UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

QUALIFICATION DES MASSES DE BÉTON PAR MÉTHODES SISMIQUES

FRANCE GOUPIL
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MINÉRAL)

DÉCEMBRE 1999

© France Goupil, 1999.

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Acquisitions and Bibliographic Services
Acquisitions et services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-53577-0

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

QUALIFICATION DES MASSES DE BÉTON
PAR MÉTHODES SISMIQUES

présenté par : GOUPIL France
en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. MARCOTTE Denis, Ph.D., président
M. CHOUTEAU Michel., Ph.D., directeur de recherche
M. TANGUAY Marc G., Ph.D., codirecteur de recherche
M. BELLEFLEUR Gilles, Ph.D., membre

"Je sens qu'il y a dans l'inépuisable carrière des sciences, un grand nombre de questions d'utilité publique."

Augustin Fresnel, 1925

REMERCIEMENTS

Je tiens premièrement à remercier mes deux directeurs de mémoire, les docteurs Michel Chouteau et Marc Tanguay ainsi que les membres du jury pour l'aide qu'ils m'ont apportée pour réaliser ce projet.

M. Michel Chouteau pour son support toujours enthousiaste et pour son expérience qu'il a démontrée par son approche avisée du sujet. L'orientation et la planification de ce projet risquaient d'être trop dissipées sans ses précieuses interventions.

Et, M. Marc Tanguay qui a initié ce projet complexe, nécessitant l'appui de l'École Polytechnique, l'Université de Sherbrooke et Géophysique GPR International Inc. comme partenaire industriel. Je lui suis particulièrement reconnaissant de m'avoir appuyé et fait confiance pour entreprendre ce programme d'étude.

Aussi, je ne saurais oublier certains collaborateurs entre autres : Jamal Rhazi, et Jean-Luc Arsenault pour m'avoir assisté à certains stages de ce projet. Et, Marc-André Carrier qui a participé à cette étude lors d'un stage chez Géophysique GPR. J'en profite pour souligner l'excellent esprit de collaboration du milieu et le plaisir que j'ai eu durant ce projet à discuter avec les confrères sur certains aspects des applications de la microsismique.

Finalement, j'aimerais remercier, les gens de l'École Polytechnique de l'Université de Sherbrooke, du CERIU de la Ville de Montréal, et du Ministère des Transports du Québec pour leur apport dans la réalisation de ce projet.

RÉSUMÉ

Les structures en béton souffrent de divers problèmes de détérioration le plus souvent liés, au Québec, aux cycles de gel-dégel et à la corrosion des armatures, et qui se présentent sous la forme de vides, de fissures ou de désagrégation. Avec l'importance que prend désormais la réhabilitation des structures existantes, les propriétaires d'ouvrages en béton font face à un problème de gestion et d'entretien. En effet, les programmes d'entretien sont souvent non appropriés à cause du manque d'informations sur l'état des structures, les méthodes de caractérisation se résumant dans bien des cas à une investigation qualitative.

C'est dans ce contexte que la méthode d'auscultation microsismique proposée apporte une solution pratique pour la détection des défauts du béton. Elle apporte de nombreux avantages en comparaison aux méthodes qui existent déjà. Tout d'abord, il s'agit d'une méthode quantitative qui permet d'évaluer les modules dynamiques et la résistance à la compression du matériau et qui n'est pas limitée à l'observation en surface, comme par exemple l'inspection visuelle. Aussi, contrairement au prélèvement de carottes, la méthode sismique est non-destructive et donne des résultats en continu. De plus, elle est peu influencée par des facteurs tels que la composition du béton et le degré de compacité, les conditions de surface (humidité, texture, carbonatation) ainsi que la position du test, comme le sont plusieurs méthodes conventionnelles telles le test de dureté au marteau Schmidt, le «drag test», et le test de fréquence de résonnance. En ce qui concerne les méthodes géophysiques actuelles, des techniques telles que le pulse-écho, l'impact-écho ou la réponse impulsionnelle (impédance acoustique) ne sont munies que d'un seul canal et exigent en conséquence un nombre considérable de mesures ce qui rend l'acquisition de données laborieuse. Il y a enfin le géoradar et l'infrarouge qui apportent des informations supplémentaires sur la position des anomalies sans toutefois pouvoir les quantifier; ces méthodes pourraient en somme constituer des méthodes complémentaires à l'auscultation microsismique. En fait, les ondes mécaniques sont plus sensibles aux discontinuités, sont

moins affectées par les conditions environnementales et ont un rayon de propagation plus grand. C'est ce qui laisse présager la suprématie des méthodes acoustiques dans le domaine du contrôle non-destructif des infrastructures de béton et autres matériaux.

Ce mémoire démontre que la méthode microsismique a un fort potentiel d'application en génie civil pour quantifier les structures de béton, mais que son utilisation est sensible et complexe à cause des multiples interactions des ondes sismiques avec les milieux hétérogènes propres aux infrastructures. L'auscultation microsismique peut devenir une forme d'assurance pour la sécurité des ouvrages. Déjà, on commence à l'utiliser au Nouveau-Mexique pour comparer l'évolution de l'état d'une structure et prévoir son comportement dans le temps. Ces suivis permettront d'établir à l'avance les périodes critiques d'intervention pour minimiser l'usure des ouvrages par un entretien normal.

C'est pourquoi nous recommandons sans hésitation d'utiliser cette technologie pour l'évaluation de l'état du béton des infrastructures et pour contrôler la qualité des réparations. De plus, nous suggérons de prendre des lectures sismiques dès la mise en place du béton à titre de contrôle de la qualité et d'utiliser ces vitesses sismiques comme référence pour établir sa qualité dans le futur.

Finalement nous suggérons d'établir des standards de mesures et d'interprétation en microsismiques appliquées aux infrastructures.

ABSTRACT

Concrete structures suffer from many deterioration problems often related, in Quebec, to freeze-thaw cycles and reinforcement corrosion, present in the form of voids, fracturing or desegregation. With the growing importance of rehabilitating existing structures, owners of concrete works face a management and maintenance problem. Indeed, maintenance programs are often inappropriate due to the lack of information on the condition of the structures, most characterization methods being limited to qualitative investigation.

In this context, the microseismic investigation method is a practical solution for the detection of defects. It brings numerous advantages when compared to existing methods. Firstly, it is a quantitative method which allows to evaluate the dynamic moduli and the resistance to compression of materials and it is not limited to surface observation, as is for example visual inspection. Also, contrary to coring, the seismic method is non-destructive and provides continuous results. Moreover, it is little influenced by such factors as concrete composition, compacity, surface conditions (humidity, texture, carbonation) as well as the position of the test as are many conventional methods like the Schmidt hammer hardness test, the drag test and the resonance frequency test. As for existing geophysical methods, techniques such as the pulse-echo, impact-echo or impulse response (acoustic impedance) only have one channel and consequently require a considerable number of measurements making the acquisition arduous. Finally there are the georadar and the infrared which bring additional information on the position of anomalies which they cannot quantify; these methods could in short constitute complementary methods to microseismic investigation. In fact, mechanical waves are more sensitive to discontinuities, less affected by environmental conditions and have a greater area of propagation. It is what augurs the supremacy of acoustic methods in the field of non-destructive control of concrete and other materials infrastructures.

This master thesis demonstrate the microseismic method has a strong potential in civil engineering applications to quantify concrete structures, but that its use is sensitive and complex due to the multiple interactions of the seismic waves with the heterogeneous environment of infrastructures. Microseismic investigation can become a form of insurance for the safety of works. Already, it is starting to be used in New-Mexico to measure the evolution of the condition of a structure and predict its behaviour with time. The follow-up will allow to establish in advance the critical periods to intervene to minimize the wear of the works with a normal maintenance.

It is why we are recommending without hesitation to use this technology for the evaluation of concrete structures and to control their repairs. Furthermore, we suggest to record, at early stage, the seismic velocity of fresh concrete as quality control procedure and to use this seismic value as references for furture quality assessments.

We also suggest to establish standards for acquisition as well as interpretation procedure for microseismic survey applied to infrastructures.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS v
RÉSUMÉ vi
ABSTRACT viii
TABLE DES MATIÈRES x
LISTE DES FIGURES xiii
LISTE DES TABLEAUX xv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS xvi
LISTE DES ANNEXES ixx

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 : LE POURQUOI DES MÉTHODES NON-DESTRUCTIVES

1.1 Utilisation du béton dans le domaine de l'ingénierie 4
1.1.1 Utilisation du béton -vs- types d'ouvrages 4
1.1.2 Type et importance des détériorations du béton 4

1.2 Gestion et entretien des ouvrages en béton 6
1.2.1 Problèmes soulevés par l'entretien des ouvrages 7
1.2.2 Méthodes d'investigation conventionnelles 7
1.2.3 Méthodes géophysiques usuelles 9
1.2.4 Méthodes microsismiques proposées 13
1.2.5 Règlementation concernant l'investigation des ouvrages 15

CHAPITRE 2 : THÉORIE SUR LA PROPAGATION DES ONDES DANS UN MATÉRIAU SOLIDE

2.1 Mode de propagation des ondes sismiques dans un matériau solide 17

2.1.1 Types d'ondes sismiques 17
2.1.2 Paramètres des ondes 22

2.2 Vitesse sismique -vs- propriétés élastiques des matériaux 25

2.3 Atténuation des ondes sismiques dans un matériau solide 27
2.3.1 Atténuation par absorption 27
2.3.2 Atténuation par diffusion 28

CHAPITRE 3 : PARAMÈTRES D'ACQUISITION MICROSISMIQUE

3.1 Modèles numériques sur la propagation des ondes dans un matériau solide 31
3.1.1 Modèle sur la microsismique réfraction 32
3.1.2 Modèle sur la tomographie sismique 32

3.2 Choix des équipements -vs- paramètres d'acquisition 37

CHAPITRE 4 : ESSAIS DE RÉFRACTION ET DE TOMOGRAPHIE MICROSISMIQUES EN LABORATOIRE

4.1 Essais sur des blocs de béton 39
4.1.1 But des essais 39
4.1.2 Description des échantillons et de la procédure suivie 39
4.1.3 Essais en mode réfraction 40
4.1.4 Essais en mode transmission directe 45
4.1.5 Conclusions 50

4.2 Essais sur une dalle de béton 51
4.2.1 But des essais 51

4.2.2 Description des échantillons et de la procédure suivie 51
4.2.3 Essais microsismiques directement sur le béton 53
4.2.3.1 Précision 53
4.2.3.2 Fiabilité 54
4.2.4 Essais microsismiques sur couches minces 57

CHAPITRE 5: APPLICATIONS DE LA MÉTHODE MICROSISMIQUE

5.1 Méthodes de mesures 63
5.1.1 Microsismique réfraction 63
5.1.1.1 Principe de base 63
5.1.1.2 Application aux cas de 1 et 2 couches 65
5.1.2 Tomographie microsismique 69

5.2 Autres particularités de la méthode microsismique 73
5.2.1 Effets des armatures 73
5.2.2 Source microsismique 74
5.2.3 Effet de la couche d'asphalte et de la détérioration de la surface 75
5.2.4 Phénomène de dispersion et fréquenciel 76
5.2.5 Nature des ondes aux interfaces 77
5.2.6 Influence de la fracturation 78
5.2.7 Conditions climatiques 80
5.2.8 Résultats microsismiques, viaduc Dickson 80

CONCLUSION 81

BIBLIOGRAPHIE 84

ANNEXES 90

LISTE DES FIGURES

2.1 Représentation schématique d'une onde de compression 18

2.2 Représentation schématique d'une onde de cisaillement 19

2.3 Représentation schématique d'une onde de Rayleigh 20

2.4 Représentation schématique d'une onde de Love 20

2.5 Schéma d'une onde de Lamb 21

2.6 Courbes isochrones d'une onde sismique rencontrant un obstacle 24

3.1 Schéma coupe à travers un bloc de béton dont la largeur x longueur y 35

4.1 Schéma de l'installation pour les mesures sur le bloc multi-couches 41

4.2 Dromochronique 43

4.3 Schéma du dispositif sur la diagonale en surface 44

4.4 Schéma du dispositif sur l'arête du roc 45

4.5 Schéma du dispositif pour le test en diagonale du bloc - 1,61m de séparation 47

4.6 Schéma d'installation pour les mesures en transparence (au milieu du bloc) 48

4.7 Modèle des vitesses sismiques V_p dans le bloc de mauvais béton 49

4.8 Système d'acquisition Microsis MD-3 52

4.9 Distribution fréquentiel de la vitesse de propagation des ondes "P" 54

4.10 Essais avec le système d'acquisition Microsis MD-3 et un sismographe Mark 6 55

4.11 Dispositif de mesure et dromochronique associé aux résultats 57

4.12 a) Enregistrement avec source d'impact au centre et gain saturé 59

4.12 b) Enregistrement avec source d'impact à une extrémité et gain saturé 60

4.12 c) Enregistrement avec source d'impact éloignée de 2,5 mètres et gain non-saturé 61

4.13 Détection des ondes voyageant dans le béton par des capteurs posés sur une barre d'aluminium 62

5.1 Exemple type d'un enregistrement mesurant la vitesse sismique des premières arrivées dans le béton 65
5.2 Erreur en fonction du pas d'échantillonnage 66
5.3 Dromochronique d'un matériau à deux couches 67
5.4 Différents modes d'acquisition de données 71
5.5 Anomalie au centre de la tranche investiguée 72
5.6 Vitesse de propagation "P" en fonction de la densité de fissuration 79

LISTE DES TABLEAUX

2.1 Comparaison de modules d'élasticité statiques et dynamiques 26
2.2 Classification de la qualité du béton en fonction de l'onde "P" 27

4.1 Temps d'arrivée -vs- distances des accéléromètres 41
4.2 Résultats des essais sur la diagonale en surface 44
4.3 Résultats des essais sur l'arête du roc 46
4.4 Résultats des essais sur la diagonale du bloc - 1,61m de séparation 47
4.5 Résultats des mesures en transparence (au milieu du bloc) 48
4.6 Statistiques sur les essais effectués sur une dalle de béton avec le MD-3 55
4.7 Statistiques des essais avec le MD-3 et le Mark 6 56

LISTE DES SIGLES, ABRÉVIATIONS et SYMBOLES

a	coefficient de diffusion
a_1	coefficient d'absorption
A	amplitude de l'onde
Ao	amplitude initiale de l'onde
b	coefficient de diffusion
c	vitesse de la lumière dans le vide
CERIU	Centre d'Expertise et de Recherche en infrastructures Urbaines
cm	centimètre
D	diamètre des granulats
E	module d'Young
Ed	module d'Young dynamique
Es	module d'Young statique
EM	électro-magnétique
ER	énergie réfléchie
ET	énergie transmise
f	fréquence
f_r	fréquence de résonnance
G	module de rigidité
GPa	gigapascals
GPR	Géophysique GPR International Inc.
H	épaisseur d'une couche
Hz	hertz
IE	"Impact-Echo"
IR	"Impulse Response"
kHz	kilohertz
km	kilomètre
L	ondes de Love
m	mètre

mm	millimètre
m/s	mètre/seconde
m^3	mètre cube
Mpa	mégaPascal
MHz	megahertz
MARK 6	équipement sismique à 24 canaux ABEM (marque déposée)
Ncell	nombre de cellule
Nrai	nombre de rayon
NIST	National Institute of Standards & Technology
NMSHTD	New Mexico State Highway and Transportation Department
P	onde de compression
PE	"Pulse-Echo"
R	coefficient de réflexion
R	ondes de Rayleigh
Rc	résistance à la compression
RMR	Région Métropolitaine de Recensement de Montréal
RMS	"root-mean-square"
RN	nombre de rebonds "Rebound's Number"
R.Q.D.	"Rock Quality Designation"
S	onde de cisaillement
SASW	analyse spectrale d'ondes de surface "Spectral Analysis of Surface Wave"
SE	"Sonic Echo"
SIRT	Simultaneous Iterative Reconstruction Technique
T	période
Tp	temps d'arrivée de l'onde P
Ts	temps d'arrivée de l'onde S
vs	versus
V, v	vitesse de propagation
Vp	vitesse de propagation de l'onde de compression
V_R	vitesse vrai

x	écart latéral	
Xc	distance critique	
Z	impédance acoustique	
α	alpha	coefficient d'atténuation
Δ	delta	
ϵ_r	epsilon	permittivité relative
λ	lambda	longueur d'onde
μs	mu	temps en micro/seconde
ν	nu	coefficient de Poisson
νd	nu	coefficient de Poisson dynamique
νs	nu	coefficient de Poisson statique
ρ	rho	densité
~	quasi équivalent	

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A Système d'acquisition, de contrôle et de traitement Microsis® - MD-3 90

ANNEXE B Résultats microsismiques, viaduc Dickson 132

INTRODUCTION

L'époque de l'évaluation et de la réparation des infrastructures est à un état similaire dans toute l'Amérique du Nord. Le but de ce projet est d'apporter des solutions nouvelles et plus fiables au niveau des méthodes non destructives d'investigation pour la qualification des masses et des dalles de béton, composante importante des infrastructures. Notre approche a été de rencontrer les gens du ministère des Transports du Québec, de l'Université de Sherbrooke, du CERIU de la Ville de Montréal, pour recenser les principaux problèmes rencontrés par les méthodes dites non destructives. Suite à ces rencontres, nous avons évalué les techniques non destructives existantes les plus utilisées pour évaluer l'état des structures.

Ces méthodes varient de l'auscultation par résonance mesurée à l'oreille, aux mesures par ultrasons, aux populaires "Pulse-Echo", et "Impact Écho" jusqu'à l'analyse plus complexe des ondes de surface (SASW).

Des études que nous avons faites, les techniques les plus prometteuses pour qualifier les masses de béton semblent être les méthodes acoustiques. Bien que le géoradar, méthode électromagnétique, soit employé pour localiser les anomalies de continuité, il s'avère un outil moins efficace lorsqu'il s'agit d'évaluer la résistance du béton. Mais pour évaluer un ouvrage, on doit souvent obtenir des données sur la qualité du béton en continu, pour cibler les zones problématiques. Les méthodes sismiques fournissent une information plus directe, car elles sont reliées aux propriétés mécaniques des matériaux et à leur résistance. Ces variations de vitesse sismique dans les matériaux serviront à identifier les discontinuités. Les zones à problèmes peuvent être ciblées par une calibration sur place. Pour ce faire, on devra fixer une valeur de vitesse sismique acceptable pour le type de béton et de structure, après certains essais dans des zones évaluées par un spécialiste en béton, si possible.

Durant nos démarches auprès des utilisateurs on constate que les problèmes soulevés sont surtout reliés aux structures du génie civil et consistent à évaluer et éventuellement prévoir leurs entretiens. Comme les structures de béton sont généralement renforcées par de l'acier ou des câbles pré-contraints, les méthodes destructives peuvent causer des dommages lors de l'échantillonnage. Ce risque important favorise, à long terme, l'utilisation des méthodes non destructives. Mais, c'est surtout la fiabilité des méthodes et le prix de leur application qui devront être considérés.

Considérant les limitations que l'on nous a exposées des méthodes disponibles, nous avons développé une technique de mesure , la microsismique, qui est le trait d'union entre les méthodes à ultrasons et la sismique conventionnelle. Elle s'adapte mieux que les deux autres aux dimensions à sonder.

Pour démontrer que les méthodes de calcul de sismique conventionnelle peuvent être utilisées en microsismique, nous avons développé un équipement flexible qui convient mieux aux mesures sur les tabliers de pont, les dalles de béton et les barrages, que les équipements disponibles sur le marché.

En effet, il s'est avéré nécessaire d'utiliser un minimum de six canaux permettant de mieux identifier les ondes de compression et de cisaillement. Ces ondes sont les plus significatives en géotechnique. Pour ce faire, nous avons établi les caractéristiques d'enregistrement permettant d'obtenir la précision adéquate pour évaluer la résistance du béton.

Les calculs développés pour déterminer ces paramètres ont été vérifiés par des essais en laboratoire à l'Université de Sherbrooke et chez Géophysique GPR International, sur des masses et des dalles de béton connues afin de valider les techniques d'interprétation proposées et d'évaluer la précision des lectures obtenues, sur les vitesses sismiques et sur les épaisseurs des couches.

La microsismique permet d'investiguer de façon plus complète les masses de béton comparativement aux méthodes destructives ou aux techniques ultrasoniques ou d'impact-écho. Ces dernières n'offrent que des résultats ponctuels qui s'avèrent souvent peu représentatifs des masses de béton impliquées. Le signal est souvent trop faible et trop influencée par la surface pour permettre une évaluation bien réaliste de la résistance du béton.

Nous exposons la technique microsismique et les bases pour interpréter les résultats. Entre autres, nous traitons de l'influence de l'asphalte, des types d'ondes mesurées, de la pénétration de l'onde et de la couverture d'investigation. Il s'avère nécessaire de bien identifier les ondes se propageant dans un milieu aussi anisotrope qu'un béton.

Après un bref exposé des méthodes conventionnelles et des principaux problèmes reliés au béton, nous présentons un résumé des lois s'appliquant aux ondes se propageant dans les milieux visés. Nous exposons les résultats d'essais en laboratoire qui démontrent ces phénomènes de propagation. L'ensemble de l'ouvrage présente donc la microsismique et ses techniques d'interprétation permettant d'obtenir des résultats plus fiables que par les méthodes existantes.

CHAPITRE 1
LE POURQUOI DES MÉTHODES NON-DESCTRUCTIVES

1.1 Utilisation du béton dans le domaine de l'ingénierie

Le béton occupe depuis longtemps une place importante dans l'industrie des matériaux de construction. Son intérêt pour le domaine de l'ingénierie réside dans sa principale propriété mécanique, soit sa grande résistance à la compression qui permet la construction d'oeuvres impressionnantes nécessitant de grandes quantités de béton.

1.1.1 Utilisation du béton -vs- types d'ouvrages

Par le passé, le béton servait surtout pour la construction de ponts (pilier, tablier), de routes et de fondations de bâtiments. Sa demande ainsi que ses applications se sont accrues lors de la 2e guerre mondiale. En effet, pendant et même après cette période, il servit d'alternative aux structures d'acier dans la construction de bâtiments commerciaux, industriels et miniers.

De nos jours, on continue de l'utiliser pour les mêmes types d'applications, en plus d'y trouver de nouvelles applications technologiques telles les réacteurs nucléaires et les barrages hydroélectriques.

