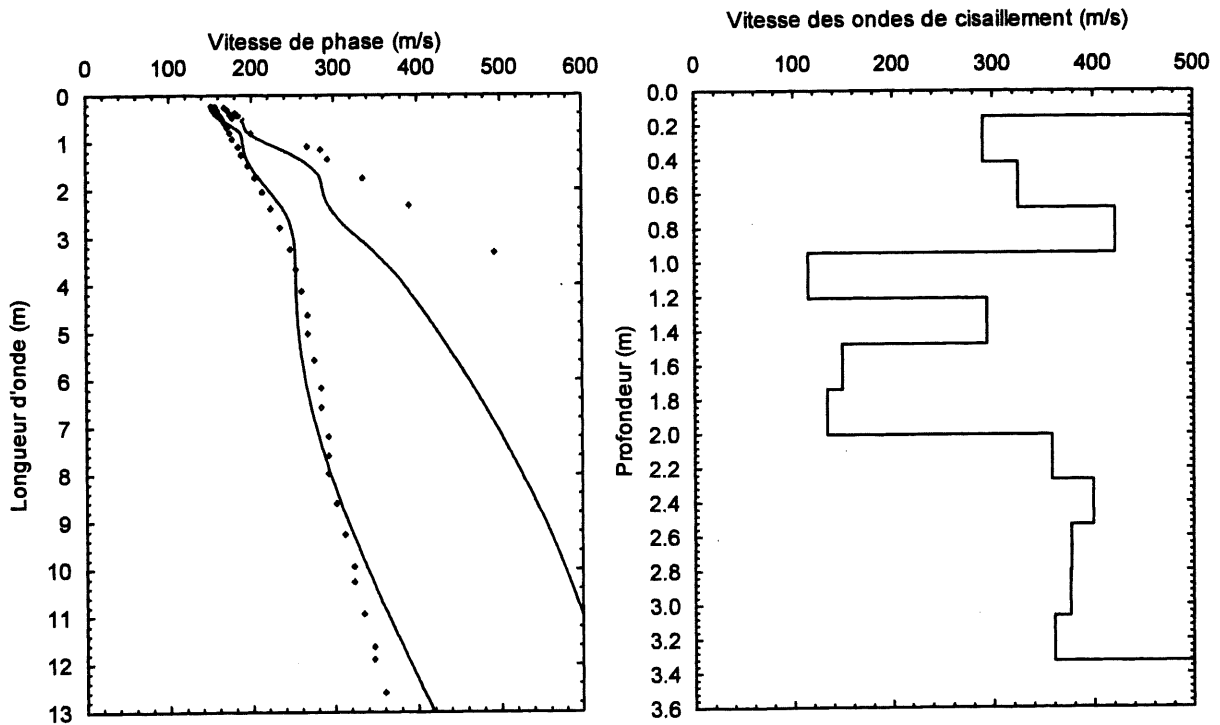


Figure A9.5 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 3 - profil N° 5.

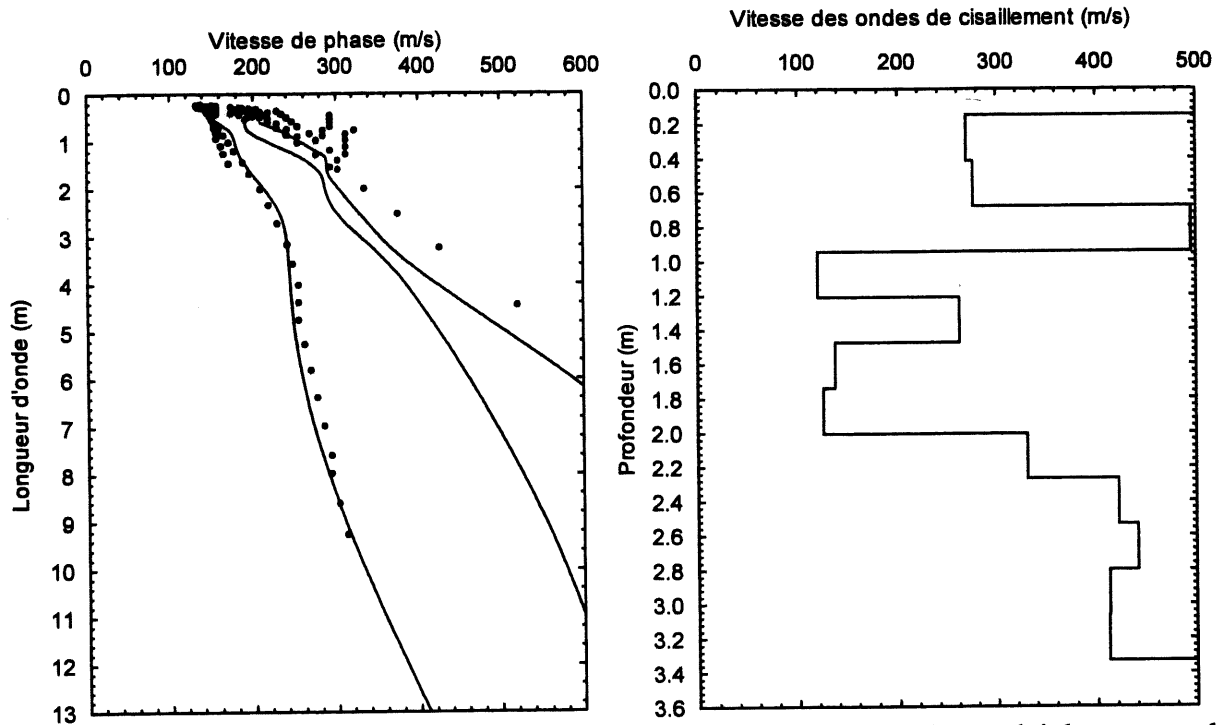


Figure A9.6 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 3 - profil N° 6.

COURBES DE DISPERSION ET PROFILS DE VITESSE DES ONDES DE CISAILLEMENT DES ESSAIS MASW SUR LA LIGNE 4 SITE DE SAINTE-AGATHE

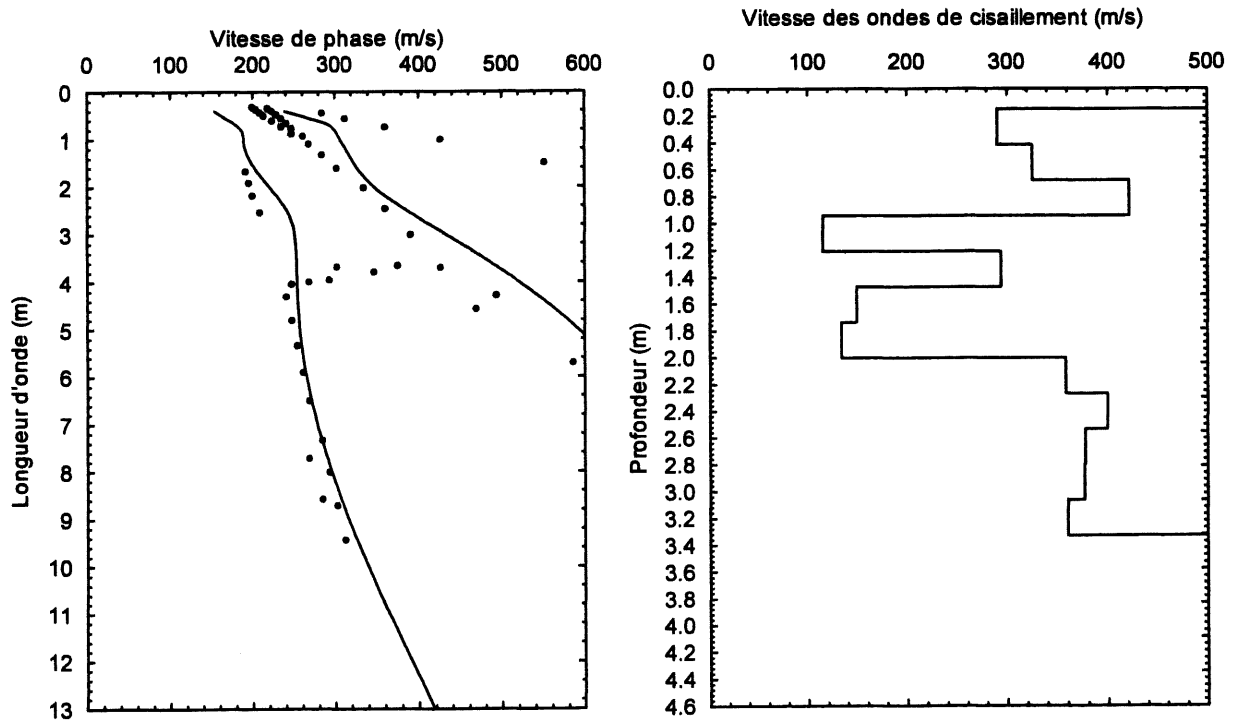


Figure A10.1 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 4 - profil N° 1.

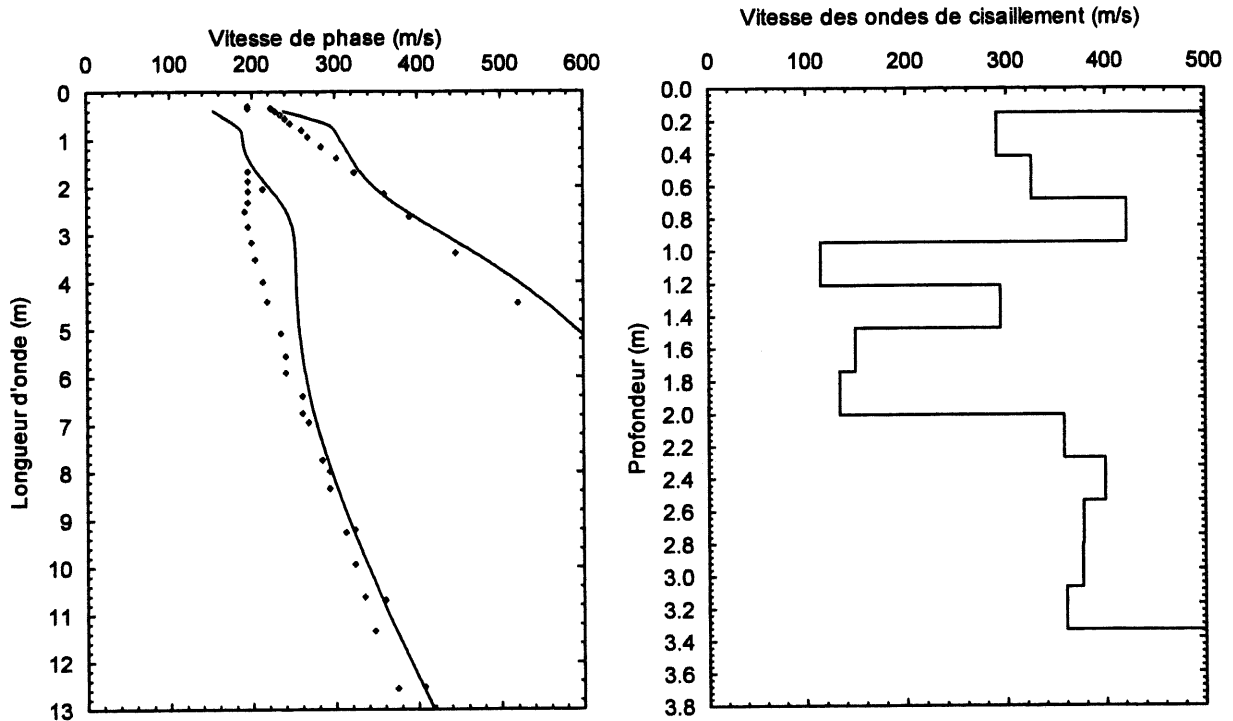


Figure A10.2 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 4 - profil N° 2.