1.1.2 Type et importance des détériorations du béton

La détérioration des ouvrages en béton peut être caractérisée par différents défauts visibles ou non à l'oeil nu. Ces derniers sont en majeure partie dus à des détériorations mécaniques et/ou chimiques provoquées par des conditions climatiques difficiles et/ou un

chargement excessif ou cyclique tel sur les tabliers de pont et lors de tremblement de terre. Parmi les défauts plus fréquemment rencontrés, on retrouve:

A) l'écaillage qui est la détérioration progressive du mortier et des granulats de béton suite aux cycles de gel-dégel;

B) la désagrégation qui est la détérioration physique ou chimique du béton en de petites particules (elle est précédée de l'écaillage ou non);

C) l'érosion par abrasion qui est le détachement progressif de fragments à la surface du béton, résultant du frottement de la glace ou de l'eau chargée de particules;

D) la corrosion des armatures qui est la dégradation par électrolyse du métal initial provoquant des contraintes supplémentaires;

E) la fissuration qui est une fracture linéaire traversant partiellement ou complètement le béton;

F) la délamination qui est une fissuration interne entre la couche de surface et la couche en profondeur, sans qu'il y ait détachement;

G) l'éclatement qui est le détachement de fragments de béton de la masse principale causé par l'action des éléments extérieurs (formation de glace dans les vides, pression due à la corrosion des armatures);

H) le joint froid qui est un plan de faiblesse causé par une interruption ou un retard lors des opérations de bétonnage;

I) le nid de cailloux qui est un défaut local caractérisé par un manque d'enrobage des gros granulats par le mortier;

J) la présence de vides ou la perte de support qui cause une augmentation de contrainte résultant en une diminution du temps de vie du béton;

K) la présence d'humidité dans la fondation ou sous les joints qui amène une perte de rigidité et la formation de vides;

l) la sulfatation qui est une "pourriture" chimique du béton par la présence des sulfates.

Parmi ces défauts, il est important de mentionner que se sont ceux liés aux cycles de gel-dégel et à la corrosion des armatures qui sont les plus fréquemment rencontrés au Québec pour les infrastructures routières. Ce genre de défauts apparaît souvent sous la forme de vides, de fissures ou de désagrégation qui se traduisent par une modification de la massé volumique et de la résistance. Plusieurs de ces défauts sont d'ailleurs visibles sur quelques structures publiques et privées. Une étude récente réalisée par le CERIU montre que "Globalement, 54% des ouvrages de la RMR sont en condition jugée "bonne" (comme neuve, entretien préventif seulement), 38% en condition "acceptable" (structure dégradée, réparations majeures requises) et 8% en "mauvaise" condition (réhabilitation majeure ou reconstruction requise). Les ouvrages sont généralement en meilleur état au centre de la RMR (58% en bonne condition) qu'en périphérie (30% en bonne condition)".

1.2 Gestion et entretien des ouvrages en béton

Au cours des dernières années, les efforts consacrés aux ouvrages en béton se sont surtout orientés vers le développement et l'expansion des infrastructures existantes. Conséquemment, les techniques de gestion et d'entretien des ouvrages en béton se sont développées lentement et demandent aujourd'hui une application plus routinière afin de planifier des stratégies d'intervention adéquates. C'est particulièrement vrai pour les structures surélevées (autoroutes et viaducs) et pour les structures plus âgées (40 ans et plus).

1.2.1 Problèmes soulevés par l'entretien des ouvrages

De nos jours, avec l'emphase mise de plus en plus sur la réhabilitation des structures existantes, la plupart des propriétaires d'ouvrages en béton font face un problème de gestion et d'entretien. En effet, les programmes d'entretien sont souvent non appropriés à cause d'un manque d'informations sur l'état des structures. Les méthodes actuelles de qualification des structures en béton sont en grande partie responsables de ce problème puisqu'elles se résument, dans bien des cas, à une investigation qualitative. De plus, ces méthodes conventionnelles se révèlent parfois fastidieuses et subjectives. Il importe donc d'inclure de nouvelles méthodes d'investigation lors de la mise sur pied d'un programme de gestion et d'entretien.

Plusieurs méthodes d'investigation appliquées au béton sont apparues au cours des dernières années. Certaines sont encore en développement alors que les autres ont connu des succès plus ou moins controversés. Ainsi, aucune méthode non destructive existante à ce jour ne fait partie d'un programme d'inspection standardisé pour les structures en béton. Par conséquent, il devient nécessaire de développer des méthodes non destructives de détection des défauts qui soient économiques et rapides tout en étant fiables et efficaces. Ballivy et Rhazi dans "Introduction auscultation et instrumentation et devenir" mentionnent que parmi les technologies ; infrarouge, radar et acoustique, semblent les plus prometteuses : mais certains spécialistes, (Pla-Rucki et Eberhard, 1995) et (Tomsett, 1980), prévoient la suprématie future des méthodes acoustiques. Il en résultera un entretien plus approprié et nécessaire afin d'augmenter la durée de vie des ouvrages et d'amortir leur coût sur une plus longue période.

1.2.2 Méthodes d'investigation conventionnelles

Parmi les méthodes d'investigation dites conventionnelles, certaines, habituellement les plus anciennes, ne permettent qu'une évaluation qualitative alors que d'autres peuvent

quantifier l'état des ouvrages. Quelques-unes d'entre elles sont présentées avec leurs avantages et limites.

Les deux méthodes conventionnelles les plus couramment employées pour l'investigation des infrastructures routières restent sans aucun doute l'observation visuelle et le prélèvement de carottes pour faire des essais de compression. Ces deux méthodes font d'ailleurs partie des normes s'appliquant à l'inspection des structures. Malgré des critères bien établis, l'inspection visuelle n'en demeure pas moins limitée à l'observation en surface qui, dans bien des cas, ne permet pas une détection efficace et complète des défauts présents dans les structures. Quant aux sondages ils procurent une excellente source d'information pour la corrélation avec d'autres méthodes. Toutefois, ils constituent des essais ponctuels destructifs et coûteux qui peuvent être nuisibles à plus long terme à la structure. De plus, lorsqu'utilisés seuls, ils ne permettent pas de dresser un bilan représentatif du véritable état global des structures puisqu'ils n'investiguent qu'une faible superficie et un faible volume des structures et que leur disposition est souvent aléatoire.

Une autre méthode utilisée depuis déjà une quarantaine d'années mesure la dureté du béton par le nombre de rebonds suite à un impact. La source couramment utilisée pour ces tests de rebond se nomme marteau Schmidt. Le principal avantage de cette méthode est son approche simple et peu coûteuse. Cependant plusieurs éléments tels le type d'appareils, la position du test, le type et les proportions de ciment et d'agrégat, l'âge ainsi que le degré de compaction peuvent affecter les résultats obtenus. Les conditions de surface du béton (humidité, texture, carbonatation, etc.) affectent également les résultats de façon significative. Malgré toutes ces limitations, il est intéressant de noter qu'il est possible d'estimer l'uniformité et la qualité du béton ainsi que la résistance à la compression avec, toutefois, une précision limitée. Notons à cet effet que (De Almeida, 1991) a proposé une relation entre le nombre de rebonds (RN) et la résistance à la compression (R_c) du béton soit:

$$R_c = 1.0407\,(RN)^{1.1546} \qquad \text{(Éq. 1.1)}$$

où 1,0407 est un facteur déterminé expérimentalement en unités de mégapascal, (Mpa) tout comme Rc.

Une méthode qui consiste à investiguer les tabliers de ponts est souvent faite en traînant une chaîne sur la zone à étudier (communément appelée 'chain drag'). Un bruit sourd se produit lorsque des défauts sont rencontrés. Cette méthode est particulièrement utile dans la détection des délaminations des dalles de béton. De plus, elle est simple, économique et relativement efficace. Il faut toutefois mentionner qu'il s'agit d'une méthode purement qualitative et fortement influencée par l'expérience de l'opérateur, la présence d'eau et la nature des anomalies recherchées.

Enfin, pour une détection locale des vides, fissures ou délamination, un simple marteau est souvent employé. Il s'agit de frapper le béton et d'écouter le son qui en résulte. Dépendamment de la réponse acoustique, il est possible de diagnostiquer le défaut, s'il existe, qui affecte le béton à l'endroit testé. Cette méthode acoustique connue sous le nom de test au marteau a toutefois le désavantage d'être subjective.

1.2.3 Méthodes géophysiques usuelles

Au cours des années 40, le développement d'instrumentation électronique sophistiquée a ouvert la voie aux méthodes non destructives pour l'investigation des matériaux hétérogènes tels le béton. Ce sont surtout les méthodes basées sur la propagation des ondes acoustiques qui ont fait leur apparition dans les premiers temps. Le Pulse-Echo (PE) entre dans cette catégorie en utilisant une source (transducteur piézoélectrique) qui génère des ondes acoustiques sous forme de faisceau. Ces ondes se propagent dans le matériau et sont réfléchies en cours de route par des défauts ou par des interfaces entre des couches de différentes densités ou de différentes propriétés élastiques. Ces ondes réfléchies (ou échos) sont reçues par un capteur (géophone ou accéléromètre) qui les transmet à un oscilloscope pour être emmagasinées et imagées. À l'aide de ce dernier, les temps d'arrivée des impulsions peuvent être déterminés. Si la vitesse des

ondes dans le milieu est connue, on peut alors calculer les profondeurs des défauts ou des interfaces. L'ordre de grandeur des défauts détectés dépend de la fréquence de la source; plus la fréquence est élevée, plus la résolution augmente, permettant ainsi de mieux définir les petits défauts. Notons toutefois qu'une onde de haute fréquence s'atténue plus rapidement et par conséquent, investigue de moins grandes profondeurs. Le choix d'une source (et par le fait même d'une fréquence) dépend donc de la dimension des défauts ou des épaisseurs à mesurer et des caractéristiques du milieu investigué ainsi que de la sensibilité de l'appareil à détecter une faible quantité d'énergie provenant d'un interface qu'on pourrait appeler limite.

Plusieurs méthodes ont aussi été développées au cours des années 80. Parmi celles-ci, on compte l'Impact-Echo (IE) développé en premier par le NIST (National Institute of Standards and Technology) et l'Université Cornell. Cette méthode utilise un principe semblable à celui de PE. Elle consiste à analyser l'écho (l'onde réfléchie) d'un impact produit à la surface du béton. L'onde peut être réfléchie sur des discontinuités ou par des interfaces. Ainsi, l'épaisseur ("H") d'une couche ou la profondeur d'un défaut peuvent être calculées à l'aide de la fréquence de résonnance ("f_r") de l'écho et la vitesse de propagation ("V_p") dans le matériau par l'équation:

$$H = \frac{V_p}{2\, f_r} \qquad \text{(Éq. 1.2)}$$

L'amplitude de l'onde réfléchie est fonction du contraste d'impédance acoustique entre le milieu sain et défectueux. L'analyse de la variation d'amplitude permet donc d'estimer la qualité du béton rencontré par l'onde acoustique. La principale différence entre l'IE et le PE est la fréquence des ondes générées dans le matériau. Les sources ultrasoniques utilisent de hautes fréquences (100 kHz à 5 MHz) tandis que l'IE génère des impulsions de fréquences relativement basses dans le domaine acoustique (généralement < 50 kHz). Les marteaux (fréquence de 2 à 7 kHz), les sphères d'acier et les impacteurs à bout arrondi constituent les sources les plus fréquemment utilisées en IE. Le capteur peut

être un géophone, un accéléromètre ou une sonde piézoélectrique dépendamment des structures à ausculter.

Apparues dans la même période que l'IE, le Sonic Echo (SE) et l'Impulse Response (IR) sont deux méthodes étroitement liées qui ont été développées pour tester les conditions et la longueur des fondations de forme columnaire telles piliers enfoncés "driven piles" et puits forés "drilled shaft". Pour le SE comme pour l'IR, le principe implique la propagation d'onde générée par un impact (souvent à l'aide d'un marteau) sur le dessus de la structure concernée. L'onde voyage vers le bas et est réfléchie par des irrégularités, des changements d'impédance acoustique ou par le fond de la fondation. Un capteur (géophone ou accéléromètre) mesure les temps d'arrivée et l'amplitude des réflexions. L'analyse des conditions des structures est donc basée sur l'identification et l'évaluation des réflexions et ce, pour les deux méthodes. Cependant, les résultats obtenus sont analysés dans le domaine du temps pour le SE et dans le domaine des fréquences pour l'IR. L'analyse des données dans le domaine des fréquences permet de tracer une courbe de mobilité (réponse de la structure/force d'impact initiale -vs- fréquence) ainsi qu'une courbe de cohérence. Ces graphiques sont utilisés respectivement pour estimer la rigidité du matériau et la qualité des données. La longueur de la fondation peut être calculée dans les deux domaines à l'aide des fréquences de résonnance ou de la différence entre les temps d'arrivée de deux réflexions consécutives.

Les principaux inconvénients de ces approches (PE, IE, SE/IR) résident dans la fiabilité de l'analyse des données. Ces équipements ne sont souvent munis que d'un seul canal. Conséquemment, ils ne permettent pas de bien évaluer le type d'onde enregistré puisque le nombre de données est trop faible.

La couverture des mesures doit être estimée en fonction du volume utilisé par l'onde pour se propager, de la longueur des dispositifs et du lieu de l'impact. Or, toutes ces méthodes utilisent des sources de hautes fréquences et un seul canal. La couverture sur une dalle de béton est donc très faible (~ 0.01 m^3) comparativement aux méthodes

microsismiques proposées où la couverture dépasse 0.6 m^3, un facteur de 60. De plus, leur domaine d'application est assez limité étant donné qu'elles utilisent de hautes fréquences permettant l'investigation que pour de faibles épaisseurs, et souvent limité par la dimension des agrégats. (Pla-Rucki et Eberdhard, 1995).

Une autre méthode récemment adaptée à l'investigation du béton est le géoradar. Ce dernier est un équipement électromagnétique à haute fréquence qui, suite à l'émission d'une impulsion, enregistre le retour des ondes réfléchies. Le signal radar se propage dans les matériaux à une vitesse près de celle de la lumière. Le temps de trajet est si petit que l'on peut acquérir jusqu'à 1000 signaux par seconde. Les réflexions sont généralement traitées en amplitude et le produit représente une image du sous-sol. C'est un outil idéal pour déterminer les épaisseurs des couches d'asphalte ou de la délamination. Pour obtenir les épaisseurs, la vitesse de propagation de l'onde radar doit être déterminée par calibration soit destructive ou par analyse des réflexions et de dispersion des temps d'arrivée de lectures prises d'un réflecteur à différente distance. Toutefois cette dernière s'avère souvent difficile à réaliser dans certains cas, laissant ainsi une ouverture importante pour la microsismique comme outil de calibration non destructif.

Toutefois, la principale limitation du géoradar est de répondre aux propriétés électriques des couches et non à leur propriétés mécaniques. En effet, les lois régissant la vitesse de propagation, dans un milieu sont similaires à la sismique réflexion et la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique est donnée par la formule suivante:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \qquad \text{(Éq. 1.3)}$$

où V : vitesse de propagation de l'onde EM dans le matériau
c : vitesse de la lumière (3×10^8 m/s)
ε_r : permittivité relative

La microsismique peut apporter des informations plus précises qu'un radar sur la position des anomalies et sa dégradation. En effet, la microsismique est basée sur une méthode acoustique et les principaux paramètres mesurés sont reliés aux propriétés mécaniques des matériaux. L'effet des armatures peut plus facilement être contrôlé par sismique à cause des propriétés des matériaux en présence. La microsismique quantifiera la qualité du béton et fournira l'information nécessaire à l'ingénieur en structure.

1.2.4 Méthodes microsismiques proposées

La méthode sismique est l'une des premières qu'utilisaient les géophysiciens. Son application au domaine du génie civil est toutefois récente et a demandé d'adapter la sismique pétrolière à de plus faibles dimensions. Le présent travail fait la même démarche mais de la sismique du génie civil à l'investigation d'épaisseurs beaucoup plus restreintes tels les tabliers de pont et d'autoroute, les colonnes, les planchers des stationnements, etc...

La méthode d'auscultation microsismique repose donc sur l'acquisition et l'analyse, en temps réel, des ondes sismiques générées par une source. Deux types d'ondes sont générés dans un milieu: les ondes de volume (onde "P" et onde "S") et les ondes de surface, tel les ondes de Rayleigh, de Lamb et de Love. Par l'intermédiaire des différents modules dynamiques et d'après la physique mécanique, la vitesse des ondes de compression (V_p) et de cisaillement (V_s) est sujette à la relation suivante:

$$V = \sqrt{\frac{\textit{élasticité}}{\textit{densité}}} \qquad (\textit{Éq. } 1.4)$$

La détermination des vitesses sismiques se fait sur un graphique du temps en fonction de la distance (aussi appelé dromochronique) en calculant l'inverse de la pente (i.e. $V = \Delta x / \Delta t$). La présence de défauts ou d'interfaces est habituellement caractérisée par un changement de vitesse. La vitesse sismique d'un milieu peut être établie. Si cette vitesse est utilisée comme un paramètre relié aux propriétés mécaniques du milieu, elle permettra d'identifier des changements dans le milieu. Ces changements pourront être causés par la présence de fissures ou par la dégradation du milieu, considérant que la densité du milieu change très peu.

Les levés microsismiques effectués durant ce mémoire, ont été faits avec le Microsis développé chez Géophysique GPR. Le Microsis est muni de deux sources et de six accéléromètres. L'intervalle de fréquence de la réponse des accéléromètres se situe entre 0.8 et 4 000 kHz et la couverture longitudinale d'investigation est 2.5 m comparativement aux méthodes géophysiques usuelles qui n'utilisent qu'un seul capteur où une couverture similaire demande beaucoup plus de temps. La documentation sur l'équipement Microsis est présentée en annexe A.

Quant à la tomographie sismique, il s'agit d'une méthode non-destructive qui consiste à mesurer les temps d'arrivée d'ondes sismiques pour plusieurs positions source-récepteur (i.e. pour plusieurs rais) soit à partir de la surface, soit entre deux sondages ou de chaque côté d'une structure. La tomographie sismique est généralement utilisée en mesurant les premières arrivées sismiques, des ondes de compression "P" et de cisaillement "S". Il est aussi possible d'analyser l'atténuation de ces ondes. Cette atténuation pourra être interprétée comme la présence d'obstacle ayant causé une réflexion et/ou une difraction de l'énergie sismique transmise. Bien que l'objectif principal de la tomographie soit la détermination des vitesses sismiques afin de caractériser les structures, la combinaison de deux types d'ondes "P" et "S" permet également d'obtenir une très bonne estimation des modules dynamiques et de la résistance à la compression des matériaux entre les forages tout en fournissant de l'information géotechnique sur le site.

L'interprétation des données tomographiques implique une modélisation mathématique. Originellement, la méthode de calcul utilisée avait été développée pour les rayons-X et les investigations ultrasoniques et elle est aujourd'hui appliquée aux mesures électriques, électromagnétiques et sismiques. Elle consiste à diviser la région investiguée en cellules d'égales dimensions formant ainsi une grille. Notons que la dimension des cellules dépend de la résolution désirée ainsi que du nombre de mesures. On verra donc à s'assurer que suffisamment de mesures sont prises et on considérera qu'il vaut mieux en limiter le nombre au besoin à résoudre mais de s'assurer de la qualité du signal. Un calcul matriciel permet ensuite d'attribuer à chaque cellule une lenteur (i.e. l'inverse de la vitesse avec des données obtenues). Une carte de contours de vitesses est produite et image l'état de la structure.

1.2.5 Réglementation concernant l'investigation des ouvrages

Actuellement, l'investigation des ouvrages en béton se fait surtout par observation visuelle à l'aide de critères établis. Au Québec par exemple, les critères pour l'évaluation des dommages se trouve dans le Manuel d'inspection des structures du Ministère des Transports. Peu de normes sont établies quant à l'utilisation des méthodes géophysiques pour l'investigation des structures. La limitation de l'application des méthodes géophysiques s'explique par leur nouveauté, le manque d'expérience dans ce domaine, et par les limitations de certaines techniques.

Certaines méthodes sont appliquées de façon quasi systématique notamment à l'investigation des piliers forés. En effet, le NMSHTD (New Mexico State Highway and Transportation Department) a mis sur pied un programme d'évaluation de l'état des piliers, incluant une méthode de test sonique entre les trous de forage et une méthode de test à faible impact (P.E.I.E.), utilisée afin de seconder les résultats de la première méthode. Les résultats de ces méthodes permettent de vérifier la présence de défauts et de juger de la qualité du pilier. Si les résultats sont complexes ou non concluants, l'ingénieur en charge du projet pourra avoir recours à des méthodes d'investigation supplémentaires afin de

déterminer si le pilier ne contient pas de défauts, selon la procédure établie par le New Mexico.

D'autres méthodes géophysiques ont fait leurs preuves sans toutefois être reconnues comme une procédure standard d'évaluation du béton. Il importe donc d'introduire une méthode de mesure fiable qui permettra, grâce à sa constance dans ses lectures, de suivre l'évolution d'une structure dans le temps, sans trop d'effort.

CHAPITRE 2

THÉORIE SUR LA PROPAGATION DES ONDES DANS UN MATÉRIAU SOLIDE

2.1 Mode de propagation des ondes sismiques dans un matériau solide

La méthode microsismique est basé sur les principes de la sismique réfraction mais exploite plus de paramètres tel l'atténuation, l'amplitude qui varient selon les milieux traversés. Le présent chapitre nous servira de référence pour l'interprétation de la microsismique.

Un choc appliqué soudainement en un point, à la surface d'un matériau, produira deux types d'ondes sismiques (élastiques) : les ondes dans la masse et les ondes à la surface. Les ondes de masse se propagent au sein du milieu; et se composent d'ondes de compression/dilatation dites ondes longitudinales et les ondes de cisaillement dites ondes transversales. Quant aux ondes de surface, elles se propagent à la surface libre du matériau et sont une combinaison des ondes longitudinales et transversales. Les ondes de surface incluent une grande variété de types d'ondes dont les plus connues sont les ondes de Rayleigh (R), les ondes de Love (L) et les ondes de Lamb. Il est important de noter que si le milieu de propagation de l'onde possède des propriétés élastiques homogènes et isotropes, on observe un seul type d'onde de surface soit les ondes de Rayleigh. Cependant, si le milieu est hétérogène et/ou anisotrope, d'autres ondes de surface telles que les ondes de Love (L) peuvent être présentes.