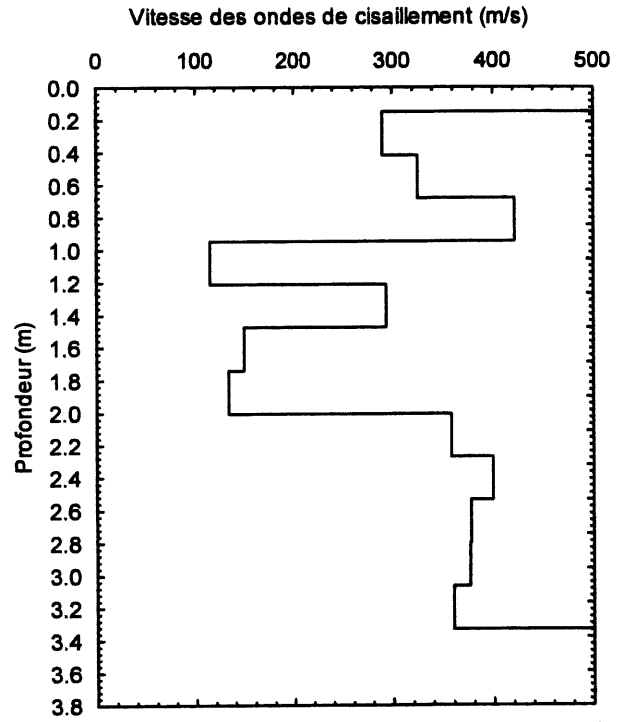
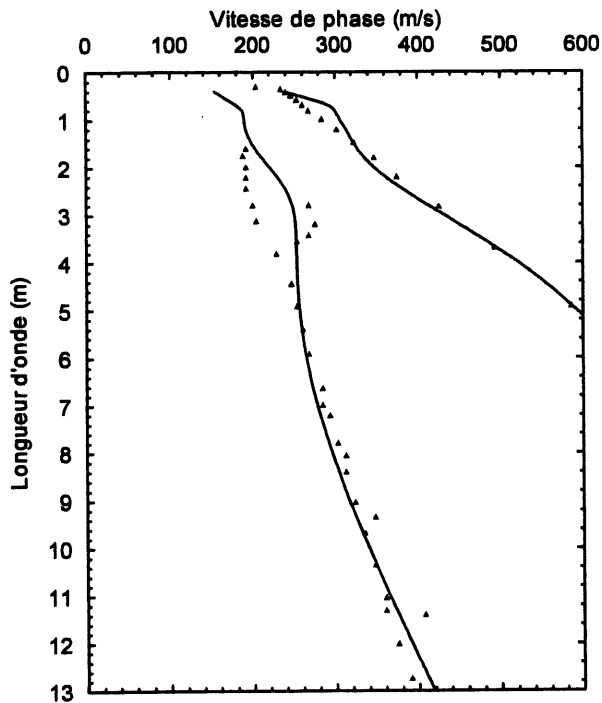


Figure A10.3 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 4 - profil N° 3.

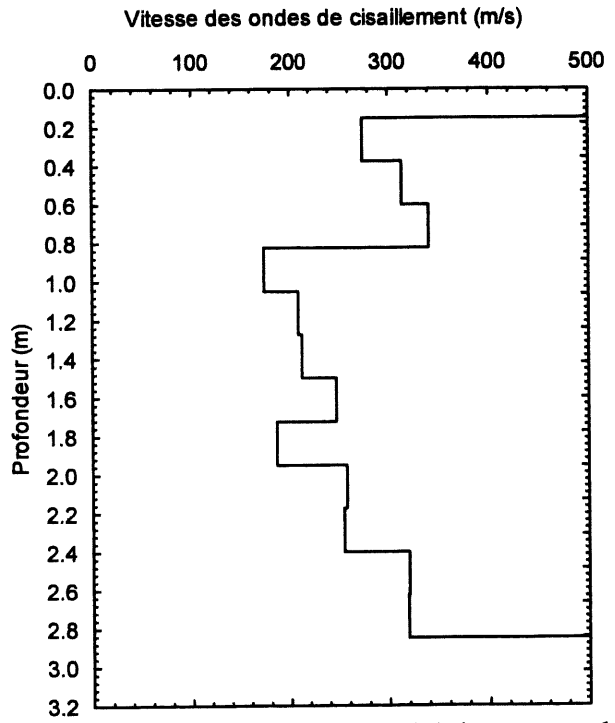
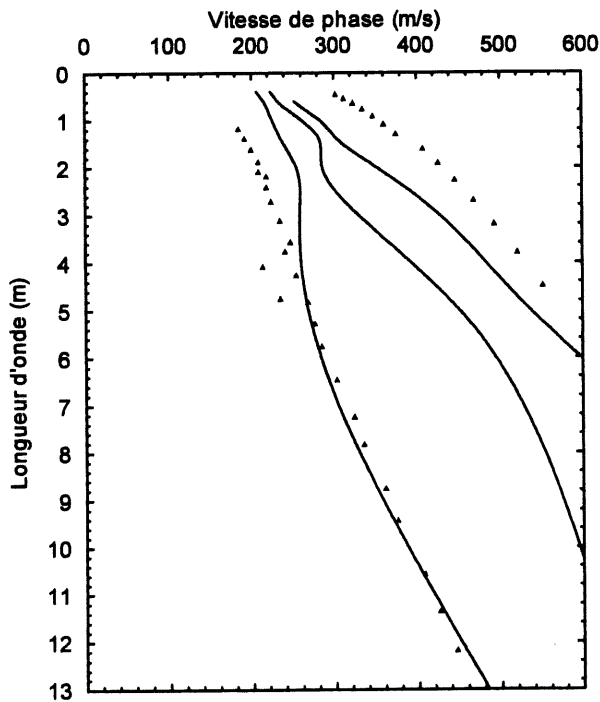


Figure A10.4 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 4 - profil N° 4.

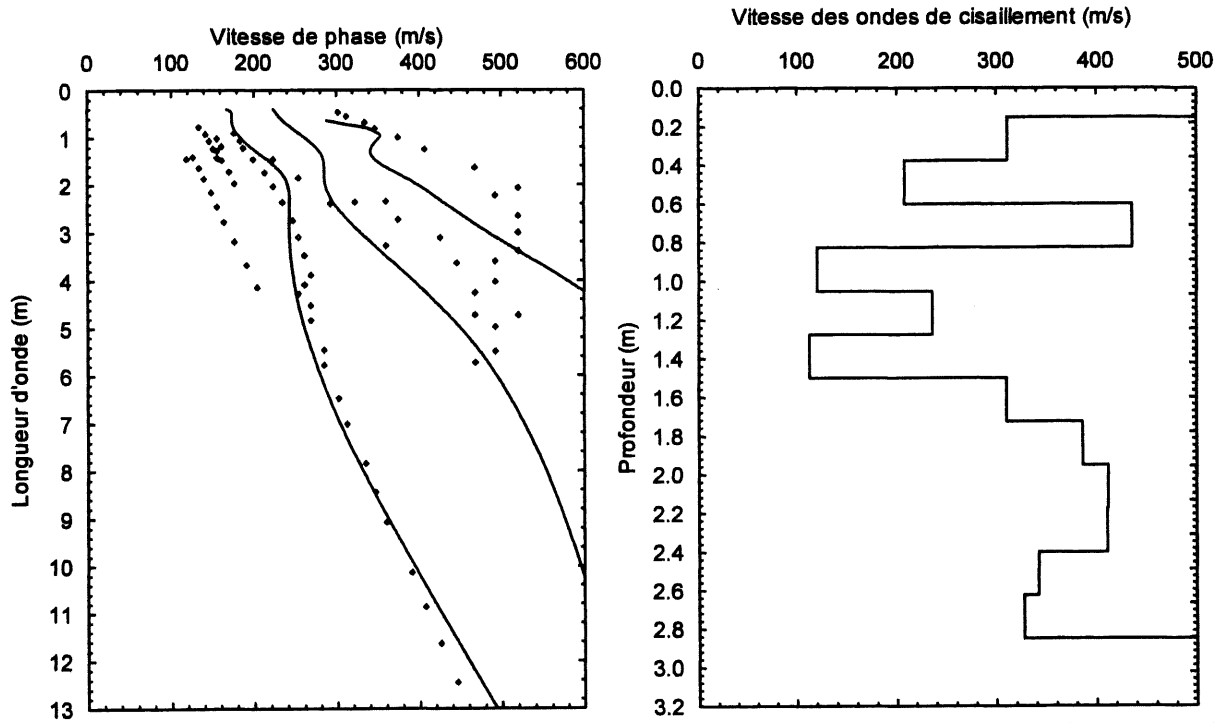


Figure A10.5 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 4 - profil N° 5.