2.1.1 Type d'ondes sismiques

<u>Les ondes longitudinales</u> (ou de compression) correspondent au mouvement des particules élémentaires du milieu dont la direction est parallèle à la direction de propagation

de l'onde (figure 2.1). Durant le passage d'une onde longitudinale, le milieu est soumis à une contrainte de compression/dilatation.

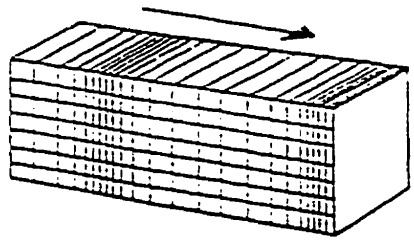


Figure 2.1

Représentation schématique d'une onde de compression tiré de (Cosma, 1988)

Ce type d'onde est très utilisé dans le contrôle industriel puisqu'il s'agit de la première onde enregistrée par les capteurs. Conséquemment, une onde longitudinale est symbolisée par "P" (i.e. "primary arrival", la plus rapide). Toutefois on a constaté que cette caractéristique est toujours vraie mais que la deuxième arrivée à un géophone n'est pas toujours l'onde "S" à cause des effets géométriques complexes des structures.

Les ondes transversales (ou de cisaillement, la deuxième plus rapide) correspondent au mouvement des particules dont la direction vibratoire est perpendiculaire à la propagation de l'onde (figure 2.2). Durant le passage d'une onde transversale, le milieu de propagation est soumis à une contrainte de cisaillement.

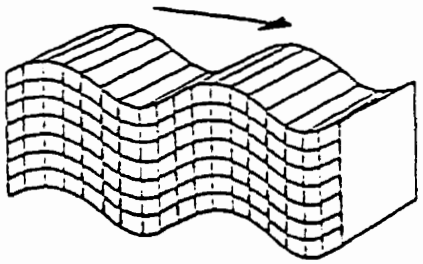


Figure 2.2

Représentation schématique d'une onde de cisaillement tiré de (Cosma, 1988)

Ce type d'onde est symbolisé par "S" puisqu'il s'agit de la deuxième arrivée (i.e. "secondary arrival"). Il est important de noter que ce type d'onde ne peut se propager que dans les corps solides puisque les liquides et les gaz n'ont pas de résistance au cisaillement.

Les ondes de Rayleigh (R) n'existent que pour des structures dont l'épaisseur est grande par rapport à la longueur d'onde. Pour ce type d'onde, le mouvement des particules est elliptique et rétrograde par rapport à la direction de propagation (figure 2.3). Notons que la composante horizontale du mouvement est de moindre importance que la composante verticale.

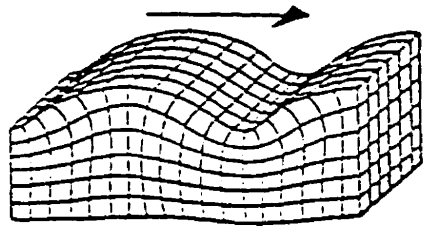


Figure 2.3

Représentation schématique d'une onde de Rayleigh
tiré de (Cosma, 1988)

L'amplitude du mouvement décroît exponentiellement avec la profondeur à partir de la surface.

Les ondes de Love (L) sont observées lorsque la vitesse de propagation du milieu supérieur est moins élevée que celle du milieu inférieur. Le mouvement de l'onde s'effectue parallèlement à la surface et dans une direction transversale à la direction de propagation de l'onde (figure 2.4).

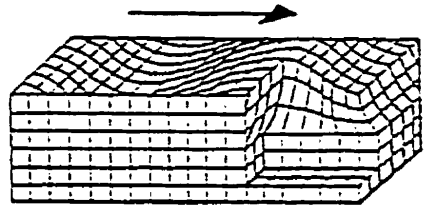


Figure 2.4

Représentation schématique d'une onde de Love
tiré de (Cosma, 1988)

Les ondes de Love ne peuvent se propager dans un liquide ou un gaz.

Les ondes de Lamb (ou ondes de plaques) sont des ondes de surface qui se propagent dans un corps solide dont l'épaisseur est comparable à la longueur d'onde. Elles se propagent le long de la plaque à travers toute l'épaisseur de celle-ci. Il existe deux modes fondamentaux de vibrations pour ce type d'onde: le mode symétrique et le mode antisymétrique (figure 2.5).

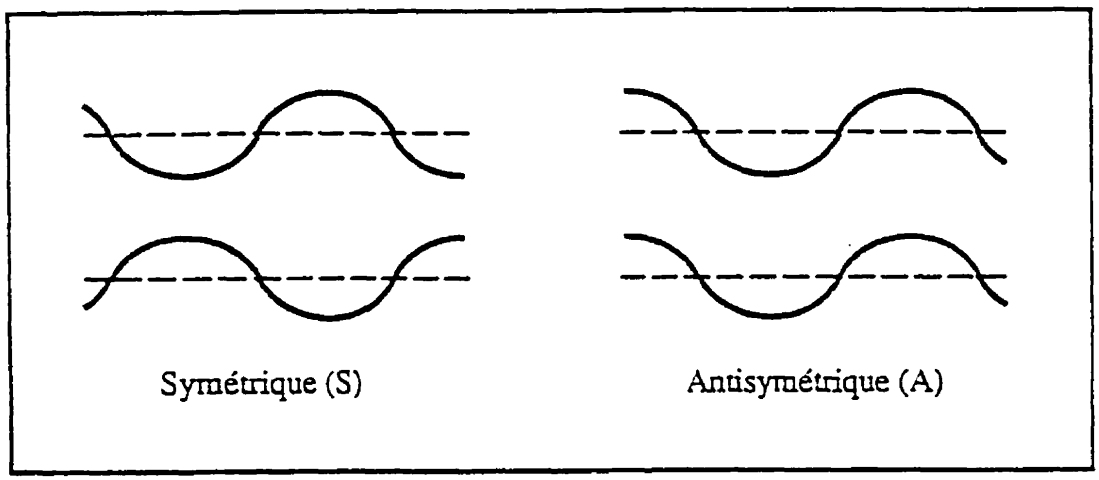


Figure 2.5

Schéma d'une onde de Lamb

Finalement, la transmission de l'énergie des ondes dépend de la vibration des particules du milieu. Elle n'est donc possible que lorsque le milieu de propagation est un matériau à comportement élastique, c'est-à-dire un matériau pouvant se déformer. Une étude (Miller et Pursey, 1955) a démontré que, dans un matériau uniforme, l'énergie initiale transmise à un corps lors d'un impact se divise ainsi: 67% de l'énergie se propage sous la forme d'onde "R", 26% sous la forme d'onde "S" et 7% sous la forme d'onde "P". D'ailleurs des essais confirmant l'étude de Miller ont été faits récemment par (McBeth et Arnold, 1998). Les ondes de surface sont généralement assez lentes et se différencient facilement des ondes "P" et "S", celles qui nous intéressent le plus à cause de leur relation avec les caractéristiques mécaniques des matériaux.

2.1.2 Paramètres des ondes

Une onde sismique, quel que soit son type, est caractérisée par différents paramètres qu'on voudra exploiter en microsismique. Parmi ceux-ci, on retrouve:

- la vitesse de propagation (V): il s'agit de la vitesse à laquelle se transmet le mouvement vibratoire de la structure des points d'émission à un point d'observation. Pour une distance de propagation (x) et un temps de propagation (t), on a

$$V = x / t \qquad \text{(Éq. 2.1)}$$

Elle s'exprime en mètres par seconde (m/s). Elle dépend surtout du milieu de propagation ainsi que du type d'onde considérée. Pour un même milieu de propagation et une source d'émission identique, ce sont les ondes "P" qui se propagent le plus rapidement. Dans le cas du béton ou du roc, la vitesse des ondes "S" est d'environ 0.6 fois celle des ondes "P". Quant aux ondes "R", elles se propagent généralement à 0,92 fois la vitesse des ondes "S".

- la période (T): on désigne la période par l'intervalle de temps nécessaire au mouvement vibratoire pour effectuer une oscillation complète. La période s'exprime en seconde.

- la longueur d'onde (λ): c'est la distance minimale qui sépare deux points dans le même état vibratoire ou encore la distance parcourue par l'onde pendant une durée égale à la période. La longueur d'onde s'exprime en mètre.

- la fréquence (f): la fréquence est en fait l'inverse de la période et s'exprime en Hz. On peut également l'exprimer par la relation:

$$f = V / \lambda \qquad \text{(Éq. 2.2)}$$

- le front d'onde: afin de décrire les phénomènes de propagation, on fait appel à la notion de front d'onde qui est la surface atteinte par l'onde à un instant donné. La présence d'obstacles dans le milieu modifie le trajet de l'onde et change sa forme, tel que montré à la figure 2.6. Le principe de Huygens originalement formulé en optique, permet de modeler la propagation d'un front d'onde à travers un milieu homogène en vitesse, en considérant chaque point sur le front d'onde comme instantanément, un point source de propagation d'énergie ondulatoire. Pour déterminer la forme du front d'onde, il faut connaître le comportement d'une onde rencontrant un obstacle. Les fronts d'ondes peuvent avoir des formes très diverses lorsqu'elles se propagent en fonction des milieux traversés.

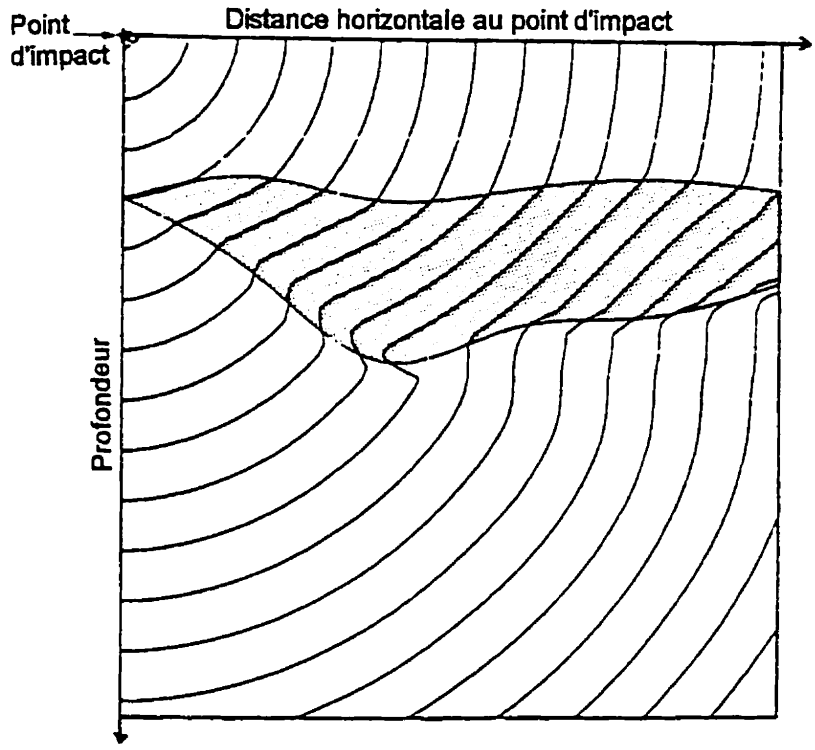


Figure 2.6

Courbes isochrones d'une onde sismique rencontrant un obstacle

- l'impédance acoustique (Z): il a été mentionné plus tôt que la vitesse de propagation dépendait, entre autre, du milieu. Afin de tenir compte du milieu (densité et constantes élastiques), on définit un facteur (Z) appelé impédance acoustique qui s'exprime en kg/m^2s.

$$Z = \rho V \qquad \text{(Éq. 2.3)}$$

L'impédance acoustique nous renseigne sur la résistance qu'offre le milieu au passage d'une onde de vitesse V. En d'autres termes, elle caractérise la qualité du matériau à permettre la transmission des ondes.

- l'amplitude: l'amplitude d'une onde représente l'écart maximal du point de repos et varie périodiquement.

2.2 Vitesse sismique -vs- propriétés élastiques des matériaux

Il est possible de démontrer mathématiquement, à partir de la théorie de l'élasticité, que la vitesse de propagation dépend principalement de la densité et des constantes élastiques du milieu. Ainsi, on sait que la vitesse de propagation de l'onde "P" est donnée par: (Timoshenko et Goodier, 1970).

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-v)}{\rho(1+v)(1-2v)}} \qquad \text{(Éq. 2.4)}$$

et que la vitesse de propagation de l'onde "S" est donnée par

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+v)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \qquad \text{(Éq. 2.5)}$$

où v : coefficient de Poisson
ρ : densité (kg/m^3)
G : module de rigidité (Pa)
E : module d'Young (Pa)

On obtient les valeurs des constantes élastiques grâce aux formules suivantes:

$$v = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \qquad \text{(Éq. 2.6)}$$

$$E = \frac{\rho V_s^2(3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \qquad \text{(Éq. 2.7)}$$

$$G = \rho V_{sp}^2 \qquad \text{(Éq. 2.8)}$$

Il est important de remarquer que, dans ces équations, les modules sont de nature dynamiques et sont généralement différents des modules statiques déterminés à partir d'essais mécaniques. Le tableau 2.1 montre cette différence pour différents matériaux.

Tableau 2.1

Comparaison de modules d'élasticité statiques et dynamiques (U.S. Bureau of Reclamation, 1953, Rep. *No. SP-39)*

Module d'Young sécant pour la première portion de la courbe contrainte-déformation.

Type de roc	E_s* GPa	E_d GPa	Ratio E_d/E_s	ν_s	ν_d
Calcaire calcédonieux	55,16	46,89	0,85	0,18	0,25
Calcaire (à grain fin)	66,88	71,02	1,06	0,25	0,28
Calcaire oolitique	45,51	53,78	1,18	0,18	0,21
Shale quartzeux	16,55	22,06	1,33	0,08	-
Monzonite porphyrique	41,37	56,54	1,36	0,18	0,21
Diorite quartzeuse	21,37	30,34	1,42	0,05	0,19
Calcaire stylolitique	38,61	56,54	1,46	0,11	0,27
Shiste à biotite	39,99	59,30	1,48	0,01	0,16
Calcaire poreux	16,55	28,27	1,70	0,18	0,20
Calcaire (à grain moyen)	33,79	52,40	1,86	0,17	0,31
Grès	13,10	26,89	2,05	0,05	0,08
Subgraywake (à grain moyen)	12,41	26,20	2,37	0,03	0,19
Schiste à séricite	7,58	17,93	2,36	-0,02	0,44
Subgraywake (à gros-grain)	11,03	26,20	2,37	0,02	0,06
Phyllite quartzeuse	7,58	18,62	2,45	-0,03	-
Shale calcareux	15,86	24,82	1,56	0,02	-
Subgraywake (à grain moyen)	9,65	24,82	2,57	0,02	-
Granite (faiblement altéré)	5,52	15,71	2,75	0,04	0,10
Phyllite graphitique	9,65	26,89	2,78	-	-
Subgraywake (à gros-grain modérément altéré)	8,96	26,20	2,90	0,05	0,08

Les vitesses sismiques peuvent donc nous informer sur la qualité des matériaux comme le béton. En effet, un béton de mauvaise qualité est caractérisé par une diminution de rigidité et conséquemment, par une baisse de son module de Young. Étant donné les relations décrites ci-dessus (i.e. $E \alpha V_p^2$), une baisse du module de Young se reflétera par de plus faibles vitesses sismiques. Des résultats expérimentaux confirment cette relation et le tableau 2.2 présente les vitesses sismiques typiques pour les différentes conditions du béton (Malhotra, 1976).

Tableau 2.2

Classification de la qualité du béton en fonction de l'onde "P"

Classification de la qualité du béton	Vitesse de l'onde "P" (m/s)
Excellent	> 4 500
Bon à très bon	3 650 - 4 500
Passable	3 050 - 3 650
Pauvre	2 000 - 3 050
Très pauvre	0 - 2 000

2.3 Atténuation des ondes sismiques dans un matériau solide

Dans le cas d'un milieu de propagation idéalisé, une onde ne subirait pas de perte d'énergie en se propageant et sa fréquence reste également inchangée. Toutefois, une onde est toujours atténuée au cours de sa propagation puisque les milieux de propagation ne sont pas parfaitement élastiques.

2.3.1 Atténuation par absorption

L'absorption acoustique est causée par la conduction thermique et la friction interne ou visqueuse. Les ondes sismiques, en se propageant dans un matériau, produisent des

compressions et des dilatations adiabatiques. De l'énergie thermique est enlevée pendant les compressions et restituée lors des dilatations, ce qui fait décroître l'énergie de l'onde et cause une atténuation.

L'atténuation d'une onde se propageant dans un milieu homogène est décrite par l'équation générale suivante:

$$A(x) = A_0 e^{-\alpha x} \qquad \text{(Éq. 2.9)}$$

où $A(x)$: amplitude de l'onde après une distance x
A_0 : amplitude initiale de l'onde
x : distance (en m)
α : coefficient d'atténuation

2.3.2 Atténuation par diffusion

La diffusion des ondes dépend en particulier de la nature et de la dimension moyenne des granulats contenus dans les matériaux hétérogènes relativement à la longueur d'onde. Elle est également fonction de la fraction volumique des granulats et du contraste d'impédance entre les granulats et la matrice.

Le coefficient d'atténuation par diffusion dépend de la fréquence et de la nature du milieu. Il a été démontré (Bourbier et al, 1986) que ce coefficient d'atténuation dépend du rapport longueur d'onde/diamètre des granulats (λ / D):

- lorsque le diamètre des granulats est petit par rapport à la longueur d'onde, l'atténuation est de type Rayleigh. Dans ce cas,

$$\alpha(f) = a_1 f + aD^3 f^4 \qquad \text{(Éq. 2.10)}$$

où: a_1 : coefficient d'absorption
a : coefficient de diffusion
D : diamètre moyen des granulats
f : fréquence

- lorsque le diamètre des granulats est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, la diffusion est de type stochastique. Dans ce cas,

$$\alpha(f) = a_1 f + bD^2 f^2 \qquad \text{(Éq. 2.11)}$$

où : b: coefficient de diffusion

- lorsque la longueur d'onde est faible par rapport aux dimensions des particules, la diffusion est proportionnelle à l'inverse de la dimension des granulats :

$$\alpha(f) = a_1 f + cD^{-1} \qquad \text{(Éq. 2.12)}$$

où: c : coefficient de diffusion

Le premier terme des trois équations précédentes représente l'atténuation par absorption; cette atténuation décroît linéairement en fonction de la fréquence. Le second terme symbolise l'atténuation par diffusion.

Dans le béton, les trois cas envisagés ci-dessus peuvent exister puisque les fréquences utilisées varient de quelques centaines de Hz à plusieurs kHz. Quant aux granulats, ils sont de nature différente et leur dimension se situe généralement entre 1 mm et 60 mm, donc dans un béton conduisant le son à une vitesse de 3000 m/sec. Une fréquence de 50 000 Hz produira des longueurs d'ondes équivalentes aux dimensions des granulats. Les granulats influenceront de façon marquée le comportement des ondes de haute fréquence. Ce phénomène est nuisible et il est évité en microsismique qui opère à des fréquences plus basses.

Les analyses en fréquence, comme la transformée de Fourier, sont des outils mathématiques qui ouvrent une porte sur le problème physique. En général, plus la

longueur d'onde sera courte, plus petit sera l'objet détectable. Toutefois, plus la longueur d'onde est courte plus l'énergie sera absorbée sur une courte distance. C'est ce compromis entre la résolution physique et les dimensions à étudier que visait ce projet. Ce cap a été franchi par la microsismique.

CHAPITRE 3
PARAMÈTRES D'ACQUISITION MICROSISMIQUE

3.1 Modèles numériques sur la propagation des ondes dans un matériau solide

Au chapitre précédent, nous avons exposé les principes de propagation des ondes sismiques dans un milieu homogène. Pour exploiter les principes et développer la microsismique dans le domaine des infrastructures, nous devons déterminer les principaux paramètres que nous désirons acquérir pour qualifier la structure analysée. D'autre part, nous verrons au chapitre 5, les techniques de mesure ainsi que des cas d'application de la microsismique en milieu hétérogène. Nous y analyserons les effets causés par les armatures, les granulats, les défauts et autres.

Le principe de base de la microsismique consiste à transposer la sismique réfraction conventionnelle à des dimensions de 10 à 20 fois plus petites et d'appliquer des méthodes d'interprétation connues, telles celles développées par (Hawkins, 1969).

Pour ce faire, on doit établir les paramètres d'acquisition, tels le temps d'échantillonnage et la fréquence à enregistrer, compte tenu des dimensions étudiées. La microsismique représente un champ d'investigation peu connue en géophysique et dont les besoins d'applications sont récents. Nous avons donc évalué les données du Microsis® - MD-3, développé chez GPR, pour évaluer sa sensibilité par rapport à d'autres systèmes d'acquisition.

Dans un premier temps, des calculs théoriques sont présentés pour la tomographie sismique et la sismique réfraction. Toutefois, ces paramètres doivent être vérifiés, ce qui sera fait par des expériences en laboratoire présentées au chapitre 4.

3.1.1 Modèle sur la microsismique réfraction

Pour nos calculs en modèle réduit, on s'est basé sur la sismique réfraction conventionnelle en s'appuyant sur l'équation 2.1. Comme les dimensions sont réduites par un facteur de 10, le temps de parcours le sera aussi par un même facteur.

Ainsi, si on réduit le temps de trajet, on devra augmenter la fréquence du signal pour obtenir une onde similaire à celle obtenue en réfraction classique. Cette fréquence se situera entre 400 et 6 000 Hz, soit des fréquences 10 fois plus élevées pour des espacements de mesure passant de 5 mètres à 0.5m.

Le pas d'échantillonnage est déterminé par les fréquences du signal à enregistrer. Ainsi, pour une onde de 5 000 Hz d'une période 200 µs (T), en échantillonnant au 5 µs (soit T/40), on obtient 40 lectures pour tracer l'onde, ce qui est suffisant selon (Sheriff, 1984) qui recommande T/8.

Dans ces conditions d'acquisition, on devrait pouvoir appliquer les mêmes principes d'interprétation en microsismique qu'en sismique classique. Ainsi, les méthodes de calcul classique de (Hawkins, 1969) devraient s'appliquer aux infrastructures. On devra toutefois se servir aussi de plusieurs principes reliés aux ondes pour l'interprétation des résultats ce qui n'est généralement pas nécessaire en sismique conventionnelle.

3.1.2 Modèle pour la tomographie sismique

Nous traiterons à part la tomographie sismique, car les critères de lecture de données ne sont pas tout-à-fait les mêmes qu'en réfraction. Avant de discuter du modèle réduit en tant que tel, nous devons nous assurer dès le départ que les deux principes suivants sont respectés pour que les données traitées soient significatives. Ces principes ont été basés sur notre expérience en tomographie.

1. Le nombre de rais doit être supérieur au nombre de cellules, et les rais doivent être répartis de façon homogène dans l'espace, afin d'avoir une couverture uniforme et la plus dense possible, pour obtenir une distribution de vitesses bien déterminée et des résultats fiables, sans pour autant effectuer un nombre de lectures trop long à acquérir. Nous considérons le cas d'une couverture à 100%. Cette couverture pourra être augmentée en faisant un balayage plus serré de façon similaire qu'en sismique réflexion.

$$N_{rai} > N_{cell} \qquad \text{(Principe 1)}$$

2. Pour une couverture à 100% le temps d'échantillonnage doit être inférieur à la différence de temps d'arrivée entre deux capteurs successifs, c'est-à-dire que la résolution en temps de l'équipement doit être suffisante pour discriminer deux arrivées distinctes sur des capteurs voisins.

Si t_s est le temps d'échantillonnage, t_i le temps d'arrivée du signal sismique au capteur i et t_{i+1} au capteur voisin i+1:

$$t_s < t_{i+1} - t_i \qquad \text{(Principe 2)}$$

Nous avons considéré pour l'analyse du modèle réduit un plan de béton de forme rectangulaire de largeur "x" et de longueur "y". Ainsi, pour n capteurs, l'espacement Δy entre chaque capteur sera donné par l'équation 3.1 et montré à la figure 3.1 :

$$\Delta y = y/(n-1) \qquad \text{(Eq. 3.1)}$$

L'image tomographique se compose de cellules rectangulaires. Nous imposerons la longueur des cellules égale à l'espacement entre les capteurs, ce qui est la taille la plus petite possible sans qu'il y ait sous-détermination de la matrice de vitesses. Le nombre total de cellules est obtenu par l'équation 3.2 après substitution du terme $y/\Delta y$:

$$N_{cell} = N_x \times N_y$$

$$N_{cell} = (x/\Delta x)\,(y/\Delta y)$$

(Éq. 3.1) $$N_{cell} = (n-1)\,(x/\Delta x)$$ (Éq. 3.2)

D'autre part, le nombre de rayons (N_{rai}) est égal au produit du nombre de stations de tir (N_{source}) et du nombre de capteurs (N_{capt}):

$$N_{rai} = N_{source} \times N_{capt} \qquad \text{(Eq. 3.3)}$$

Le nombre de capteurs est égal au nombre de canaux du sismographe ($N_{capt} = n$), et nous considérerons ici le cas où le nombre de stations de tir est égal au nombre de capteurs, et où les espacements sont les mêmes, afin de disposer d'une couverture tomographique symétrique et uniforme à 100% ($N_{source} = n$):

$$N_{rai} = n^2 \qquad \text{(Eq. 3.4)}$$

Et le Principe 1 devient, en utilisant (Eq. 3.2) et (Eq. 3.4):

$$n^2 > (n-1)\,(x/\Delta x)$$

$$n^2/(n-1) > (x/\Delta x)$$

$$n^2/(n-1) > N_x \qquad \text{(Inéq.3.5)}$$

On en déduit une première condition sur les paramètres d'acquisition; si n est le nombre de canaux en opération, le rapport $n^2/(n-1)$ doit être supérieur au nombre de cellules dans le sens de la largeur. Avec un sismographe 24 canaux, le nombre de cellules maximal dans le sens de la largeur pour chaque installation est de 24, et de 23 (soit n-1) dans le sens de la longueur. Ainsi, avec un sismographe à 6 canaux, on pourra imager jusqu'à 6x5 cellules en suivant le même principe.

Maintenant que le nombre maximal de cellules a été établi pour obtenir un résultat significatif, la taille minimale de ces cellules qui pourra être établie sans tomber en-dessous de la résolution de la méthode est établie par le principe qui définit le temps d'échantillonnage nécessaire. Pour que ces deux événements soient distincts, on sait que:

$$t_s < t_{i+1} - t_i \qquad \text{(Inéq. 3.6)}$$

où: t_s : temps d'échantillonnage
t_i : temps au capteur i
t_{i+1}: temps au capteur i + 1

Or $t_{i+1} - t_i$, la différence dans les temps d'arrivée entre deux capteurs voisins, est égale à la différence de distance entre ces deux capteurs, divisée par "V", la vitesse de propagation de l'onde sismique entre ces deux capteurs:

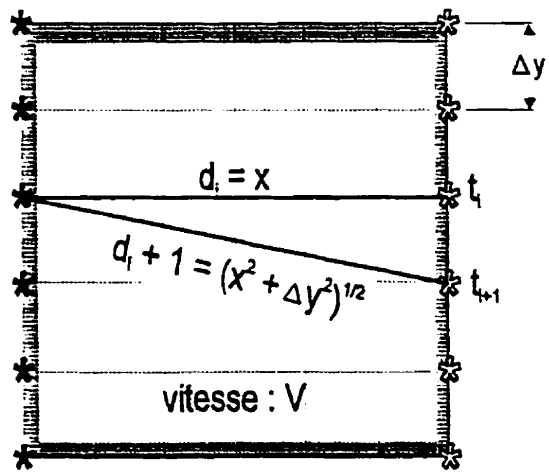


Figure 3.1

Schéma coupe à travers un bloc de béton dont la largeur x et longueur y

où: G_n = capteur N
S_n = source N
Δy = espacement entre les capteurs

$$t_s < (d_{i+1} - d_i) / v \qquad \text{(Inéq. 3.6)}$$

Or,

$$d_{i-1} = \sqrt{(x^2 + \Delta y^2)} \; et \; d_i = x$$

Ceci est généralement vrai en pratique car nous dépassons rarement des angles d'acquisition plus grands que 45° de part et d'autre de la source et même pour des angles plus forts, en pratique cette règle est acceptable jusqu'à 24 canaux.

Le terme $\sqrt{(x^2 + \Delta y^2)}$ peut s'approximer par $x + \Delta y^2/2x$, par décomposition en séries de Taylor et en négligeant les termes d'ordre supérieurs à 1. Ceci est valide car nous aurons dans la plupart des cas $\Delta y << x$, l'espacement entre les capteurs beaucoup plus petit que la largeur de la structure, ce qui justifie l'approximation :

$$\sqrt{(a+b)} = \sqrt{a} + b/2\sqrt{a}$$

$$t_s < \Delta y^2/2xv \qquad \text{(Inéq. 3.7)}$$

Voici une deuxième condition sur les paramètres d'acquisition: le temps d'échantillonnage doit être inférieur au carré de l'espacement entre les capteurs, divisé par deux fois le produit de la largeur et de la vitesse de propagation. Δy, l'espacement entre les capteurs, représente également la longueur de chaque cellule. Il est donc possible d'évaluer les dimensions minimales de cellule avec un temps d'échantillonnage donné et la vitesse de propagation des ondes dans le milieu à étudier. Dans un excellent béton, la vitesse sismique pourra être d'environ 4500 m/s. Généralement, le plus petit temps d'échantillonnage pour un équipement sismique à 24 canaux digital est de 24 microsecondes. La condition suivante sur l'espacement des capteurs et la taille des cellules s'applique pour un équipement 24 canaux:

$$\Delta y^2/x > 0{,}216$$

$$\Delta y > 0{,}465\sqrt{x}$$

Et avec l'échantillonneur Microsis®, à 5 microsecondes:

$$\Delta y^2/x > 0{,}045$$

$$\Delta y > 0{,}212 \cdot \bar{x}$$

Ainsi, pour une même structure de largeur "x", les cellules seront 2 fois plus petites avec l'échantillonneur Microsis® qu'avec un équipement 24 canaux. Par exemple, à travers un bloc de 10 mètres de largeur, un 24 canaux peut imager des cellules qui auront 1,5 mètre de largeur, tandis qu'avec l'échantillonneur Microsis®, elles seront de 0,7 mètre de largeur seulement. L'avantage du 24 canaux, cependant, est de permettre de couvrir une plus grande surface à la fois, mais également de disposer d'un plus grand nombre de cellules, dans le sens de la longueur (voir principe 1 et Inéquation 5), soit 24 avec l'équipement 24 canaux et 6 avec l'échantillonneur Microsis® par installation.

Si l'on compare le 24 canaux avec l'échantillonneur Microsis®, on constate qu'ils ne s'appliquent pas au même type de structure. Un 24 canaux est idéal pour les plus grosses structures comme les barrages de béton. Il pourra imager, dans un bloc de 10 m x 10 m par exemple avec des cellules de dimensions aussi petites que 0,4 m x 1,5 m. L'échantillonneur Microsis®, par contre, ne peut fournir que 6 cellules dans le sens de la largeur par couverture; il sera plus adapté aux structures moins larges comme les piliers. À titre d'exemple, à travers un pilier de 2 m x 2 m, on pourra imager des cellules aussi petites que 0,3 m x 0,3 m, ce qui n'est pas possible avec un 24 canaux.

3.2 Choix des équipements -vs- paramètres d'acquisition

La différence entre un 24 canaux et l'échantillonneur Microsis® réside essentiellement dans le taux d'échantillonnage et le nombre de canaux (24 µs et 24 canaux

pour le sismographe 24 canaux, contre 5 µs et 6 canaux pour l'échantillonneur Microsis®). Les deux principes de l'acquisition tomographique deviennent donc:

Mark 6:	$N_x \leq 24$	Microsis®:	$N_x \leq 6$
	$\Delta y > 0{,}465\sqrt{x}$		$\Delta y > 0{,}212\sqrt{x}$
	$N_y = 23$		$N_y = 5$

où N_x est le nombre de cellules dans le sens de la largeur, N_y le nombre de cellules dans le sens de la longueur, Δy l'espacement entre les capteurs et x la largeur de la structure, tel que montré à la figure 3.1.

L'échantillonneur Microsis®, parce qu'il permet de créer des cellules plus petites, est mieux adapté pour l'étude des petites structures (piliers, fondations, murs, etc.). La largeur minimale des structures de béton investiguées par tomographie avec la microsismique devrait toutefois être d'au moins 0,5 mètre.

En conclusion pour des structures de largeur comprise entre 0,5 et 3 mètres, l'utilisation de l'échantillonneur Microsis® est préférable aux autres échantillonneurs 24 canaux. Pour des largeurs comprises entre 3 et 6,5 mètres, les deux systèmes sont à peu près équivalents. Pour des largeurs supérieures à 6,5 mètres, l'utilisation d'un 24 canaux est préférable en raison de son nombre de canaux plus élevé, permettant d'imager plus de cellules horizontales et réduisant de beaucoup le temps d'acquisition.

CHAPITRE 4

ESSAIS DE RÉFRACTION ET DE TOMOGRAPHIE MICROSISMIQUES EN LABORATOIRE

4.1 Essais sur des blocs de béton

Les principes régissant la propagation des ondes en réfraction et en tomographie ont été vérifiés par des essais en laboratoire. Lors de ces essais, l'utilisation de blocs de béton de composition connue a permis de recréer des situations similaires à celles prévues en infrastructure, et de vérifier les méthodes de calcul microsismiques et les principes d'atténuation. Durant ces essais nous avons aussi comparé les résultats de la microsismique à ceux obtenus par ultrason.

4.1.1 But

Le but des essais était de vérifier la précision obtenue sur les arrivées d'ondes "P" et "S" avec différents équipements de lecture (ultrasons et Microsis) et dans différents milieux, soit du bon et moins bon béton. Plus précisément, ces mesures devraient démontrer l'applicabilité de la méthode sismique réfraction en dimensions réduites. Plusieurs doutes ont été soulevés concernant l'arrivée de l'onde "P" au premier capteur. Certains auteurs (Nazarian et al., 1995) prétendent que c'est plutôt l'onde de Rayleigh qui est mesurée, cette méprise a été expliqué par le niveau de gain trop faible. Une partie de ces essais sismiques sur des blocs a eu lieu à l'Université de Sherbrooke, en décembre 1997 et janvier 1998, tandis que les essais sur les dalles de béton, ont été faits en février et mars 1998, chez Géophysique GPR avec le Microsis®, le Soniscope et le Terraloc d'ABEM.

4.1.2 Description des échantillons et de la procédure suivie

Une partie de ces essais sismiques ont été effectués sur 2 blocs de béton préparés à cet effet par le département de génie civil de l'Université de Sherbrooke. Un bloc de 1,4 m x 1 m x 0,5 m était de mauvais béton car il fut coulé sans aucune autre attention de mise en place. Les granulats se sont retrouvés dans le bas du bloc par décantation. Un autre bloc de 2 m x 2 m x 0,75 m était composé de 3 couches superposées de mauvais béton (15 cm), moyen (25 cm) et bon béton (35 cm). Sur ce dernier bloc (bloc multi-couches), les accéléromètres du système d'acquisition Microsis® ont été utilisés pour effectuer un levé par réfraction. Sur le bloc de mauvais béton, les essais ont été effectués avec un Soniscope utilisant deux éléments piézoélectriques (source et récepteur) de 50 kHz. Ces essais nous ont permis de mieux évaluer les techniques hautes fréquences, utilisant un seul capteur. Quatre configurations différentes ont été utilisées pour effectuer ces mesures:

- mesures en mode réfraction (ondes réfractées et directes):
    - en diagonale du bloc

- mesures en mode transmission directe (ondes directes seulement):
    - sur l'arête du bloc
    - en diagonale du bloc
    - du haut vers le bas au milieu du bloc (ligne droite)

4.1.3 Essai en mode réfraction

a) <u>Bloc multi-couches</u>

Les premières mesures ont été effectuées sur le bloc multi-couches avec 6 accéléromètres, tel que montré à la figure 4.1. L'un d'entre eux, placé à 10 cm d'un coin, sert de temps zéro. La source était constituée d'un marteau. Le dispositif a été placé au-dessus du bloc le long de sa diagonale. Seules les premières arrivées ont été analysées

selon les méthodes de sismique réfraction conventionnelles pour confirmer l'applicabilité des méthodes usuelles de calcul en modèle réduit.

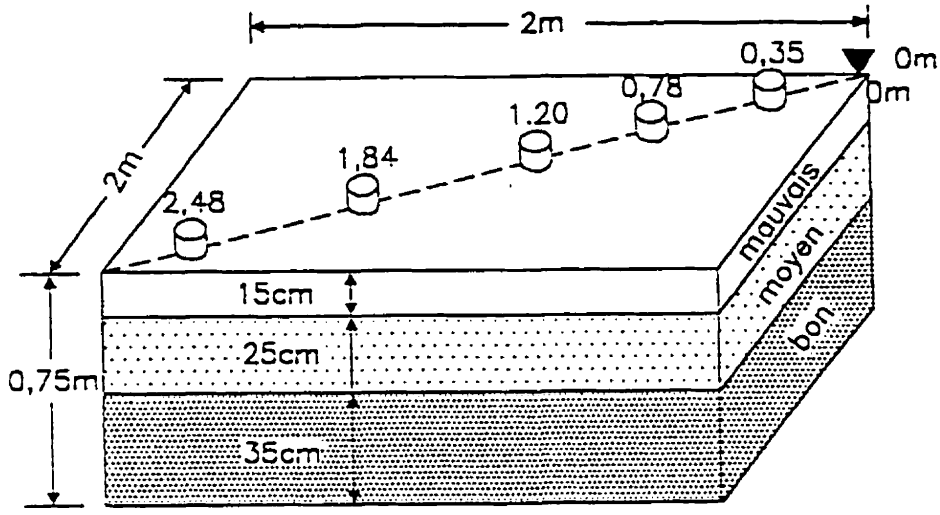


Figure 4.1

Schéma de l'installation pour les mesures sur le bloc multi-couches

Tableau 4.1

Temps d'arrivée -vs- distances des accéléromètres

Accéléromètre	Position (cm)	Tp (µs)
1	35	93
2	77,5	201
3	120	309
4	184	469
5	248	613

En reportant les temps du tableau 4.1 d'arrivées par rapport aux distances sur une dromochronique, on constate deux vitesses de propagation, propres aux milieux ① et ② du bloc investigué. Par calcul de la pente des deux droites, V1 (surface)= 3900 m/s et V2 (plus profond)= 4450 m/s. Ainsi, ces deux vitesses correspondent à celles d'un mauvais béton et d'un béton moyen. (figure 4.2)

Le calcul de la profondeur par la méthode des distances critiques a permis de déterminer l'épaisseur de la première couche, par la formule suivante:

$$Z_1 = Xc_1/2 \,.\, ((V2-V1)/(V2+V1))^{1/2} \qquad \text{(Éq. 4.1)}$$

où: Z_1 : profondeur de la couche
V_1 : vitesse sismique de la couche 1
V_2 : vitesse sismique de la couche 2
Xc_1 : distance critique

En mesurant sur la dromochronique (figure 4.2) Xc = 1,1 m, nous trouvons Z = 14 cm. L'épaisseur réelle de la première couche de mauvais béton était de 15 cm. Cette erreur de 1 cm est en deça de l'erreur expérimentale. Le calcul d'erreur en sismique réfraction peut être assez complexe car il implique l'erreur statistique sur l'estimation de la vitesse. Plusieurs auteurs ont publié sur le sujet (voir par exemple (Hawkins, 1969) et (Palmer, 1980)) et il est généralement accepté de considérer l'erreur sur le calcul de la profondeur à ± 10% (Dion, 1986) donne la précision de la sismique réfraction à ± 5% mais celle-ci n'est vérifié que si on considère 50% des cas. Si on considère un écart type (67%), on obtient 10%).

Par conséquent, l'erreur de 1 cm sur la profondeur réelle de 15 cm représentant une différence de 6,7%, est en deça de l'erreur généralement acceptée en sismique. Pour déterminer les autres couches en profondeur, l'impact aurait dû être éloigné; dans le cas présent, c'était impossible à cause de la dimension limitée du bloc étudié.

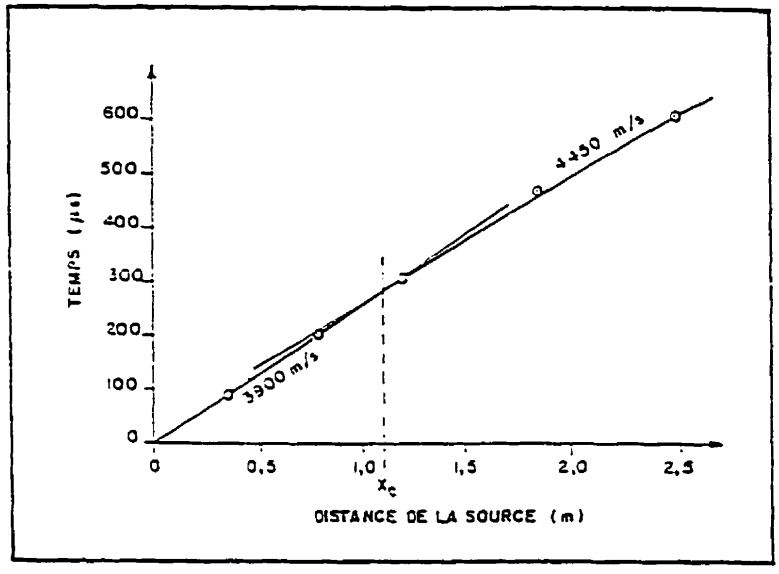


Figure 4.2

Dromochronique

b) Bloc de mauvais béton

Pour la deuxième série de mesures, les essais ont été effectués sur le bloc ayant le plus mauvais béton. Ses dimensions sont de 1,4m x 1m x 0,5m, tel que montré à la figure 4.3. Toutes les mesures prises sur ce bloc ont été faites avec le Soniscope. Sur ce bloc, nous avons effectué une mesure en réfraction et une série d'essais en mode de transmission directe. Durant ces essais, les ondes de compression "P" et les ondes "S" ont été mesurées à l'exception des mesures sur l'arête et en transparence car les arrivées de l'onde "S" n'étaient pas assez claires dans ces deux derniers cas. Les résultats de ces essais de laboratoire sont présentés ci-après aux tableaux 4.2, 4.3, 4.4 et 4.5.

Diagonale en surface

Pour cette configuration, cinq (5) lectures ont été prises avec la source et le récepteur en surface. La source piézoélectrique était placée sur la diagonale à 25 cm d'un coin. Les lectures ont été prises à 30, 60, 80, 100 et 140 cm de la source. Le tableau suivant résume les temps d'arrivée (en μs) et les vitesses de ces fronts d'ondes (en m/s).

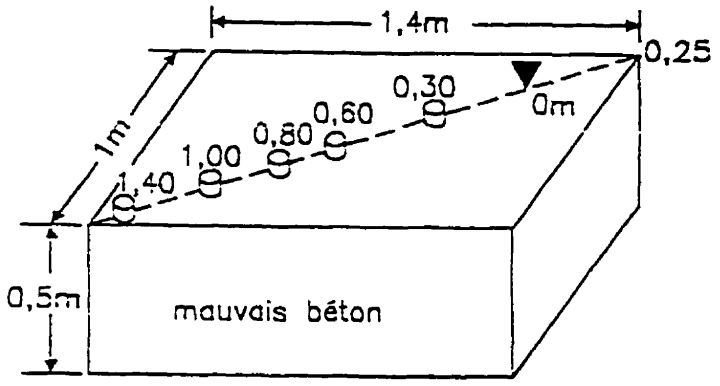


Figure 4.3

Schéma du dispositif sur la diagonale en surface

Tableau 4.2

Résultats des essais sur la diagonale en surface

Distance des points de mesure	Tp (μs)	Vp (m/s)	Ts (μs)	Vs (m/s)
30 cm	98	3060	194	1546
60 cm	186	3255	314	1910
80 cm	236	3389	423	1891
100 cm	295	3389	481	2079
140 cm	406	3448	791	1770

La moyenne des vitesses de l'onde "P" est de 3302 m/s avec un écart-type de 158 m/s.

La moyenne des vitesses de l'onde "S" est de 1839 m/s avec un écart-type de 197 m/s.

On peut considérer que la partie de béton investiguée est composée de deux couches, soit une de vitesse 3 060 m/s et une de 3 500 m/s, et établir par calcul que la première couche a environ 7 à 10 cm d'épaisseur. On constate qu'on n'aura investigué que 10 cm du bloc de mauvais béton après cette première série de lectures. Pour compléter l'information sismique sur le bloc, différents trajets d'onde ont été nécessaires pour définir adéquatement la masse de béton.