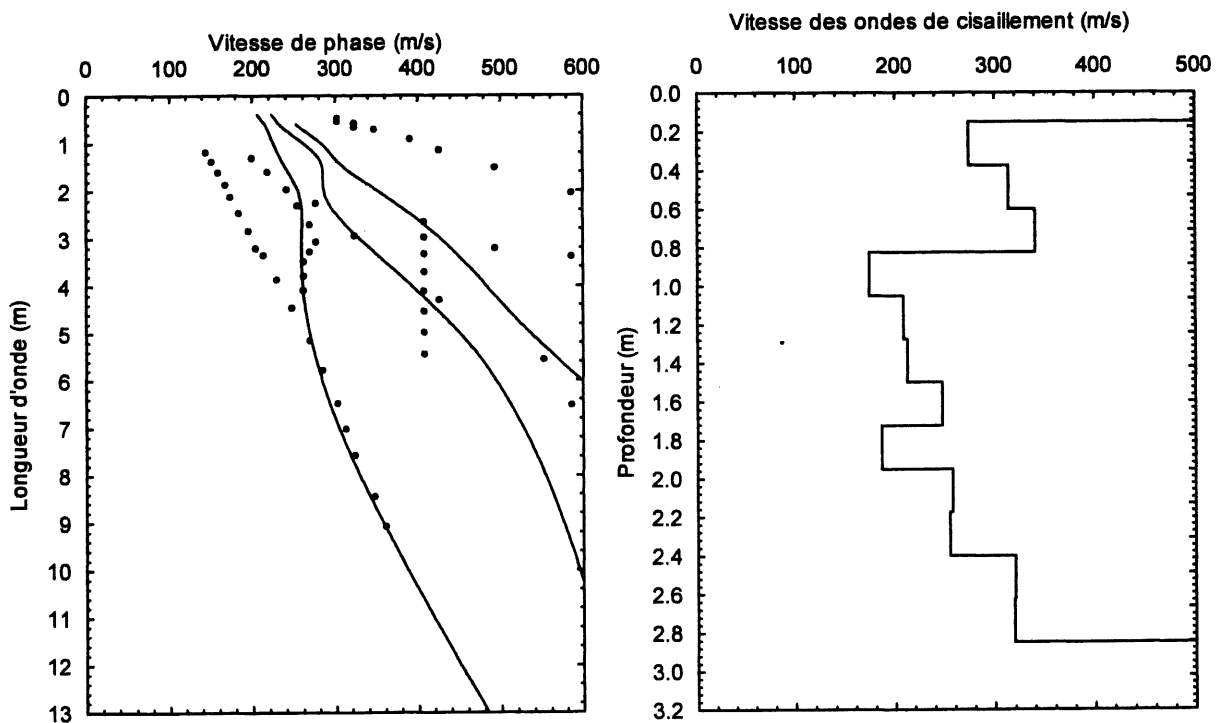


Figure A10.6 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 4 - profil N° 6.

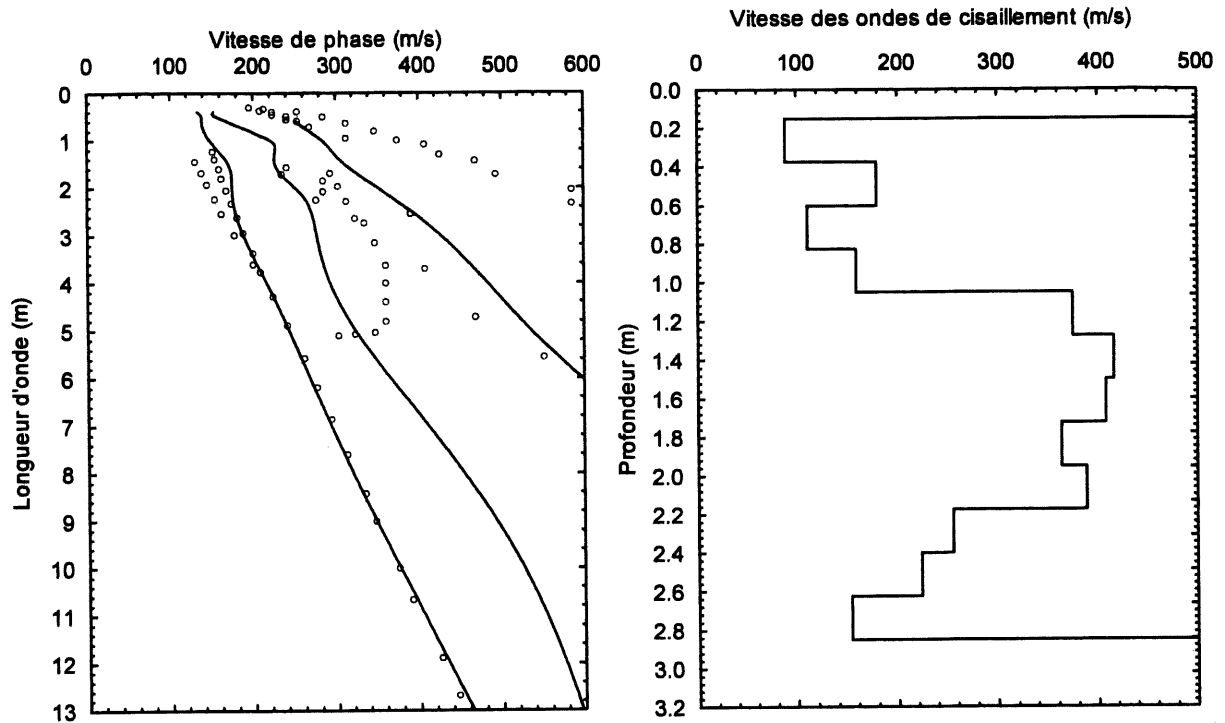


Figure A10.7 a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement autoroute 15 nord - ligne N° 4 - profil N° 7.

ANNEXE 11

**RÉSULTATS DES ESSAIS MASW
SITE DE SAINTE-AGATHE**

Tableau A-11-1 Profils de vitesse des ondes de cisaillement, du coefficient de Poisson et du module de cisaillement maximum déterminés à la ligne 1 du côté nord, sur l'autoroute 15 nord.

Profil 1				Profil 2				Profil 3				Profil 4			
Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)
0.15-0.38	146	0.29	45	0.15-0.36	163	0.29	56	0.15-0.36	221	0.29	102	0.15-0.40	322	0.29	217
0.38-0.66	146	0.33	38	0.36-0.62	163	0.33	66	0.36-0.62	194	0.33	68	0.40-0.66	162	0.33	47
0.66-0.94	177	0.33	57	0.62-0.88	191	0.33	58	0.62-0.88	190	0.33	65	0.66-0.91	254	0.33	116
0.94-1.22	177	0.33	57	0.88-1.14	191	0.33	67	0.88-1.14	215	0.33	83	0.91-1.17	178	0.33	57
1.22-1.50	160	0.33	46	1.14-1.40	180	0.33	161	1.14-1.4	330	0.33	196	1.17-1.42	257	0.33	119
1.50-1.78	160	0.33	46	1.40-1.66	180	0.33	164	1.4-1.66	294	0.33	156	1.42-1.68	360	0.33	233
1.78-2.06	203	0.33	74	1.66-1.92	193	0.33	172	1.66-1.92	302	0.33	164	1.68-1.93	365	0.33	239
2.06-2.34	203	0.33	74	1.92-2.18	193	0.33	163	1.92-2.18	259	0.33	120	1.93-2.19	364	0.33	238
2.34-2.62	323	0.33	188	2.18-2.44	299	0.33	168	2.18-2.44	324	0.33	189	2.19-2.44	357	0.33	230
2.62-2.9	323	0.33	188	2.44-2.70	299	0.33	156	2.44-2.7	335	0.33	202	2.44-2.70	341	0.33	209
2.9-3.18	298	0.33	160	2.70-2.96	302	0.33	164	2.7-2.96	365	0.33	240	2.70-2.95	315	0.33	178
3.18-3.46	298	0.29	160	2.96-3.22	302	0.29	161	2.96-3.22	364	0.29	279	2.95-3.21	310	0.29	201