4.1.4 Essai en mode transmission directe

a) Arête du bloc

Ce dispositif a été utilisé pour mesurer la vitesse des fronts d'ondes "P" en fonction de l'épaisseur du bloc, tel qu'illustré à la figure 4.4. La source est placée à 10 cm du coin supérieur et les receveurs sont placés le long de l'arête verticale. Les distances indiquées dans le tableau correspondent à celles entre l'émetteur et le récepteur.

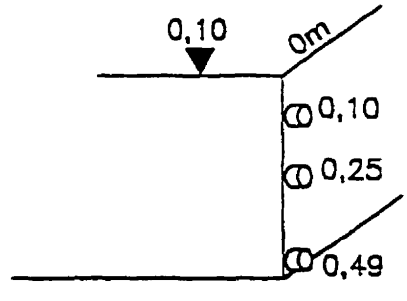


Figure 4.4

Schéma du dispositif sur l'arête du roc

Tableau 4.3

Résultats des essais sur l'arête du bloc

Distance des *points de mesure*	Tp (µs)	Vp (m/s)
14,0 cm	40	3500
26,5	71	3730
50	126	3960

On remarque ainsi que la vitesse de propagation de l'onde "P" augmente avec l'épaisseur. On devra tenir compte de cette nouvelle donnée pour mieux qualifier la masse de béton.

b) Test en diagonale du bloc - 1,6 m de séparation

Ce dispositif a servi à mesurer la vitesse de propagation des ondes "P" et "S" passant au travers du bloc, tel qu'illustré à la figure 4.5. Deux mesures ont été effectuées, une en mettant la source et le receveur près de la surface et l'autre au milieu. Les capteurs ont été disposés horizontalement à 10 cm des arêtes, ce qui donne une distance de séparation entre l'émetteur et le récepteur de 1,61 mètres.

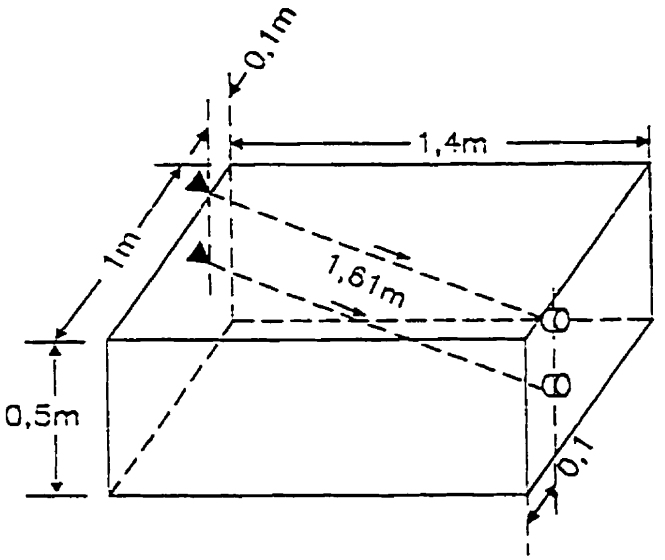


Figure 4.5

Schéma du dispositif pour le test en diagonale du bloc - 1,61 m de séparation

Tableau 4.4

Distance des points de mesure	Tp (µs)	Vp (m/s)	Ts (µs)	Vs(m/s)
0 cm	444	3631	669	2410
25 cm	408	3952	657	2454

Les résultats des essais sur la diagonale du bloc - 1.61 m de séparation, tel qu'indiqué au tableau 4.4 montrent aussi une vitesse plus grande au centre du bloc qu' en surface.

Mesures en transparence (au milieu du bloc)

Six mesures en transparence ont été prises du sommet à la base du bloc avec des séparations de 10 cm entre les lectures, et ceci dans une direction différente de tous les

autres dispositifs, tel qu'indiqué à la figure 4.6. Seules les premières arrivées de l'onde "P" ont été analysées.

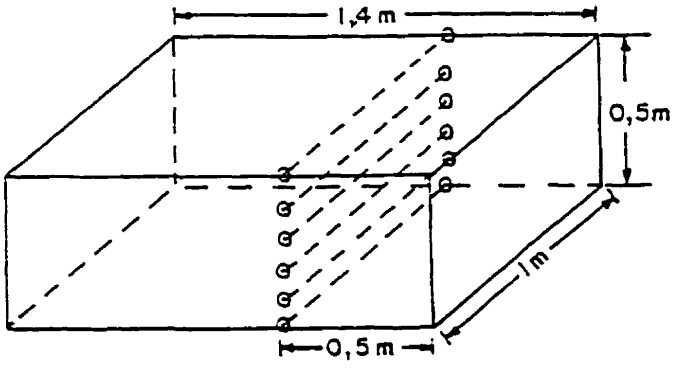


Figure 4.6

Schéma d'installation pour les mesures en transparence (au milieu du bloc)

Tableau 4.5

Distance des points de mesure par rapport au sommet	Tp (µs)	Vp (m/s)
0 cm	271	3708
10	266	3778
20	265	3792
30	258	3875
40	251	3984
50	248	4032

Les résultats des mesures en transparence sont montrés au tableau 4.5. Encore une fois, on obtient une série de valeurs pour finaliser une interprétation.

Les mesures sismiques effectuées sur ce bloc, dit de mauvais béton ont permis de fournir un modèle géophysique simplifié, s'apparentent aux résultats sismiques obtenus. Cette solution se présente sous forme de couches successives d'épaisseur de l'ordre de 10 cm avec des vitesses sismiques croissantes en profondeur, tel que montré à la figure 4.7.

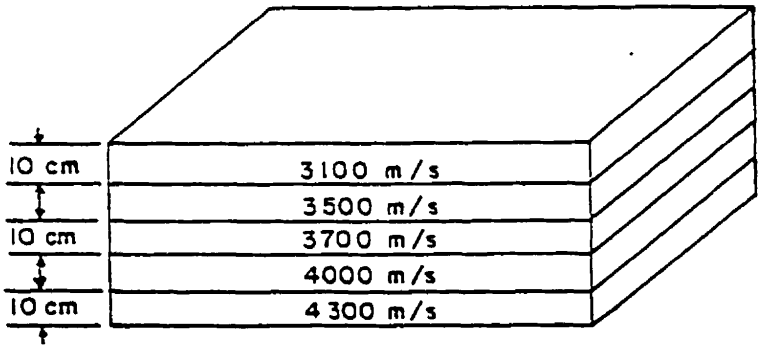


Figure 4.7

Modèle des vitesses sismiques V_p dans le bloc de mauvais béton

Cette interprétation, bien que schématisée, décrit assez bien la réalité du béton en place. En effet, lors du déversement du béton pour fabriquer ce bloc, aucune attention n'a été portée pour permettre une distribution uniforme des agrégats. Il en résulte que les agrégats plus lourds se sont tassés vers le bas, selon les experts de l'Université de Sherbrooke, expliquant ainsi cette croissance des vitesses avec la profondeur. Ce modèle est intéressant en géophysique car il demande un ensemble de patrons de mesures complexes pour permettre une interprétation réaliste. On doit s'attendre aux mêmes types de phénomènes lors des investigations des infrastructures.

4.1.5 Conclusions

Les deux types de tests effectués à l'Université de Sherbrooke ont donné des résultats de bonne qualité. Toutefois, en comparant les deux équipements de mesures, on conclut que l'utilisation de plusieurs canaux montre des avantages marqués. En effet, ils peuvent permettre de réduire le temps d'acquisition d'un facteur bien supérieur au nombre de canaux utilisés.

En effet, on a constaté qu'il est facile de faire des erreurs avec un équipement à un seul canal. Le piquage des arrivées d'un point de lecture à un autre peut-être très difficile. Les erreurs sont surtout causées par le choix d'une arrivée faible, ayant pris un parcourt plus rapide que la moyenne des fronts d'ondes plus énergétiques se propageant à travers la masse de béton. De telle façon, qu'à une distance de 30 à 40 cm de la source, cette arrivée n'a plus assez d'énergie pour être captable, pour que la réfraction soit compatible avec les autres mesures sismiques effectuées durant ces essais, nous devons négliger cette arrivée. L'explication la plus plausible est qu'une faible partie de l'énergie emprunte un trajet bien particulier (d'agrégat en agrégat) principalement, à cause de la haute fréquence du signal. Comme la vitesse sismique du béton est d'environ 3 700 m/sec et que celle des agrégats sera plutôt de 6 000 m/sec, ceci aura pour effet d'augmenter la vitesse sismique du milieu pour de très haute fréquence.

Les techniques de mesure à ultrasons peuvent entraîner des erreurs plus facile à éviter en microsismique. Le type de source est plus adapté au milieu à cause de la plage de fréquences beaucoup plus basse. Aussi le signal subira une atténuation plus faible pour une distance donnée. Ces essais très élaborés à cause de la dimension et de la préparation des blocs de béton par l'Université de Sherbrooke ont démontré la validité de l'utilisation de plusieurs canaux et ont permis d'établir les bases de la méthode microsismique, tout en démontrant sa pertinence. La microsismique nous assure d'être capable de mesurer la même onde d'une fois à l'autre, particulièrement si on pense appliquer la méthode pour l'évaluation à long terme des structures, en étudiant la dégradation des vitesses sismiques "P" et "S".

4.2 Essais sur une dalle de béton

4.2.1 But des essais

Les essais en laboratoire à l'Université de Sherbrooke ont permis d'identifier clairement les arrivées des différents types d'onde et d'établir ainsi la fiabilité de la méthode de mesure et les principes d'interprétation. Ces bancs d'essais avaient des dimensions comparables à certaines infrastructures.

Un autre facteur à considérer est causé par les couches minces comme en sismique conventionnelle. Une dalle de béton de 0,2 m aura une épaisseur d'environ 1/5 de la longueur d'onde émise. Pour mieux comprendre et confirmer ce type de propagation, qu'on peut qualifier de conditions limites, nous avons effectué une série de mesures sur une dalle de béton. Différentes situations ont été créées pour simuler des couches minces. La description de ces essais et les principaux résultats sont présentés dans cette section. De plus, durant ces essais, nous avons effectué une série de mesures pour évaluer précisément le système Microsis® de GPR, et de le comparer à un Terraloc MK-6 d'ABEM.

4.2.2 Description de la procédure suivie

Des essais microsismiques ont été réalisés dans les ateliers de Géophysique GPR International à l'aide du système Microsis®. Le système d'acquisition Microsis (voir annexe A) se compose d'un châssis mécanique supportant les capteurs et les sources. Les capteurs sont reliés à un système informatisé avec une carte d'acquisition et un ordinateur portable permettant l'affichage instantané des données recueillies.

Figure 4.8

Système d'acquisition Microsis® MD-3

Le microsis comprend six accéléromètres, tel que montré à la figure 4.8. Ces derniers peuvent descendre et remonter à l'aide d'un système hydraulique afin d'assurer un meilleur couplage au sol. La source se compose d'une boule d'acier montée sur un piston à air comprimé. Ce dernier produit un impact qui génère un signal sismique dont les fréquences dominantes se situent entre 2 000 et 6 000 Hz. Ce résultat provient de différents essais sur les sources faits chez Géophysique GPR International Inc. par Jean-Luc Arseneault et France Goupil. Le rapport de ces essais sur la source est disponible chez Géophysique GPR.

Les accéléromètres espacés de 0,5 m sont raccordés à un amplificateur à l'aide de câbles coaxiaux. L'amplificateur est ensuite relié à une carte d'acquisition numérique.

Une première série de mesures a été effectuée sur un plancher de béton de 0,16 m d'épaisseur pour différents espacements de la source des capteurs, soit 0,5 m, 1 m, 2 m et 3 m. De façon générale, une dizaine de mesures étaient prises pour chaque espacement. Le but de cette série d'essais était d'évaluer la précision sur la détermination des vitesses.

Une deuxième série de mesures a été effectuée sur une barre en aluminium déposée sur le plancher de béton. Cette barre de 3 m x 0,09 m x 0,04 m était placée directement sous les accéléromètres de façon à modéliser un matériau à deux couches, dont la première couche serait mince et plus rapide que la deuxième. Des essais ont également été faits avec la barre d'aluminium placée sur un isolant, simplement pour établir la vitesse sismique de l'aluminium pour mieux interpréter les résultats.

Pour les deux séries de mesures, la source utilisée était un marteau de 1 livre. Dans le cas des essais directement sur le béton, un marteau expérimental d'onde "S" a également été utilisé dans le cadre d'une étude de validation du système Microsis® MD-3 et confirme la propriété d'inversion de l'onde "S" lorsqu'il y a inversion de la source.

4.2.3 Essais microsismiques directement sur le béton

Les essais effectués afin de déterminer la vitesse de propagation des ondes de compression dans la dalle de béton ont servi, dans un premier temps, à établir la précision et la fiabilité de la méthode. La dalle de béton était un béton de masse "slab" de plancher faiblement armé.

4.2.3.1 Précision

La précision des mesures dépendra de plusieurs facteurs tels la qualité du couplage, les conditions de terrains, les paramètres d'acquisition du système et surtout de l'identification précises des arrivées des ondes "P" et "S". La qualité du couplage et les conditions de terrain étant des facteurs variant avec l'emplacement des levés, il est difficile

d'évaluer correctement l'erreur qui leur est associée. Cependant, il est possible de construire un modèle de calcul d'erreur en considérant les paramètres du système, la distance des capteurs, le temps d'échantillonnage "sampling" et la vitesse sismique du milieu.

4.2.3.2 Fiabilité

Plusieurs mesures ont été effectuées sur le béton afin de déterminer la constance des mesures. En tout, une cinquantaine de mesures ont été réalisées à l'aide de différentes sources mais toujours sur le même béton. Afin de visualiser la répétitivité des résultats, les mesures de la vitesse de propagation des ondes P sont illustrées à l'aide d'un histogramme, figure 4.9.

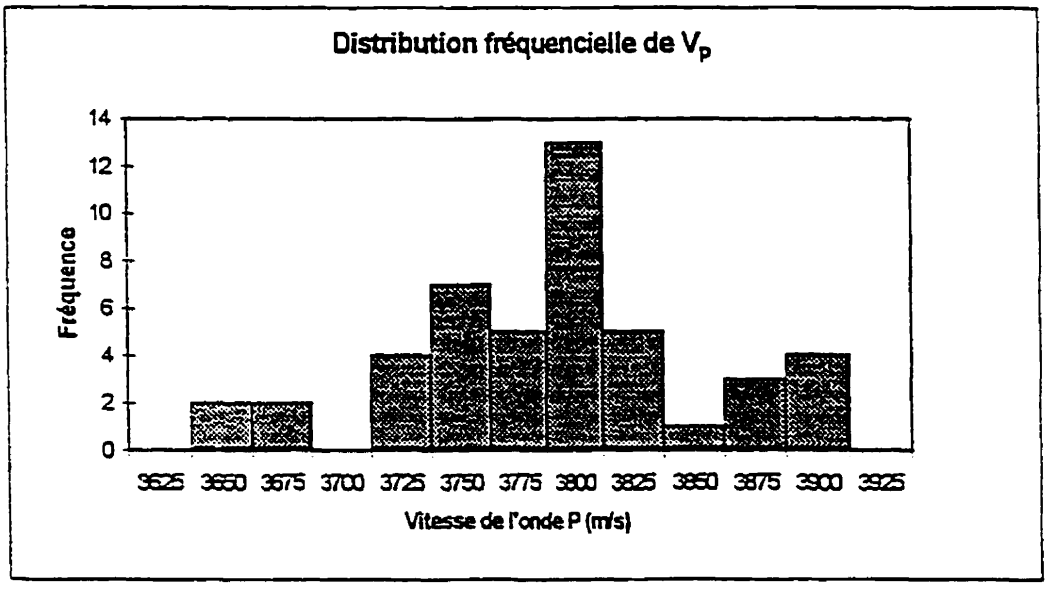


Figure 4.9

Distribution fréquentielle de la vitesse de propagation des ondes P

Le tableau 4.6 présente les mêmes résultats sous forme de statistiques. Il ressort également de ces mesures une bonne indication de la répétitivité puisque le coefficient de

variation (CV) est inférieur à 5%. On remarque également que la différence entre la valeur minimale et la valeur maximale est d'environ 255 m/s et que l'erreur maximale par rapport à la moyenne est de 3,87%.

Tableau 4.6

Statistiques sur les essais effectués sur une dalle de béton avec le MD-3

Moyenne	Écart-type	Valeur min.	Valeur max.	CV
3777,85 m/s	61,81 m/s	3631,58 m/s	3887,09 m/s	1,93 %

Une autre série de mesures, toujours sur le béton, a été réalisée avec le système MD-3 en parallèle avec un sismographe conventionnel de type Mark 6. Le déclenchement du système d'acquisition du Mark 6 se faisait à l'aide d'un contact électrique entre la source et le point d'impact. La figure 4.10 illustre les appareils utilisés lors de ces essais.

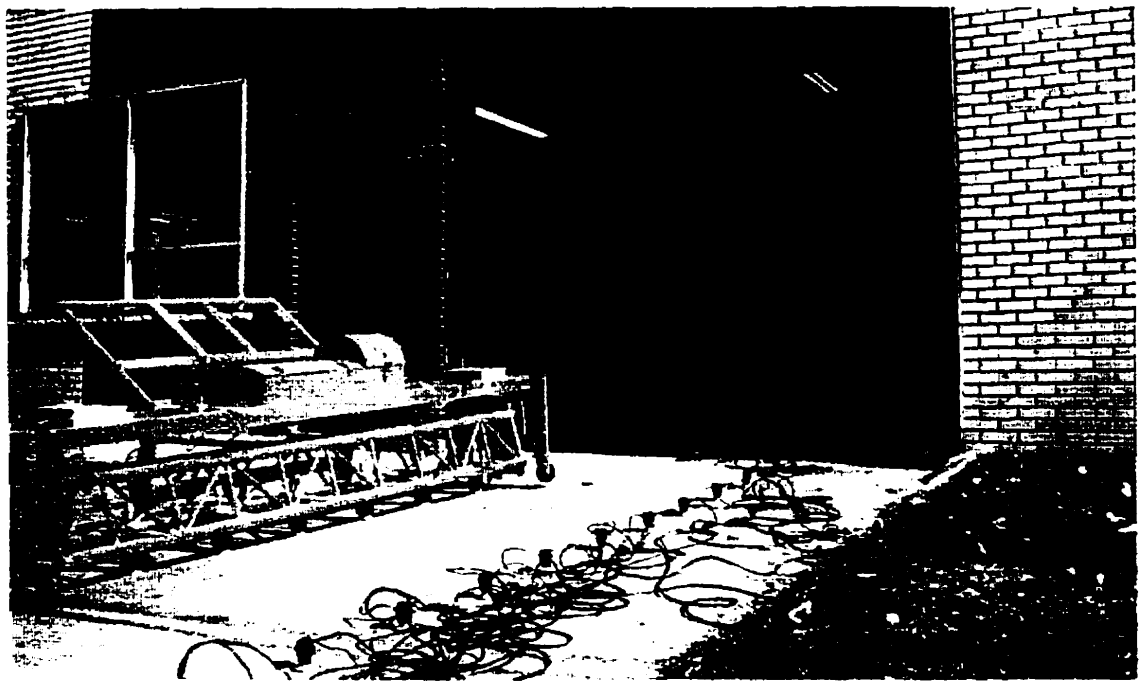


Figure 4.10

Essais avec le système d'acquisition Microsis MD-3 et un sismographe Mark 6

Une dizaine de mesures ont été prises pour chacun des systèmes d'acquisition à un endroit marqué sur le béton. Les statistiques des essais sont résumées au tableau 4.7.

Tableau 4.7

Statistiques des essais avec le MD-3 et le Mark 6

	Système d'acquisition Microsis MD-3	Sismographe Terraloc Mark 6
Moyenne	3789,34 m/s	3321,42 m/s
Écart-type	22,87 m/s	237,75 m/s
Coefficient de variation	0,60%	7,15%

Bien que la vitesse de l'onde P ne soit pas la même pour les deux systèmes, on peut tout de même constater que le Mark 6 présente un plus grand coefficient de variation que celui du MD 3. Ceci peut s'expliquer par un temps d'échantillonnage plus élevé pour le Mark 6, soit 25 µs comparativement à 5 µs pour le MD-3. Quant à la différence entre les vitesses moyennes, elle peut s'expliquer par la différence de longueur des levés pour les deux systèmes. Le Mark 6 qui investigué sur une longueur de 6 m, comparativement ; à 2,5 m pour le MD-3, détecte des anomalies que le MD-3 ne peut distinguer, ce qui résulte en une vitesse de propagation plus faible pour le Mark 6. La figure 4.10 montre ce dispositif. Il est important de mentionner que cette différence de vitesse importe peu puisque le but de ces essais particuliers était de vérifier la fiabilité des mesures et non la précision.

La vitesse de l'onde "P" de la dalle de béton se situe autour de 3750 m/s alors que la vitesse de l'onde "S" se situe aux environs de 2200 m/s. Ces vitesses serviront de référence pour les essais suivants visant à déterminer les différents types de propagation dans le milieu concerné.

4.2.4 Essais microsismiques sur couches minces

D'autres essais ont été effectués afin de déterminer s'il est possible d'identifier (sur le même enregistrement) la vitesse de propagation d'une couche de béton sous-jacente à une couche caractérisée par une vitesse de propagation plus rapide. Afin de modéliser cette situation, une barre en aluminium déposée sur le béton a été utilisée afin de représenter la couche supérieure. Différentes sources ont été utilisées à des distances variables des capteurs, notamment une bille d'acier, un marteau (1 lb) et un poinçon. L'impact s'effectue sur le béton.

Après plusieurs essais, il ressort des résultats que pour des impacts situés près des capteurs (~0,5 m), le signal ne permet pas de distinguer l'onde "P" du béton de l'onde "S" de l'aluminium. Cependant, l'onde "P" de l'aluminium ressort de façon claire et sa vitesse se situe aux alentours de 5200 m/s. Pour des impacts éloignés des capteurs (~2 m), le signal de l'aluminium apparaît plus atténué, permettant ainsi de distinguer l'onde "P" du béton puisque l'onde "P" de l'aluminium est affaiblie. La vitesse de propagation de l'onde "P" du béton se situe aux alentours de 3750 m/s, ce qui correspond à la vitesse calculée lors des premiers essais effectués directement sur le béton. L'identification des vitesses de propagation dans le béton et dans l'aluminium est donc possible sur un même enregistrement si la distance de tir et les gains sont bien choisis. Les essais les plus concluants à ce sujet ont été obtenus avec le dispositif illustré à la figure 4.11.