Profil 5				Profil 6			
Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)
0.15-0.40	322	0.29	217	0.15-0.40	322	0.29	217
0.40-0.66	162	0.33	47	0.40-0.66	162	0.33	47
0.66-0.91	254	0.33	116	0.66-0.91	254	0.33	116
0.91-1.17	178	0.33	57	0.91-1.17	178	0.33	57
1.17-1.42	257	0.33	119	1.17-1.42	257	0.33	119
1.42-1.68	360	0.33	233	1.42-1.68	360	0.33	233
1.68-1.93	365	0.33	239	1.68-1.93	365	0.33	239
1.93-2.19	364	0.33	238	1.93-2.19	364	0.33	238
2.19-2.44	357	0.33	230	2.19-2.44	357	0.33	230
2.44-2.70	341	0.33	209	2.44-2.70	341	0.33	209
2.70-2.95	315	0.33	178	2.70-2.95	315	0.33	178
2.95-3.21	310	0.29	201	2.95-3.21	310	0.29	201

Tableau A-11-2 Profils de vitesse des ondes de cisaillement, du coefficient de Poisson et du module de cisaillement maximum déterminés à la ligne 2, sur l'autoroute 15 nord.

Profil 1				Profil 2				Profil 3				Profil 4			
Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)
0.15-0.40	119	0.29	29	0.15-0.37	114	0.29	27	0.15-0.40	240	0.29	121	0.15-0.38	288	0.29	174
0.40-0.66	196	0.33	69	0.37-0.59	216	0.33	84	0.40-0.66	212	0.33	81	0.38-0.61	336	0.33	203
0.66-0.91	134	0.33	32	0.59-0.81	125	0.33	28	0.66-0.91	276	0.33	138	0.61-0.84	334	0.33	200
0.91-1.17	142	0.33	36	0.81-1.03	174	0.33	54	0.91-1.17	142	0.33	36	0.84-1.07	239	0.33	103
1.17-1.42	192	0.33	67	1.03-1.25	326	0.33	191	1.17-1.42	227	0.33	93	1.07-1.30	389	0.33	273
1.42-1.68	294	0.33	155	1.25-1.47	366	0.33	241	1.42-1.68	261	0.33	122	1.30-1.53	164	0.33	49
1.68-1.93	351	0.33	222	1.47-1.69	435	0.33	340	1.68-1.93	309	0.33	172	1.53-1.76	367	0.33	242
1.93-2.19	337	0.33	204	1.69-1.91	374	0.33	252	1.93-2.19	296	0.33	158	1.76-1.99	182	0.33	60
2.19-2.44	265	0.33	127	1.91-2.13	367	0.33	242	2.19-2.44	335	0.33	202	1.99-2.22	217	0.33	84
2.44-2.70	256	0.33	118	2.13-2.35	192	0.33	86	2.44-2.70	311	0.33	174	2.22-2.45	198	0.33	71
2.70-2.95	265	0.33	126	2.35-2.57	249	0.33	112	2.70-2.95	344	0.33	213	2.45-2.68	257	0.33	119
2.95-3.21	223	0.29	105	2.57-2.79	163	0.29	56	2.95-3.21	230	0.29	111	2.68-2.91	356	0.29	266

Profil 5				Profil 6				Profil 7				Profil 8			
Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)
0.15-0.39	271	0.29	155	0.15-0.37	148	0.29	46	0.15-0.37	148	0.29	46	0.15-0.37	148	0.29	46
0.39-0.63	169	0.33	52	0.37-0.59	212	0.33	81	0.37-0.59	212	0.33	81	0.37-0.59	212	0.33	81
0.63-0.87	231	0.33	96	0.59-0.81	204	0.33	75	0.59-0.81	204	0.33	75	0.59-0.81	204	0.33	75
0.87-1.11	183	0.33	60	0.81-1.03	195	0.33	69	0.81-1.03	195	0.33	69	0.81-1.03	195	0.33	69
1.11-1.35	162	0.33	47	1.03-1.25	267	0.33	128	1.03-1.25	267	0.33	128	1.03-1.25	267	0.33	128
1.35-1.59	231	0.33	96	1.25-1.47	308	0.33	171	1.25-1.47	308	0.33	171	1.25-1.47	308	0.33	171
1.59-1.83	338	0.33	206	1.47-1.69	367	0.33	243	1.47-1.69	367	0.33	243	1.47-1.69	367	0.33	243
1.83-2.07	337	0.33	205	1.69-1.91	332	0.33	199	1.69-1.91	332	0.33	199	1.69-1.91	332	0.33	199
2.07-2.31	336	0.33	204	1.91-2.13	306	0.33	169	1.91-2.13	306	0.33	169	1.91-2.13	306	0.33	169
2.31-2.55	341	0.33	209	2.13-2.35	279	0.33	140	2.13-2.35	279	0.33	140	2.13-2.35	279	0.33	140
2.55-2.79	334	0.33	201	2.35-2.57	288	0.33	149	2.35-2.57	288	0.33	149	2.35-2.57	288	0.33	149
2.79-3.03	307	0.29	198	2.57-2.79	278	0.29	162	2.57-2.79	278	0.29	162	2.57-2.79	278	0.29	162

Profil 9				Profil 10				Profil 11				Profil 12			
Profond. (m)	V _s (m/s)	v	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	v	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	v	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	v	G _{max} (MPa)
0.15-0.37	148	0.29	46	0.15-0.40	212	0.29	94	0.15-0.40	212	0.29	94	0.15-0.40	212	0.29	94
0.37-0.59	212	0.33	81	0.40-0.66	214	0.33	82	0.40-0.66	214	0.33	82	0.40-0.66	214	0.33	82
0.59-0.81	204	0.33	75	0.66-0.91	216	0.33	84	0.66-0.91	216	0.33	84	0.66-0.91	216	0.33	84
0.81-1.03	195	0.33	69	0.91-1.17	200	0.33	72	0.91-1.17	200	0.33	72	0.91-1.17	200	0.33	72
1.03-1.25	267	0.33	128	1.17-1.42	195	0.33	69	1.17-1.42	195	0.33	69	1.17-1.42	195	0.33	69
1.25-1.47	308	0.33	171	1.42-1.68	216	0.33	84	1.42-1.68	216	0.33	84	1.42-1.68	216	0.33	84
1.47-1.69	367	0.33	243	1.68-1.93	277	0.33	138	1.68-1.93	277	0.33	138	1.68-1.93	277	0.33	138
1.69-1.91	332	0.33	199	1.93-2.19	279	0.33	140	1.93-2.19	279	0.33	140	1.93-2.19	279	0.33	140
1.91-2.13	306	0.33	169	2.19-2.44	280	0.33	141	2.19-2.44	280	0.33	141	2.19-2.44	280	0.33	141
2.13-2.35	279	0.33	140	2.44-2.70	282	0.33	143	2.44-2.70	282	0.33	143	2.44-2.70	282	0.33	143
2.35-2.57	288	0.33	149	2.70-2.95	280	0.33	141	2.70-2.95	280	0.33	141	2.70-2.95	280	0.33	141
2.57-2.79	278	0.29	162	2.95-3.21	277	0.29	161	2.95-3.21	277	0.29	161	2.95-3.21	277	0.29	161

Profil 13				Profil 14				Profil 15				Profil 16			
Profond. (m)	V _s (m/s)	v	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	v	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	v	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	v	G _{max} (MPa)
0.15-0.40	212	0.29	94	0.15-0.40	212	0.29	94	0.15-0.40	212	0.29	94	0.15-0.40	212	0.29	94
0.40-0.66	214	0.33	82	0.40-0.66	214	0.33	82	0.40-0.66	214	0.33	82	0.40-0.66	214	0.33	82
0.66-0.91	216	0.33	84	0.66-0.91	216	0.33	84	0.66-0.91	216	0.33	84	0.66-0.91	216	0.33	84
0.91-1.17	200	0.33	72	0.91-1.17	200	0.33	72	0.91-1.17	200	0.33	72	0.91-1.17	200	0.33	72
1.17-1.42	195	0.33	69	1.17-1.42	195	0.33	69	1.17-1.42	195	0.33	69	1.17-1.42	195	0.33	69
1.42-1.68	216	0.33	84	1.42-1.68	216	0.33	84	1.42-1.68	216	0.33	84	1.42-1.68	216	0.33	84
1.68-1.93	277	0.33	138	1.68-1.93	277	0.33	138	1.68-1.93	277	0.33	138	1.68-1.93	277	0.33	138
1.93-2.19	279	0.33	140	1.93-2.19	279	0.33	140	1.93-2.19	279	0.33	140	1.93-2.19	279	0.33	140
2.19-2.44	280	0.33	141	2.19-2.44	280	0.33	141	2.19-2.44	280	0.33	141	2.19-2.44	280	0.33	141
2.44-2.70	282	0.33	143	2.44-2.70	282	0.33	143	2.44-2.70	282	0.33	143	2.44-2.70	282	0.33	143
2.70-2.95	280	0.33	141	2.70-2.95	280	0.33	141	2.70-2.95	280	0.33	141	2.70-2.95	280	0.33	141
2.95-3.21	277	0.29	161	2.95-3.21	277	0.29	161	2.95-3.21	277	0.29	161	2.95-3.21	277	0.29	161

Tableau A-11-3 Profils de vitesse des ondes de cisaillement, du coefficient de Poisson et du module de cisaillement maximum déterminés à la ligne 3, sur l'autoroute 15 nord.

Profil 1				Profil 2				Profil 3				Profil 4			
Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)
0.15-0.41	212	0.29	94	0.15-0.41	269	0.29	152	0.15-0.41	290	0.29	177	0.15-0.41	290	0.29	177
0.41-0.67	214	0.33	82	0.41-0.68	276	0.33	137	0.41-0.68	325	0.33	191	0.41-0.68	325	0.33	191
0.67-0.93	216	0.33	84	0.68-0.94	495	0.33	442	0.68-0.94	422	0.33	320	0.68-0.94	422	0.33	320
0.93-1.19	200	0.33	72	0.94-1.21	120	0.33	26	0.94-1.21	115	0.33	24	0.94-1.21	115	0.33	24
1.19-1.45	195	0.33	69	1.21-1.47	262	0.33	123	1.21-1.47	294	0.33	155	1.21-1.47	294	0.33	155
1.45-1.71	216	0.33	84	1.47-1.74	137	0.33	34	1.47-1.74	149	0.33	40	1.47-1.74	149	0.33	40
1.71-1.97	277	0.33	138	1.74-2.00	125	0.33	28	1.74-2.00	134	0.33	32	1.74-2.00	134	0.33	32
1.97-2.23	279	0.33	140	2.00-2.27	331	0.33	197	2.00-2.27	358	0.33	231	2.00-2.27	358	0.33	231
2.23-2.49	280	0.33	141	2.27-2.53	422	0.33	320	2.27-2.53	399	0.33	287	2.27-2.53	399	0.33	287
2.49-2.75	282	0.33	143	2.53-2.80	441	0.33	350	2.53-2.80	377	0.33	256	2.53-2.80	377	0.33	256
2.75-3.01	280	0.33	141	2.80-3.06	412	0.33	306	2.80-3.06	376	0.33	255	2.80-3.06	376	0.33	255
3.01-3.27	277	0.29	161	3.06-3.33	411	0.29	356	3.06-3.33	360	0.29	273	3.06-3.33	360	0.29	273