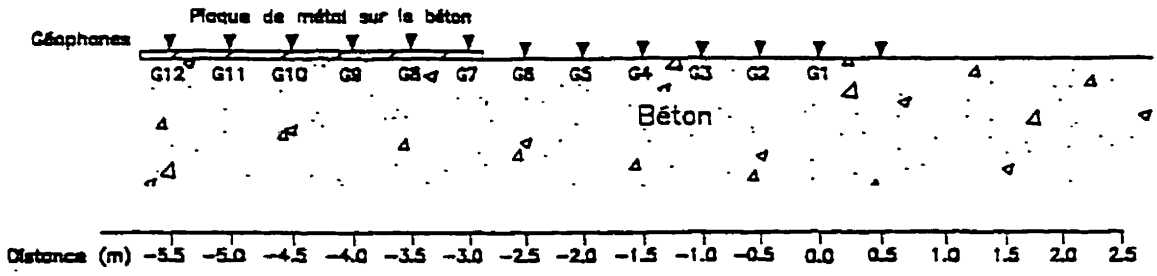


Figure 4.11

Dispositif de mesure d'essais

Nous avons utilisé 12 canaux dont six capteurs étaient en contact direct sur le béton et six autres étaient couplés à la barre de métal. La différence de vitesse est ainsi facile à voir sur un même enregistrement. Plusieurs essais ont été réalisés avec la source à différents endroits et nous montrons aux figures 4.12 a), 4.12 b) et 4.12 c), des exemples d'enregistrement.

Sur tous ces exemples, un jeu adéquat de gains permet de voir les deux arrivées simultanément, mais une est faible par rapport à l'autre (tel qu'illustré sur ces exemples; il est parfois nécessaire de saturer le signal de l'arrivée de l'onde dans le béton pour mettre en évidence l'onde ayant voyagé dans l'aluminium). On voit ici l'importance des gains: trop élevés, ils risquent de cacher l'arrivée qui nous intéresse car l'équipement peut amplifier une onde plus faible provenant d'une armature, ce que cet essai avait pour but de démontrer.

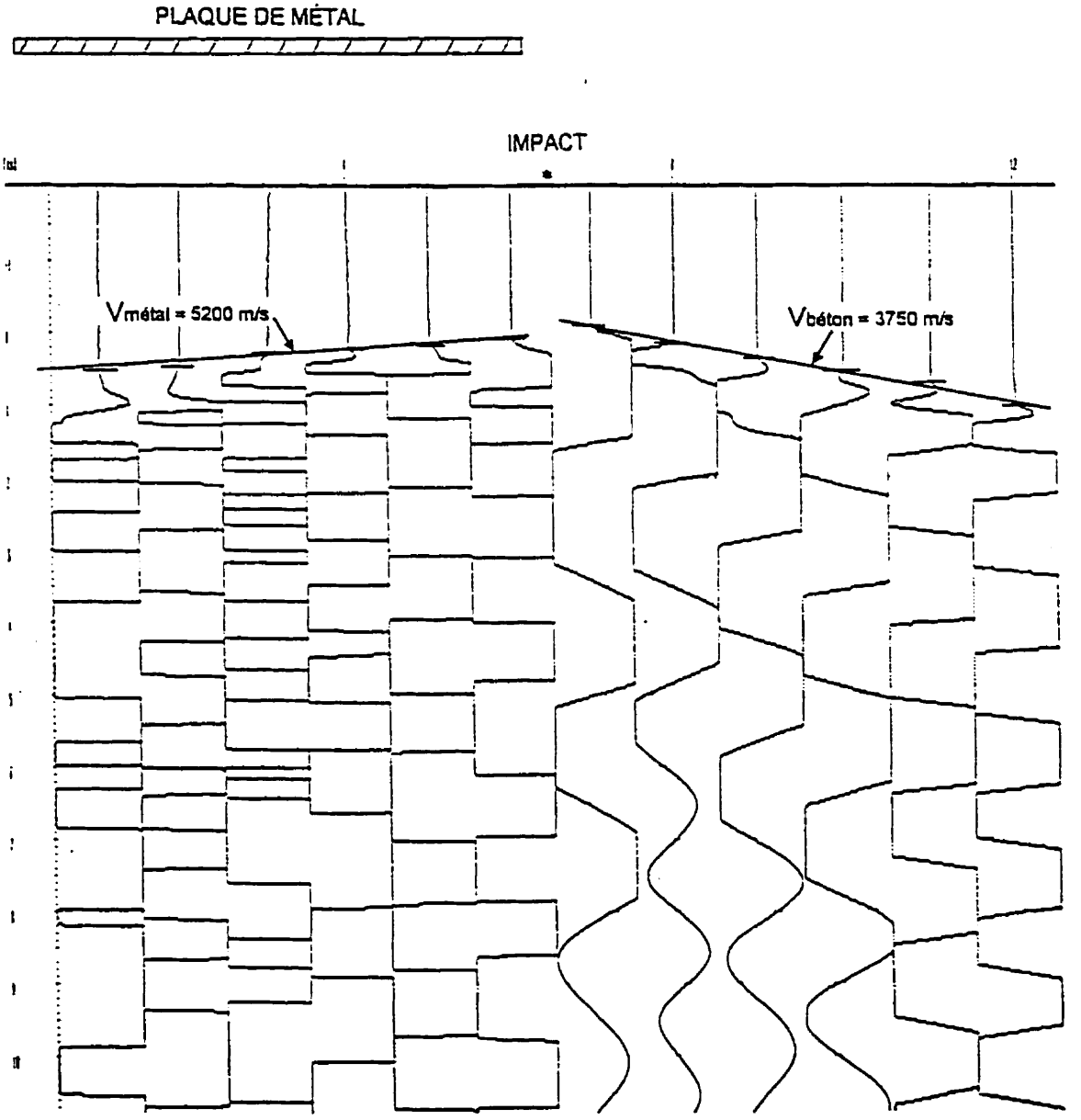


FIGURE 4.12 a)

Enregistrement avec source d'impact au centre et gain saturé

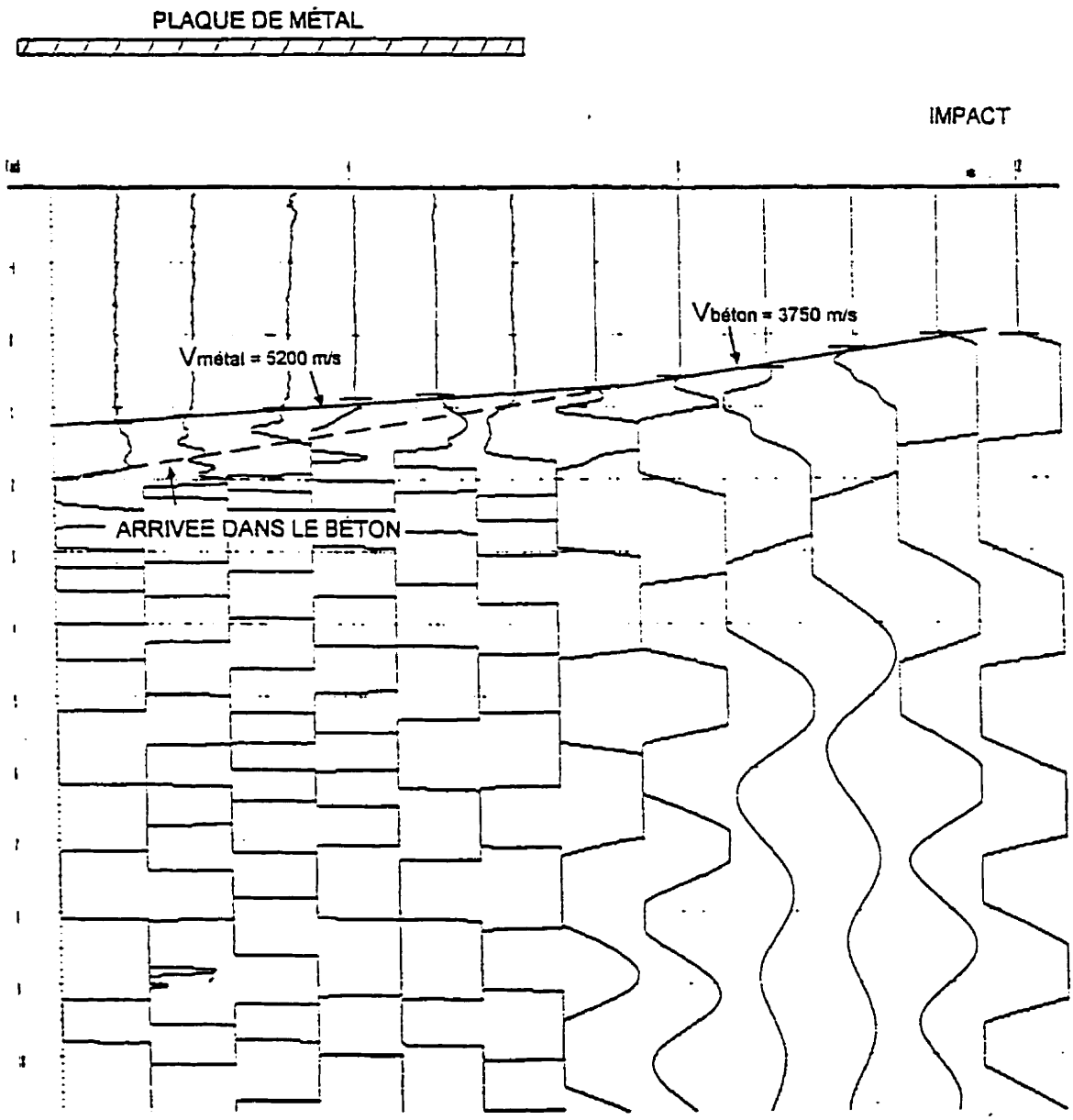


FIGURE 4.12 b)

Enregistrement avec source d'impact à une extrémité et gain saturé

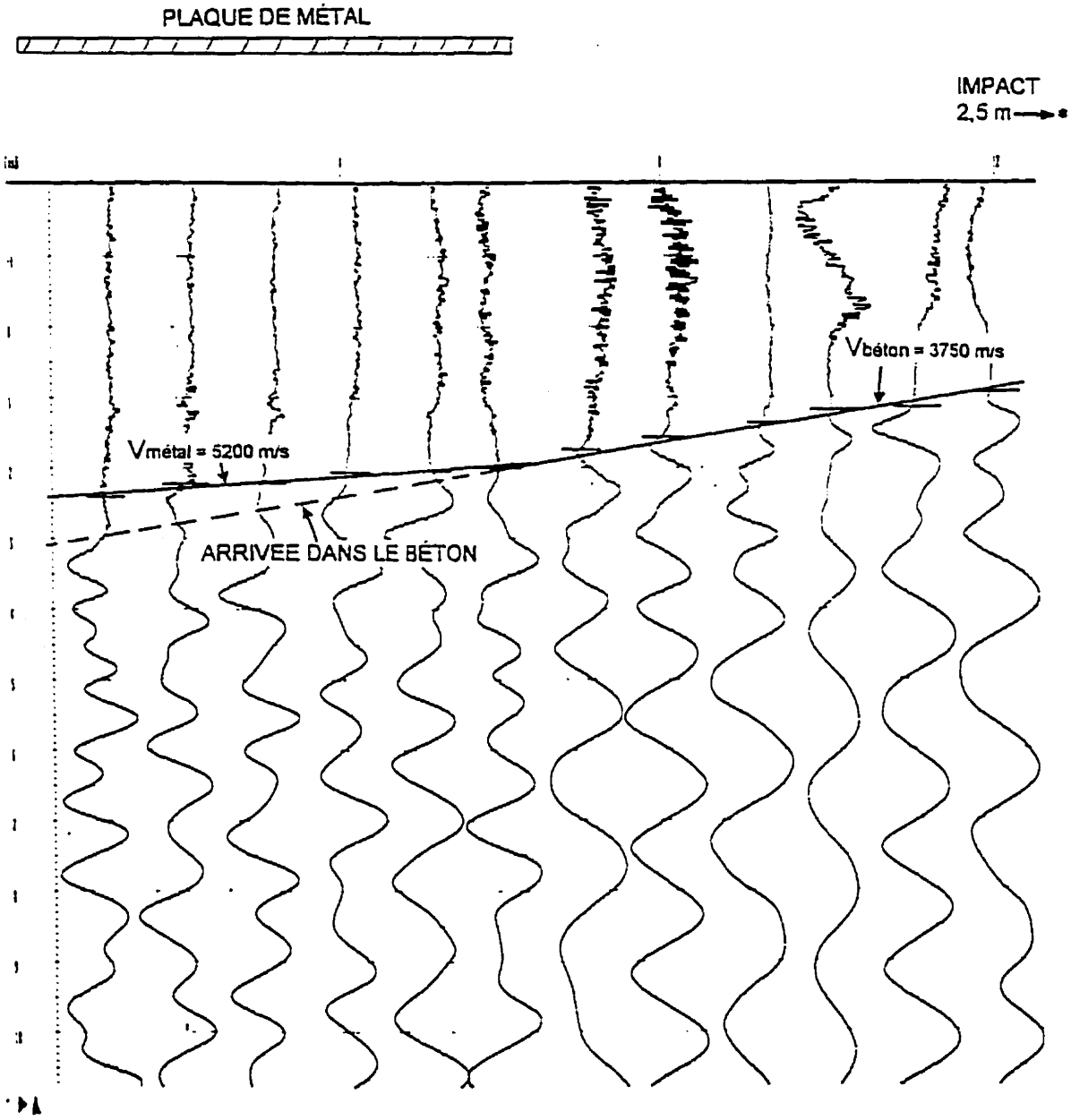


FIGURE 4.12 c)

Enregistrement avec source d'impact éloignée de 2,5 mètres et gain non-saturé

Ainsi, l'onde directe dans le béton sera transmise à l'aluminium et le point récepteur/source, au début de la tige d'aluminium émettra à son tour une autre onde "P" qui se propagera dans l'aluminium. Le point source au début de la tige aura été générée par l'onde directe passant dans le béton. Cette onde continuera son chemin et, à chaque point le long de l'aluminium, on pourra la reconnaître par le même principe. Pour ce faire, on éliminera l'onde "P" dans l'aluminium qui devancera l'onde se propageant dans le béton. De plus, nos expériences ont confirmé que l'énergie se propageant dans l'aluminium sous forme d'onde "P" sera beaucoup plus faible que celle se propageant dans le béton facilitant ainsi l'identification du bon train d'onde.

Les essais effectués montrent la capacité de la méthode microsismique à détecter une onde sismique se propageant dans le béton même si ce dernier possède des armatures en acier. En effet, l'onde pourra traverser les armatures sans être détectée par les capteurs si les gains de l'appareil sont correctement ajustés, éliminant ainsi les ondes non représentatives de la qualité du béton. Cette particularité est propre à la méthode développée grace à l'emploie de fréquences appropriées aux dimensions étudiées.

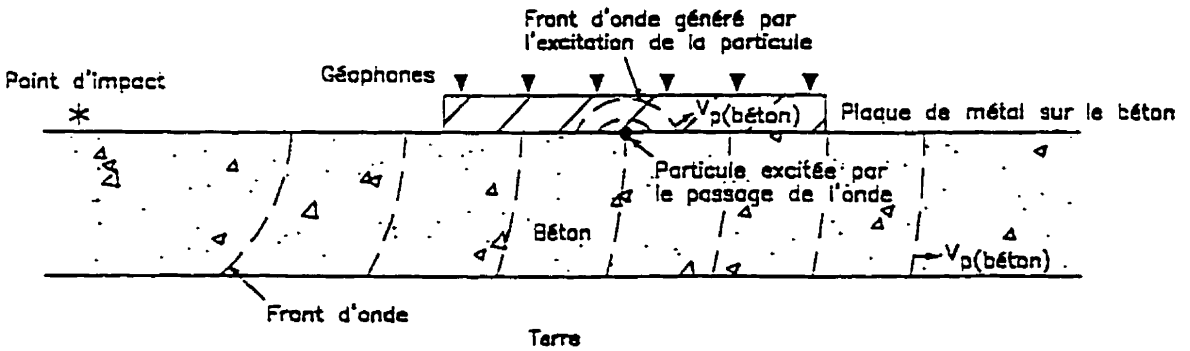


Figure 4.13

Détection des ondes voyageant dans le béton par des capteurs posés sur une barre d'aluminium

CHAPITRE 5
APPLICATIONS
DE LA MÉTHODE MICROSISMIQUE

5.1 Méthodes de mesure

Les principes utilisés, en microsismique tant pour l'interprétation que pour l'acquisition, sont les mêmes que pour les méthodes conventionnelles, ce qui a été établi par les modèles numériques et vérifié par plusieurs essais en laboratoire sur des bancs d'essais. Dans ce chapitre nous nous attarderons principalement sur les particularités de son application aux infrastructures civils. Nous analyserons les problèmes sismiques les plus susceptibles d'être rencontrés.

5.1.1 Microsismique réfraction

5.1.1.1 Principe de base

Durant ce projet, nous avons validé les principes de base de la transmission des ondes sismiques, à l'aide des essais faits sur les modèles réduits. Dans un premier temps, il s'agissait de démontrer que l'onde "P" de compression était bien celle détectée par les capteurs même si ces derniers sont surtout sensibles au déplacement vertical. Les essais en laboratoire ont confirmé que c'est l'onde "P" qui arrive la première, suivie de l'onde "S" et de l'onde de Rayleigh.

Le fait que les capteurs verticaux puissent détecter le déplacement horizontal dû au passage de l'onde P dans une première couche s'explique par le principe de Huygens; principe bien connu dans le domaine de la physique des ondes. Dans un milieu homogène, une onde se propage à partir d'une source ponctuelle sous forme de sphère en expansion.

Le principe de Huygens stipule que chaque point d'un front d'onde est la source ponctuelle d'un nouveau front d'onde qui se propagera donc également sous forme de sphère en expansion. Ainsi, au point de contact d'un capteur vertical, un front d'onde sphérique sera également généré ayant donc une composante verticale détectable par le capteur.

Durant les essais effectués en laboratoire, il est ressorti qu'une attention spéciale doit être portée à l'amplitude et la fréquence de l'onde lors de l'identification des arrivées. On doit aussi considérer la polarisation et les changements de phase le cas échéant.

Dans le béton, qui est un milieu hétérogène, on rencontrera différents trains d'ondes, soit des arrivées provenant du béton ou d'autres milieux transmetteurs comme les aciers d'armature ou d'un horizon réfracteur. L'amplitude de l'onde servira aussi à la caractériser. En effet, comme l'amplitude (A) peut être représentée par l'équation suivante:

$$A = \sqrt{\frac{\lambda^2 I}{2 \pi^2 \rho V}} \quad \textit{(NBS Technical Note } 1199) \qquad \text{(Éq. 5.1)}$$

où:
- I : l'intensité acoustique par unité de surface
- λ : la longueur d'onde
- ρ : la densité du milieu
- V: la vitesse sismique du milieu

et que, l'énergie transmise d'un milieu à un autre encaissé sera proportionnelle à la surface de réception de ce dernier. Si on considère l'énergie d'un train d'ondes sur une surface donnée, cette énergie sera plus grande que celle transmissible à l'acier . L'onde ainsi de l'acier sera donc caractérisée par une faible amplitude. Une attention spéciale doit être portée à cette caractéristique pour éviter des sources d'erreurs courantes. Si on utilise un seul capteur, cette vérification devient bien complexe considérant la variabilité de la source.

5.1.1.2 Application aux cas de 1 et 2 couches

Pour capter l'onde de compression d'une seule couche et en mesurer la vitesse de propagation, le principe est simple. En effet, si la position des capteurs est connue, il reste à mesurer le temps d'arrivée de l'onde avec une précision adéquate, tel que montré à la figure 5.1 La précision de lecture sur cette vitesse sismique dépend du pas d'échantillonnage du système d'acquisition.

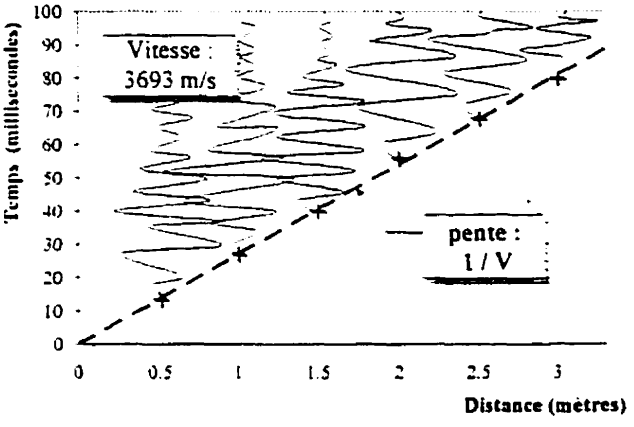


Figure 5.1

Exemple-type d'un enregistrement mesurant la vitesse sismique des premières arrivées dans le béton

Dans le cas du Microsis MD-3 de Géophysique GPR International Inc., le pas d'échantillonnage est de 5 µs. Pour un parcours (ou trajet) d'un mètre dans un béton dont la vitesse est de 3 500 m/s, le temps requis de parcours de l'onde sera de 285 µs. En tenant compte du pas d'échantillonnage de 5 µs, on aura donc une erreur de 3,5% sur la détermination de la vitesse. Sur une distance d'un demi mètre, cette erreur sera de 7%. Cette relation est mieux représenté à la figure 5.2.

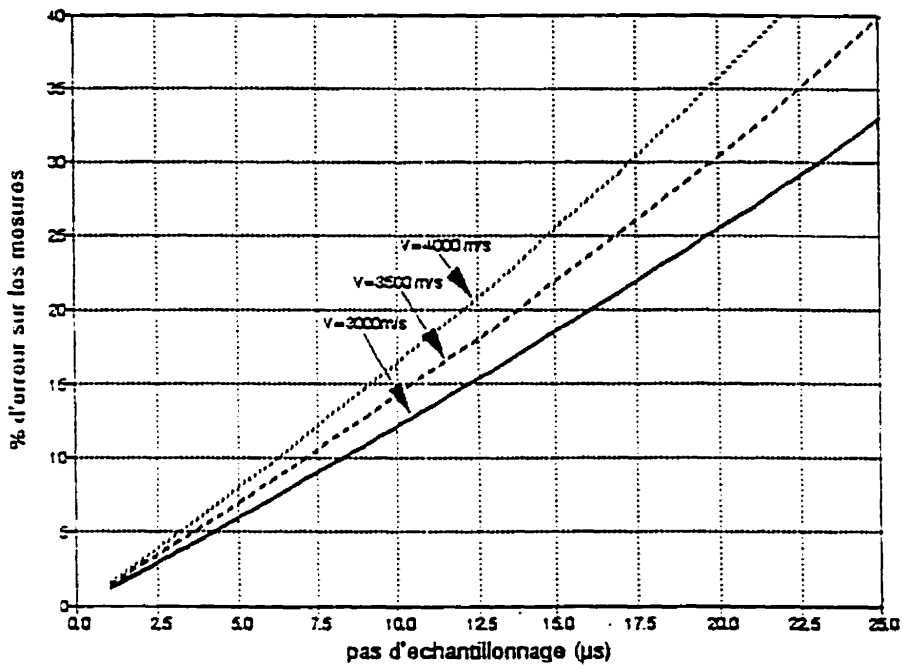


Figure 5.2

Erreur en fonction du pas d'échantillonnage (capteurs distants de 0,5m)

Dans le cas d'une couche, on aura une onde directe et les principes d'interprétation de mesure de vitesses seront donc simples étant donné la précision des paramètres fixés. Dans le cas de deux couches, la détermination des vitesses sismiques est plus complexe. Il y aura réfraction si la vitesse du milieu ① est inférieure à celle du milieu ②. C'est ce qu'on risque de rencontrer dans la plupart des constructions de ponts et de routes en béton recouverts d'une couche d'asphalte. On devra également se servir de la réfraction pour déterminer l'épaisseur détériorée du béton. Selon les mesures que nous avons effectuées,

l'asphalte conduit le son à une vitesse entre 700 et 2900 m/s, généralement plus faible que celle du béton sain. Ce contraste de vitesse provoquera donc une réfraction venant du béton sain, tel que montré sur la dromochronique de la figure 5.3.

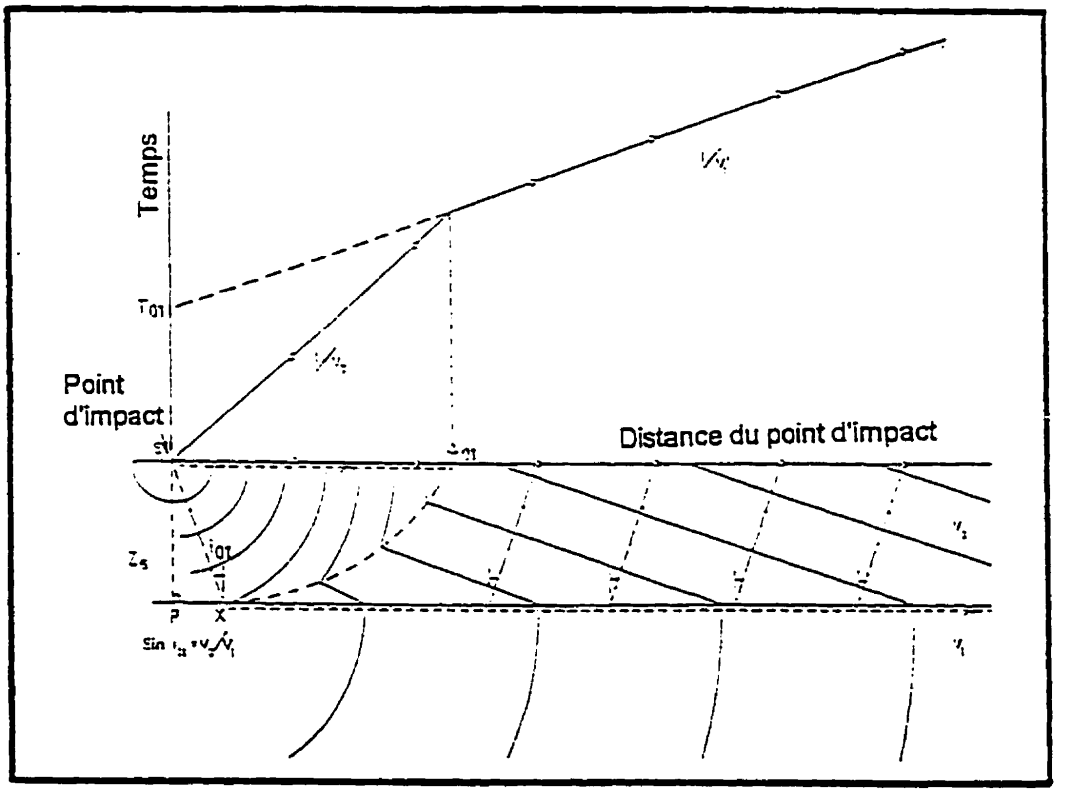


Figure 5.3

Dromochronique d'un milieu à deux couches
(Hawkins, 1969)

De l'équation 4.1, on peut déterminer à quel endroit l'onde directe sera rejointe par l'onde réfractée. Il est primordial de déterminer cette distance critique sur chaque site par un ensemble de tirs éloignés du dispositif afin de s'assurer d'enregistrer le signal recherché. On peut aussi étudier la vitesse, l'amplitude et la fréquence de l'onde pour identifier son trajet et l'associer à un milieu de propagation spécifique.

Toutefois la réfraction fournit de l'information sur les couches subséquentes à condition d'initier des signaux sismiques de directions inverses, (de part et d'autre du dispositif), pour obtenir la vitesse vraie du milieu ② par l'équation suivante:

$$Vr = \frac{2V_1 \; V_2}{V_1 + V_2} \qquad (Hawkins, 1969) \qquad \text{(Éq. 5.2)}$$

ou : Vr : Vitesse réelle du matériau réfracteur
V_1 : Vitesse du tir direct
V_2 : Vitesse du tir inverse

La couche d'asphalte sera détectée que sur une courte distance le long du dispositif, soit sur environ 3 à 6 fois son épaisseur selon le contraste de vitesses entre cette dernière et le béton. Comme cette couche est généralement de l'ordre de 10 cm, déjà à partir du premier capteur situé à 0,5 mètre de la source, la première arrivée sera généralement une onde réfractée. En effet, selon la méthode de la distance critique donné, équation 4.1 on a :

$$Z_1 = Xc_1/2 \, . \, ((V2-V1)/(V2+V1))^{1/2}$$

Cette distance critique diminuera si Z1 et/ou V1 diminue.

On pourrait utiliser la microsismique pour déterminer la vitesse sismique et l'épaisseur de l'asphalte, mais la distance entre chaque capteur devrait être réduite de façon à avoir au moins deux capteurs à moins de 0,5 m de la source de façon à pouvoir tracer une droite assez précise représentant la vitesse sismique de l'asphalte. On perdrait de la précision pour déterminer la vitesse dans la deuxième couche, mais peu sur l'épaisseur des couches qui serait déterminée avec une précision de l'ordre de 10%. Cette information peut servir à calibrer les techniques de réflexion, telles que le géoradar et

l'impact écho, qui ne fournissent pas la vitesse du milieu mais seulement le temps aller-retour.

5.1.2 Tomographie sismique

La tomographie sismique pour l'évaluation des structures peut souvent se faire avant et après les injections de béton, d'où son grand intérêt pour évaluer la qualité des réparations. Cette méthode peut s'appliquer aux structures de béton ou en terre. Dans le cas des structures en terre, on utilisera plutôt les ondes de cisaillement, en particulier si les matériaux se trouvent sous la nappe d'eau. L'onde "S" présente plusieurs avantages (plus lente, plus forte) et correspond mieux à la géotechnique.

Le terme "tomographie" vient du grec "tomê" et "graphein", qui signifie une section graphique, laquelle peut être produite sur une tranche du sous-sol ou d'une structure. Cette technique de mesure, lorsqu'utilisée pour imager la distribution spatiale des vitesses sismiques, est basée sur les premières arrivées des ondes entre un point source et un point récepteur. Généralement, on aura de 6 à 24 points de réception. Les temps d'arrivée à chaque point de lecture peuvent être définis par la relation:

$$t_i = \sum_{jk} (L_{ijk}/V_{jk}) \qquad \text{(Éq. 5.3)}$$

où la longueur L_{ijk} est la longueur du $i^{ième}$ trajet d'onde dans la cellule jk, dont la vitesse sismique V_{jk}.

Les traitements des données utilisent un algorithme d'inversion permettant d'attribuer à chaque pixel une vitesse sismique de façon à s'approcher le plus possible du temps d'arrivée mesuré.

La valeur RMS ("root-mean-square") sur les temps d'arrivée résiduels peut servir à évaluer jusqu'à quel point les valeurs du tomogramme concordent avec les valeurs mesurées. Comme la tomographie vise à associer précisément les valeurs observées aux

valeurs calculées, plus la valeur du facteur de qualité sera faible, plus le tomogramme devrait être représentatif.

$$FQ = \frac{\sum Tr_i}{\sum Ta_i} \times 100\%$$

ou : FQ : Facteur de qualité

Tr_i : Temps résiduel après interaction au capteur $_i$

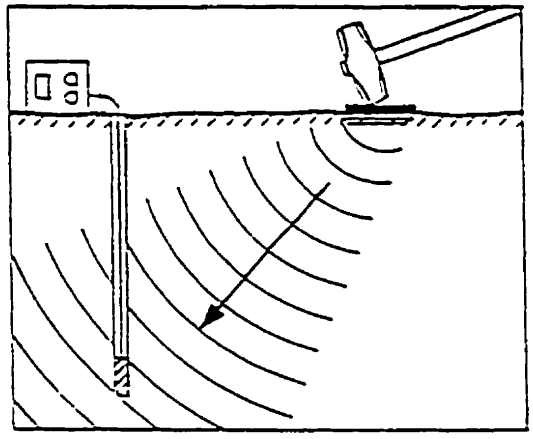
Ta_i : Temps d'arrivée au capteur $_i$

Toutefois, le facteur de qualité même très bas ne garantit aucunement que le tomogramme modèle résultant de l'inversion soit valide. En effet, le problème d'inversion est souvent sous déterminé, (c'est-à-dire qu'il y a plus d'inconnus que d'équations à résoudre) et par conséquent, la solution "proposée" n'est pas nécessairement unique.

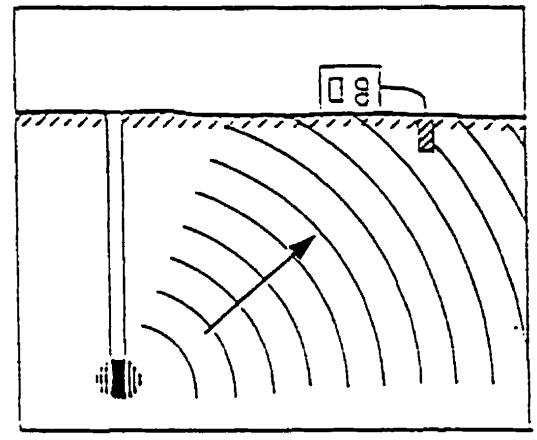
Une autre façon d'évaluer la justesse d'un tomogramme, est de comparer les valeurs des vitesses obtenus par "crosshole" standard et celles obtenues par tomographie. Un levé "crosshole" standard consiste à mesurer simplement la vitesse de propagation de l'onde acoustique entre une source et un capteur placés à la même élévation. La différence entre cette vitesse et la vitesse moyenne compilée à la même élévation à partir du tomogramme permet d'évaluer l'erreur sur ce dernier, mais il faut toutefois tenir compte de l'hétérogénéité du milieux qui dans certains cas, pourra influencer le trajet de l'onde.

Plusieurs façons d'acquérir les données tomographiques sont montrées à la figure 5.4. Ces multiples façons d'acquisition deviennent intéressantes dans l'évaluation des infrastructures. Ces dernières comprennent toutes des particularités physiques qui demandent de la souplesse dans l'acquisition des données. Nous ne recommandons pas de porter un poids trop important aux données dépassant un angle de 45° entre la source et la réception particulièrement à cause que :

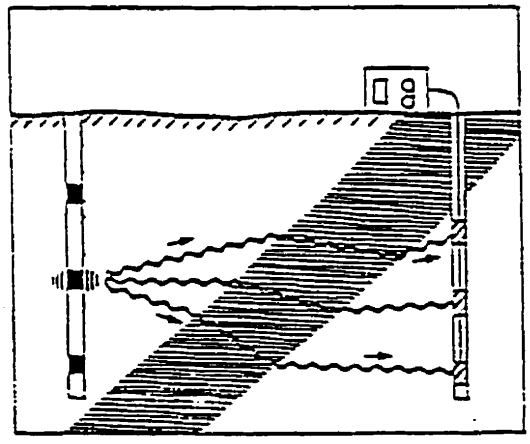
- la densité des rayons possédant une énergie significative est plus importante près de la source,
- si la première arrivée est prise comme lecture, les arrivées éloignées de la source auront une énergie plus faible qui se reflétera comme un retard (Jackson et Tweeton, 1994).



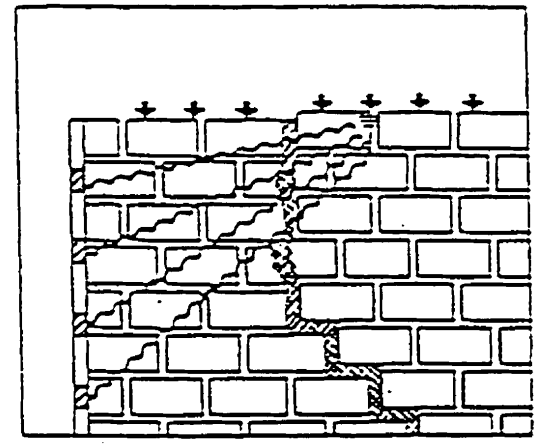
Méthode "downhole"



Méthode "uphole"



Méthode "crosshole"



Contrôle de la qualité de brique massive ou de structures en béton

Figure 5.4

Différents modes d'acquisition de données

Le niveau de détection des anomalies par tomographie dépend de la dimension du défaut, du pas d'échantillonnage de l'équipement, de la position du défaut dans l'espace, de sa vitesse sismique, et de celle du milieu encaissant. Si l'objet est près d'un capteur ou de la source, forçant le trajet de l'onde à passer à travers l'anomalie pour rejoindre le capteur, elle sera plus facilement détectable. Le cas le plus difficile est celui d'une anomalie au centre de la tranche investiguée tel qu'illustré à la figure 5.5.

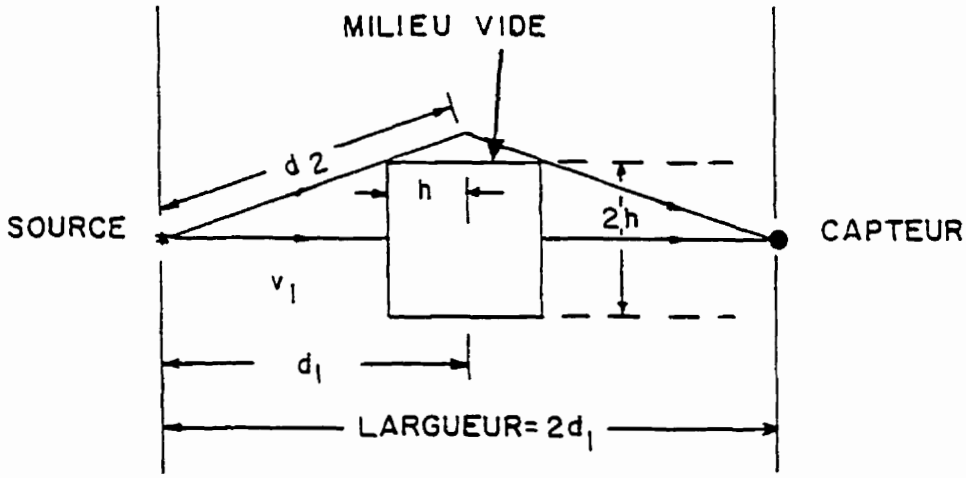


Figure 5.5

Anomalie au centre de la tranche investiguée

Par exemple, se référant à la figure 5.5, pour trouver la dimension minimale d'une anomalie causé par une cavité, on peut utiliser la relation suivante:

$$\frac{2\,d_2 - 2\,d_1}{v_1} \geq \text{pas d'échantillonnage}$$

Ainsi, pour un bloc de 2 mètres et un pas d'échantillonnage de 5 µs, le plus petit vide détectable sera 0,25 m x 0,25 m. Dans le cas d'une structure de 10 mètres, cette anomalie sera de 0,55 m x 0,55 m, si la vitesse du milieu encaissant est de 3 000 m/s. Pour un pas d'échantillonnage de 25 µs, ces anomalies seront respectivement de 0,46 m x 0,46 m et 1,23 m x 1,23 m . On constate facilement les avantages de la microsismique pour des applications de la sismique aux infrastructures.

Les calculs d'inversion de tomographie se font sur ordinateurs à l'aide de logiciels qui traitent les données en 2 ou 3 dimensions. L'imagerie est souvent basé sur l'algorithme SIRT. Certains logiciels permettent d'imposer des limites sur les vitesses sismiques. Ces informations supplémentaires peuvent provenir d'informations géologique ou géophysique et ont pour effet de réduire le nombre de solutions possibles.

Un nombre de trajets équivalent au nombre de pixels prévus est préférable pour obtenir des résultats en 3D comme en 2D. Le 3D nécessitera un nombre de trajets important, parfois même impossible à obtenir sur un site à investiguer, tel un barrage, mais peut s'effectuer avantageusement sur un pilier de pont, par exemple.

5.2 Autres particularitées de la méthode microsismique

5.2.1 Effet des armatures

Les considérations précédentes permettent de croire que la quantité d'énergie transportée par un acier d'armature sera faible par rapport au reste du signal, et l'onde sera plus rapide (vitesse du son dans l'acier 5 900 m/s) et de haute fréquence. Le spectre de fréquence plus élevé dans ce cas-ci peut être expliqué par un effet de guide d'onde. Le principe de guide d'onde est bien connu en physique ondulatoire et s'applique aussi bien aux ondes électromagnétiques qu'aux ondes acoustiques. La propagation des ondes dans un guide d'onde est telle que les longueurs d'onde supérieures aux dimensions du milieu

seront très rapidement atténuées alors que les longueurs d'onde plus courtes pourront se propager avec très peu d'atténuation.

Une attention toute spéciale doit être portée à cette énergie en provenance de l'acier pour ne pas interpréter de fausses arrivées qui ne seraient pas relatives au béton, mais à l'acier. Toutefois, cette propriété pourrait être exploitée pour évaluer par phénomène acoustique le contact entre l'acier et le béton. Il s'agirait alors d'émettre sur l'acier et d'enregistrer au-dessus l'amplitude de l'onde transmise à la surface. Un ensemble de mesures systématiques permettrait de qualifier l'état du contact de l'acier avec le béton.

5.2.2 Sources microsismiques

Les sources les plus adaptées en microsismique s'approchent de l'impulsion. Les différents essais effectués chez Géophysique GPR ont montré que les meilleures sources sismiques pour le genre d'investigation visée étaient celles provenant d'un impact rapide. Pour le Microsis®, la force de cet impact correspond à celle d'une bille de 2 cm de diamètre, pesant 50 grammes et tombant de 1,5 mètre. Son contenu en fréquences atteint 14 kHz, mais le maximum d'énergie se situe entre 2 kHz et 6 kHz, ce qui est fort avantageux pour l'échantillonnage des dimensions visées.

Le déclenchement du système de mesure doit être précis à au moins 1/10 de son pas d'échantillonnage (COSMA, 1988). Le temps zéro est déterminé à l'aide d'un accéléromètre placé près de la source. Il est préférable d'enregistrer sur une trace son déclenchement pour s'assurer que le système d'initiation soit toujours déclenché au même temps relatif d'un tir à l'autre. Un autre type de déclencheur peut être utilisé, soit par contact électrique entre une plaque d'acier au sol et le piston-source.

D'autres sources doivent être utilisées pour des travaux entre les forages, tel un impulseur (boomer). Le déclenchement se fait suite à une impulsion électrique transmise

simultanément à l'équipement. Les sources conventionnelles génératrices d'onde "S" serait adoptables pour des applications en infrastructure.

5.2.3 Effet de la couche d'asphalte et de la détérioration de la surface

La couche d'asphalte ou de béton détériorée devra être considéré comme un cas de deux couches. Il y aura une réfraction d'onde sur la couche inférieure, dans les cas où celle-ci conduit le son plus rapidement que la couche supérieure, ce qui devrait généralement être le cas.

L'asphalte conduira le son à des vitesses variables selon sa composition et sa compaction. De plus, cette vitesse variera avec la température et l'état de l'asphalte. Peu d'essais ont été effectués pour établir la vitesse de propagation des ondes sismiques (P) dans l'asphalte et peu d'informations sont disponibles sur le sujet. Cependant, certaines mesures faites en laboratoire à l'Université de Sherbrooke et sur le terrain montrent que cette vitesse peut facilement varier de 700 m/s à 2 900 m/s dans le cas d'un asphalte bitumineux. Des mesures prises à Richmond et à Sherbrooke sur l'asphalte n'ont généralement pas dépassé 2 000 m/s. La vitesse sismique d'un béton relativement sain est d'environ 3 600 m/s. Il y aura donc réfraction et les données devront être interprétées en conséquence, sinon les résultats seront erronés. Chaque nouveau site demande une évaluation géophysique du modèle sismique à traiter afin d'établir correctement la méthode de prise de mesure.

Finalement, mentionnons que la même procédure s'appliquera dans le cas où la première couche de béton serait altérée ou délaminée. En effet, la couche de béton délaminée a perdu ses caractéristiques élastiques originales conséquemment à son détachement. On aura alors avantage à augmenter le nombre de tirs et rapprocher les capteurs pour mieux déterminer la vitesse de la première couche et ainsi son épaisseur. La précision sur cette épaisseur sera de l'ordre de 10% par une méthode complexe de

calcul comme celle de Hawkins ou d'environ 10 à 20% par la méthode des distances critiques.