Profil 5				Profil 6			
Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)
0.15-0.4	278	0.29	162	0.15-0.39	291	0.29	177
0.4-0.65	318	0.33	182	0.39-0.63	286	0.33	148
0.65-0.9	402	0.33	291	0.63-0.87	486	0.33	424
0.9-1.15	162	0.33	47	0.87-1.11	151	0.33	41
1.15-1.4	259	0.33	121	1.11-1.35	323	0.33	188
1.4-1.65	212	0.33	81	1.35-1.59	203	0.33	74
1.65-1.9	173	0.33	54	1.59-1.83	174	0.33	55
1.9-2.15	366	0.33	242	1.83-2.07	286	0.33	148
2.15-2.4	380	0.33	260	2.07-2.31	479	0.33	413
2.4-2.65	324	0.33	189	2.31-2.55	468	0.33	394
2.65-2.9	368	0.33	244	2.55-2.79	475	0.33	406
2.9-3.15	299	0.29	188	2.79-3.03	427	0.29	382
0.15-0.4	278	0.29	162	0.15-0.39	291	0.29	177

Tableau A-11-4 Profils de vitesse des ondes de cisaillement, du coefficient de Poisson et du module de cisaillement maximum déterminés à la ligne 4, sur l'autoroute 15 nord.

Profil 1				Profil 2				Profil 3				Profil 4			
Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)
0.15-0.41	290	0.29	177	0.15-0.41	290	0.29	177	0.15-0.41	290	0.29	177	0.15-0.38	284	0.29	170
0.41-0.68	325	0.33	191	0.41-0.68	325	0.33	191	0.41-0.68	325	0.33	191	0.38-0.61	338	0.33	205
0.68-0.94	422	0.33	320	0.68-0.94	422	0.33	320	0.68-0.94	422	0.33	320	0.61-0.84	361	0.33	235
0.94-1.21	115	0.33	24	0.94-1.21	115	0.33	24	0.94-1.21	115	0.33	24	0.84-1.07	217	0.33	85
1.21-1.47	294	0.33	155	1.21-1.47	294	0.33	155	1.21-1.47	294	0.33	155	1.07-1.30	440	0.33	349
1.47-1.74	149	0.33	40	1.47-1.74	149	0.33	40	1.47-1.74	149	0.33	40	1.30-1.53	154	0.33	43
1.74-2.00	134	0.33	32	1.74-2.00	134	0.33	32	1.74-2.00	134	0.33	32	1.53-1.76	368	0.33	244
2.00-2.27	358	0.33	231	2.00-2.27	358	0.33	231	2.00-2.27	358	0.33	231	1.76-1.99	172	0.33	53
2.27-2.53	399	0.33	287	2.27-2.53	399	0.33	287	2.27-2.53	399	0.33	287	1.99-2.22	215	0.33	83
2.53-2.80	377	0.33	256	2.53-2.80	377	0.33	256	2.53-2.80	377	0.33	256	2.22-2.45	189	0.33	64
2.80-3.06	376	0.33	255	2.80-3.06	376	0.33	255	2.80-3.06	376	0.33	255	2.45-2.68	280	0.33	141
3.06-3.33	360	0.29	273	3.06-3.33	360	0.29	273	3.06-3.33	360	0.29	273	2.68-2.91	407	0.29	347

Profil 5				Profil 6				Profil 7			
Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)	Profond. (m)	V _s (m/s)	ν	G _{max} (MPa)
0.15-0.37	311	0.29	204	0.15-0.37	274	0.29	158	0.15-0.41	212	0.29	94
0.37-0.60	208	0.33	78	0.37-0.60	314	0.33	177	0.41-0.67	214	0.33	82
0.60-0.82	436	0.33	342	0.60-0.82	341	0.33	209	0.67-0.93	216	0.33	84
0.82-1.05	121	0.33	26	0.82-1.05	173	0.33	54	0.93-1.19	200	0.33	72
1.05-1.27	236	0.33	100	1.05-1.27	209	0.33	78	1.19-1.45	195	0.33	69
1.27-1.50	113	0.33	23	1.27-1.50	213	0.33	81	1.45-1.71	216	0.33	84
1.50-1.72	311	0.33	174	1.50-1.72	248	0.33	110	1.71-1.97	277	0.33	138
1.72-1.95	386	0.33	268	1.72-1.95	186	0.33	62	1.97-2.23	279	0.33	140
1.95-2.17	412	0.33	305	1.95-2.17	258	0.33	120	2.23-2.49	280	0.33	141
2.17-2.40	411	0.33	304	2.17-2.40	255	0.33	117	2.49-2.75	282	0.33	143
2.40-2.62	342	0.33	211	2.40-2.62	320	0.33	184	2.75-3.01	280	0.33	141
2.62-2.85	328	0.29	225	2.62-2.85	319	0.29	214	3.01-3.27	277	0.29	161