5.2.4 Phénomène de dispersion fréquencielle

Les ondes se propagent dans la nature selon des lois physiques précises mais extrêmement complexes reliées aux phénomènes de réflexion, transmission et diffraction des ondes, à la rencontre d'un milieu différent. Il est toutefois intéressant de se concentrer sur l'énergie de l'onde, sachant que la quantité d'énergie transmise (ET) et réfléchie (ER) d'un milieu à l'autre se détermine par la formule suivante:

$$\frac{ER}{ET} = \frac{(\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1)^2}{4\rho_1 V_1 \rho_2 V_2} \qquad \text{(Éq. 5.4)}$$

et le coefficient de réflexion (R) est donné par l'équation:

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \qquad \text{(Éq. 5.5)}$$

À chaque interface, une partie de l'énergie est réfléchie. Ces interfaces existent entre des milieux différents ainsi qu'à l'intérieur d'un même milieu où il y aurait fissuration. Pour des milieux différents, l'épaisseur minimale d'une couche doit être approximativement de $\lambda/64$ si on se réfère à (Sheriff, 1984), soit environ 1,5 cm dans la bande de fréquences étudiée pour être détectable en réflexion.

Le comportement des ondes aux interfaces doit être exploité dans cette technique de mesure, principalement à cause de la nature anisotrope et hétérogène des milieux que nous nous proposons d'étudier.

Cette forme d'analyse s'applique mal au système de faible puissance et de haute fréquence utilisant généralement un seul capteur. Dans ces conditions il est difficile de différencier les ondes se propageant de granulat à granulat de celles dans l'acier ou dans la masse de béton. On évite cette difficulté en microsismique, principalement à cause du

type d'ondes générées et du nombre de canaux utilisés. En effet, nous croyons indispensable d'identifier l'onde à partir d'un point source sur une distance assez grande (dans les cas des infrastructures, cette distance sera de 0.5 m ou plus). L'atténuation de l'onde sera proportionnelle à la distance parcourue et ainsi les ondes de faibles énergies, mais plus rapides, associées à l'acier d'armature ou aux granulats peuvent se discerner de l'onde "P" passant dans la masse de béton à cause principalement de leur énergie respective. Bien que la même information pourrait s'obtenir avec un seul canal en déplaçant celui-ci, ce travail serait toutefois très laborieux, et la source ne serait pas exactement la même pour différentes installations de mesure nécessaires pour produire l'équivalent de 6 ou 24 canaux d'enregistrement.

5.2.5 Nature des ondes aux interfaces

Comme nous venons de voir précédemment un changement d'amplitude et de fréquence s'effectue entre un milieu ① de vitesse sismique (V_1) et un milieu ② de vitesse sismique (V_2), ou pour tout changement de densité.

Certaines propriétés des ondes peuvent aussi être considérées en microsismique, pour obtenir une meilleure définition du milieu, entre autres:

1. Leur propriété à transporter une quantité d'énergie variable selon le milieu et les dimensions des milieux dans lesquels l'onde se propage;

2. La possibilité qu'a toute onde de se transmettre par le principe que les particules agissent à la fois comme émetteur et récepteur, lui permet de se propager dans tous les milieux et d'être un générateur d'ondes "S" et "P" au même titre que s'il s'agissait d'un point source;

3. Les changements de fréquence des ondes de compression et de cisaillement pourraient être significatifs mais la présente étude n'a pas investigué cette avenue

de façon approfondie. Bien qu'on ait constaté que la fréquence peut servir à identifier positivement une arrivée spécifique d'un capteur à l'autre. En effet, un changement important de fréquence d'une arrivée à l'autre peut signifier que le signal provient d'un milieu différent que l'arrivée enregistrée au capteur précédent;

4. L'amplitude et la fréquence des ondes permettent d'associer un train d'onde particulier à la dimension de son milieu de propagation. Aussi pour qualifier la nature des fissures dans une structure on pourra exploiter les principes d'atténuation des ondes "P" et "S";

5. La vitesse de l'onde est la plus importante des caractéristiques de cette méthode d'évaluation. Cette vitesse est reliée aux caractéristiques mécaniques du milieu. Dans certains cas, cette évaluation pourra être faite avec les vitesses de propagation des ondes de compression ou de cisaillement, facilement mesurables dans la grande majorité des cas.

5.2.6 Influence de la fracturation

La limite de détection des fissures dans une masse de béton sera basée sur la différence de vitesse de propagation, détectable par des mesures sismiques. Puisqu'en sismique conventionnelle, lorsque le nombre de fissures par mètre augmente, la vitesse sismique diminue rapidement, tel que montré à la figure 5.6. La vitesse sismique originale du milieu sain diminue à un rythme d'environ 20% pour 3 fissures par mètre. La seule logique à ce phénomène est que l'effet de la fissure se fait sentir de part et d'autre de cette dernière, causé par la décompression et l'altération des milieux adjacents à la fissure. On pourra compter sur le même phénomène en microsismique, et espérer trouver plus de détails sur la fracturation par cette technique.

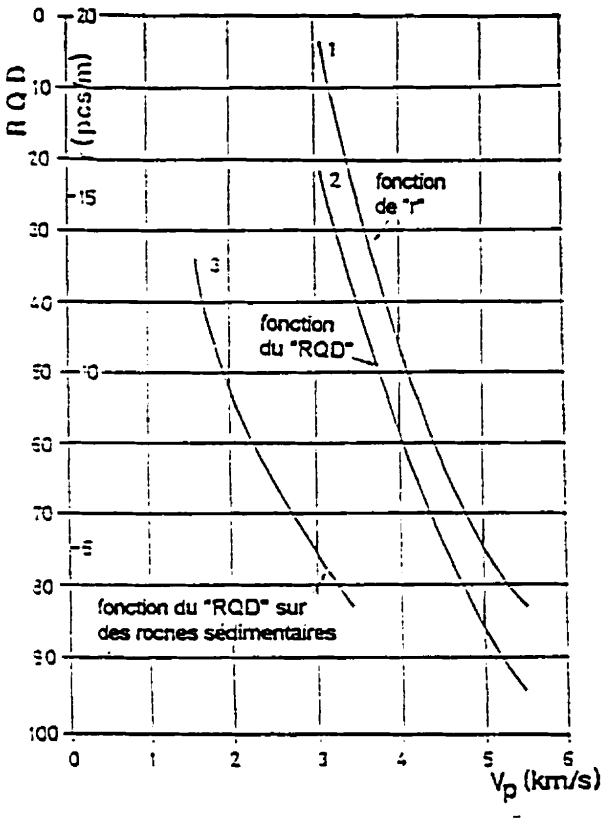


Figure 5.6

Vitesse de propagation "P" en fonction de la densité de fissuration (Sjøgren et al., 1979)

Aussi, une étude sur l'atténuation des ondes, complémentaire à sa classification basée sur les vitesses des ondes "P" et "S", pourra permettre une qualification typique de la fissuration dans certains cas. Par exemple, une série de fissures ouvertes subparallèle ne laissera pas passer facilement les ondes "S" selon (Winterstein et al., 1998) qui exposent une expérience sur la fracturation, où l'orientation des fractures est déterminée par l'absence d'onde "S". La réception du signal se fait à différents niveaux et dans différents trous. L'onde "S" est produite en surface sur différents plans pour obtenir une onde "S" dont le front d'onde interagira perpendiculairement au plan de fracture. À ce moment, l'onde "S"

est atténuée et produit un "shadow". Cette caractéristique est fort exploitable en génie civil car elle permettrait d'établir dès le départ une donnée stratégique sur l'état d'une structure.

5.2.7 Conditions climatiques

La vitesse du son dans la plupart des matériaux sera faiblement influencée par la température, à part le revêtement de bitume qui, avec l'augmentation de température, prendra plus d'expansion et affichera une diminution de la vitesse sismique. Très peu de références sont disponibles sur ce sujet mais cette observation a été faite par Suzanne Pullan du département de géophysique à Énergie Ressource du Canada et chez Géophysique GPR International Inc. sur différents projets avec l'Université de Sherbrooke.

Toutefois, pour certaines structures fortement fissurées, il est préférable de prendre les mesures en été car le phénomène de gel pourrait faire augmenter les valeurs des vitesses sismiques des matériaux, de façon similaire aux vitesses sismiques dans le permafrost.

5.2.8 Résultats microsismiques, viaduc Dickson

Pour permettre de mieux visualiser le type de résultats fournis par la technique microsismique l'annexe B présente la distribution des ondes "P" sur le viaduc Dickson.

CONCLUSION

Ce travail s'est d'abord attardé à démontrer que la méthode microsismique peut être appliquée avantageusement à la qualification du béton des infrastructures, de dimensions aussi restreintes que 0.5 mètre, en se basant sur des applications conventionnelles des méthodes sismiques. Cette méthode présente plusieurs avantages comparativement aux méthodes acoustiques disponibles.

Nous avons effectué plusieurs essais de laboratoire sur des masses de béton connues afin d'identifier avec certitude les ondes enregistrées. Les résultats de ces essais montrent que les ondes intéressantes impliquent un déplacement de masse et se propagent de façon mécanique selon les lois typiques de la sismique. Les ondes se propageant à travers les aciers ou les granulats s'atténuent plus rapidement et leur contenu en fréquence est plus haut. Si ces arrivées sont enregistrées sur une bonne distance, on peut plus facilement les différencier des autres arrivées sismiques à cause de leur atténuation rapide. Comme cette identification est nécessaire, nous démontrons qu'il est préférable d'utiliser un équipement multi-canaux, tel que le Microsis® à 6 canaux, développé chez Géophysique GPR International Inc. Pour ce faire, on a réduit le pas d'échantillonnage à 5 µs, utilisé des accéléromètres, et développé une source pour :

- évaluer la qualité du béton pour des dimensions aussi faibles que 0.5 mètres,
- détecter des zones de faiblesses de l'ordre du centimètre, grâce à la précision des vitesses sismiques obtenues,
- déterminer par réfraction la couche délaminée du béton,
- calibrer les méthodes de géoradar, d'impact écho et d'autres techniques de mesure basées sur la réflexion,
- démontrer les avantages de la microsismique sur les méthodes de mesure existantes,

- l'utilisation de plusieurs canaux assure une meilleure information sismique et une meilleure constance dans le choix des arrivées.

On peut espérer se servir de cette méthode pour l'évaluation du béton, sur une longue période. Mais cette application demanderait des bancs d'essais à long terme. L'expérience pourra aussi être acquise sur des sites existants d'âges différents pour évaluer cette approche. Toutefois, nous avons déjà démontré que la méthode microsismique permet d'établir des vitesses sismiques représentatives d'un milieu de façon répétitive avec une grande précision, étape essentielle à cette possibilité de développement.

D'autre part, durant ce projet, on a constaté des phénomènes de propagation des ondes qui rendent l'interprétation microsismique plus délicate qu'en sismique conventionnelle principalement à cause de l'hétérogénéité du béton. Entres autres choses, on a constaté que:

- l'influence des aciers d'armature sur les données microsismiques peut se faire sentir et même entraîner des erreurs d'interprétation. En général, l'amplitude des arrivées provenant de l'acier sera faible comparativement à l'onde voyageant dans la masse de béton. D'autres recherches sur l'influence de l'acier sont requises en considérant la densité de la couverture spatiale de l'armature et leur emplacement en fonction de la source;

- de plus, l'application de la microsismique en mode réflexion pourrait être des plus intéressantes pour établir des micros profils géotechniques des fondations routières, localiser les zones de fissuration dans les masses de béton etc ...

Ce mémoire démontre que la méthode microsismique a un fort potentiel en génie civil pour quantifier la qualité du béton. Son utilisation est toutefois sensible et complexe à

cause des multiples interactions des ondes sismiques avec les milieux hétérogènes propres aux infrastructures. L'auscultation microsismique pourrait devenir une forme de contrôle pour la sécurité des ouvrages. Déjà, on l'utilise au Nouveau-Mexique pour comparer l'évolution de l'état d'une structure et prévoir son comportement dans le temps. Ces suivis permettront d'établir à l'avance les périodes critiques d'intervention pour minimiser l'usure des ouvrages par un entretien normal.

C'est pourquoi nous recommandons sans hésitation d'utiliser cette technologie pour l'évaluation de l'état du béton des infrastructures et pour contrôler la qualité des réparations. De plus, nous suggérons de prendre des lectures sismiques dès la mise en place du béton à titre de contrôle de la qualité et d'utiliser ces vitesses sismiques comme référence pour établir sa qualité dans le futur.

Finalement nous suggérons d'établir des standards de mesures et d'interprétation en microsismiques appliquées aux infrastructures.

BIBLIOGRAPHIE

BALLIVY, G. et RHAZI, J. (1993). Introduction, auscultation et instrumentation problématique et devenir. 3ième colloque sur la réfection des infrastructures de béton - Auscultation et instrumentation des ouvrages en service, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, 30 p.

BARNES, A.E. (1998). The Complex seismic trace made simple. The Leading Edge, Society of Exploration, Geophysicist, 17,04, 473-476.

BOADU, F.K. (1998). Inversion of fracture density from field seismic velocities using artificial neural networks. Geophysics, 63,2, 534-545.

BOURBIER, T., COUSSY, O. et ZINGZMER, B. (1986). Acoustique des milieux poreux. Éd. Technip, Paris, 339 p.

BREGMAN, N.D., BAILEY, R.C. et CHAPMAN, C.H. (1989). Crosshole seismic tomography. Geophysics, 54,2, 200-215.

CARINO, N.J. et SANSALONE, M. (1984). Pulse-Echo Method for Flaw Detection in Concrete. U.S. Department of commerce, National Bureau of Standards, NBS Technical Note 1199, 1-35.

COSMA, C., (1988). Crosshole Seismic Method - Part 1. Manuel d'instruction du programme Vitrovision, GEOSISMO OY, Finlande. 102 p.

COYNE et BELLIER (1996). L'auscultation acoustique fine de vos géomatériaux - L'interprétation assistée par un système expert - Une base expérimentale de 30 ans (SCARABEE). Document publié par COYNE ET BELLIER, ingénieur conseil, Paris. 6 p.

DE ALMEIDA, I.R. (1991). Non-destructive testing of high strength concretes: rebound (Schmidt Hammer) and ultra-sonic pulse velocity. Conférence "Quality Control of Concrete Structures", Ghent, Belgique, 387-397.

DION, D.J., (1986). La méthode sismique réfraction appliquée au génie géologique, Notions d'interprétation, DV85-06. Gouv. Du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources. 82 p.

GOERTZ, D. et KNIGHT, R. (1998). Elastic wave velocities during evaporative drying, Geophysics, 63,1, 171-183.

HALABE, U.B., PETRO, J.H. et GANGARAO, V.S., (1995). Non destructive Evaluation techniques for bridges, pavements and building components. Short Course Notes, 5-98.

HAWKINS, L.V., (1969). Seismic refraction surveys for civil engineering. Geophysical Memorandum 2/69. Publié pour ABEM, Suède, 12 p.

JALINOOS, F., OLSON, L.D. et AOUAD, M.F., (1994), Ultrasonic Crosshole and crossmedium tomography for the detection of defects in structural concrete. National Science Foundation, 45-52.

JACKSON, M.J. et TWEETON, D.R. (1994). Migratom - Geophysical Tomography Using Wavefront Migration and Fuzzy Constraints. U.S.A. Department of Interior, Bureau of Mines, 34 p.

KIM, Y. et KIM, Y.R. (1998). Prediction of Layer Moduli from FWD and surface wave measurements using artificial neural network. Transportation Research Board, 77th annual meeting, Washington, D.C., 1-19.

LANDRØ, M., ZAALBERG-METSELAAR, G., OWREN, B. et VAAGE, S. (1993). Modeling of water-gun signatures. Geophysics, 58,1, 101-109.

LEE N.J., STOKOE II, K.H., McNERNEY, M.T. et McCULLOUGH, B.F. (1998). In-Situ Evaluation of Layer Stiffnesses in Airport Pavements by Crosshole Seismic Tests. Transportation Research Board, 77th annual meeting, Washington, D.C., 1-26.

LE RAVALEC, M. et GUÉGUEN, Y. (1996). High- and low-frequency elastic moduli for a saturated porous/cracked rock-differential self-consistent and poroelastic theories. Geophysics, 61,4, 1080-1094.

MacBETH, C. et ARNOLD, G. (1998). The shock gun: VSP experiments with a new seismic source, The Leading Edge, Society of Exploration Geophysicist, 17,02, 183-188.

MALHOTRA, V.M. (1976). Testing Hardened concrete: Non destruction Methods. Iowa State University Press and American Concrete Institute, 87 p.

MALHOTRA, V.M. et CANIRO, N.J. (1991), Handbook on Non-destructive Testing of concrete. CRC Press, 343 p.

MICHELENA, R.J., HARRIS, J.M. et MUIR, F. (1995). Crosswell tomographic estimation of elastic constants in heterogeneous transversely isotropic media. Geophysics, 60,3, 774-783.

MILLER, G.F., PURSEY, H. (1955). On the Partition of Energy Between Elastic Waves in a Semi-Infinite Solid. International Conference on Microzonation for Safer Construction : Research and Application, Society of Exploration Geophysicist, vol. 2, 545-548.

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (1993). Manuel d'inspection des structures (Critères pour l'évaluation des dommages). Bibliothèque Nationale de Québec, IS BN -2-550-27767-8, 154 p.

NAZARIAN, S., BAKER M.R. et CRAIN K. (1993). Development and Testing of a Seismic Pavement Analyser. Strategic Highway Research Program. (SHRP), Washington, DC, 60 p.

NAZARIAN, S., BAKER, M. et CRAIN, K. (1997). Assessing Quality of Concrete with Wave Propagation Techniques. ACI Materials Journal, 94-M35, 296-305.

NEW MEXICO STATE HIGHWAY TRANSPORTATION DEPARTMENT (1995). Special provisions for pile integrity testing, Section 505. NMSHT Design Bureau, TPM-064-8(5), 1-6.

OLSON, L.D. (1998). Nondestructive testing of unknown subsurface bridge foundations - Results of NCHRP project 21-5. SAGEEP 98, Chicago, IL, 65-117.

OLSON, L.D., AOUAD, M.F. et SACK, D.A. (1998). NDT diagnosis of drilled shaft foundations. SAGEEP 98, Chicago, IL, 35-61.

PALMER, D. (1980). The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. Society of Exploration Geophysicists, Edited K.B.S. Burke.

PLA-RUCKI, G.F. et EBERDHARD, M.O. (1995). Imaging of Reinforced Concrete : State-of-the-Art Review. Journal of Infrastrure Systems, 134-141.

SHERIFF, R.E. (1984). Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics, Second Edition. Society of Exploration Geophysicists Library of Congress Catalog Card no 84-051971, 323 p.

SHERIFF, R.E. et GELDART, L.P. (1982). History, Theory & Data Acquisition. Exploration Seismology, Vol. 1, Cambridge University Press, 237-243.

SHERIFF, R.E. et GELDART, L.P. (1983). Data - Processing and Interpretation. Exploration Seismology Vol. 2, Cambridge University Press, 201-206.

SJØGREN, B., OFSTHUS, A. et SANDBERG, J. (1979). Seismic Classification of Rock Mass Qualities, Geophysical Prospecting 27, 409-442.

SQUIRES, L.J., BLAKESLEE, S.N. et STOFFA, P.L. (1992). The effects of statics on tomographic velocity reconstructions. Geophysics, 57,2, 353-362.

SQUIRES, L.J., STOFFA, P.L. et CAMBOIS, G. (1994). Borehole transmission tomography for velocity plus statics. Geophysics, 59,7, 1028-1036.

STOKOE II, K.H., OLSON, L.D. et REESE L.C. (1998). Integrity Testing of Drilled Shafts. SAGEEP 98, Chicago, IL, 1-32.

TIMOSHENKO, S.P. et GOODIER, J. N. (1970). Theory of Elasticity. 3ième édition, Mc Graw- Hill, New York, 567 p.

TOMSETT, H.N. (1980). The Practical Use of Ultrasonic Pulse Velocity Measurements in the Assessment of Concrete Quality. Magazine of Concrete Research, 32,110, 7-16.

U.S. BUREAU OF RECLAMATION (1953). Physical properties of some typical foundation rocks, Concrete Lab. Rep. No SP-39, 1-50.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (1993). Drilled shafts for bridge foundations. Federal Highway Administration (FHWA), 298-325.

WINTERSTEIN, D., STEFANI, J., JOHNSON, S. et JULANDER. D. (1998). 9-C Time-Lapse VSP Monitoring of Steam Injection at Cymnic Oil field, The Leading Edge, Society of Exploration Geophysicist, 17,04, 527-530, 533-537.

YAMAMOTO, T., NYE, T. et KURU, M. (1994). Porosity, permeability, shear strength: Crosswell tomography below an iron foundry. Geophysics, 59,10, 1530-1541.

YAMAMOTO, T., NYE, T. et KURU, M. (1995). Imaging the permeability structure of a limestone aquifer by crosswell acoustic tomography. Geophysics, 60,6, 1634-1645.

YUAN D., NAZARIAN, S., CHEN, D.H. et HUGO, F. (1997). Use of Seismic Pavement Analyzer in Monitoring Degradation of Flexible Pavements Under Texas Mobile Load Simulator (A case study). Document pour publication possible dans l'édition spéciale TRB sur "Emerging Accelerated and Nondestructive Paving Testing Technologies", 2-21.

ANNEXE A

Système d'acquisition, de contrôle et de traitement

Microsis® - MD-3

Système d'Acquisition, de Contrôle et de Traitement MICROSIS ™

Géophysique GPR International Inc.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION 93
2. STRUCTURE DE MICROSIS 95
3. PRINCIPE DE MESURE 97
   3.1 Ondes sismiques et leurs propagations dans le milieu élastique 98
   3.2 Vitesses des ondes sismiques 99
   3.3 Propriétés dynamiques 101
   3.4 Ondes de réflexion 102
   3.5 Résonance 104
4. SYSTÈME D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT 104
   4.1 Spécifications du système d'acquisition et du traitement 104
   4.2 Description du système d'acquisition et du traitement 107
5. OPÉRATION DU SYSTÈME MICRO-SISMIQUE 109
   5.1 Démarrage du système 109
   5.2 Système d'acquisition et de traitement 109
      5.2.1 Préparation d'acquisition 111
      5.2.2 Démarrage du système d'acquisition 111
      5.2.3 Entrée des paramètres de chaînages et la densité de matériau 111
      5.2.4 Data Acquisition et traitement automatique 112
      5.2.5 Sauvegarde de données et de résultats de traitement 116
      5.2.6 Modification des paramètres 117
         5.2.6.1 Vitesse d'échantillonnage 118
         5.2.6.2 Gain de signaux 119
         5.2.6.3 Délai de signal 120
         5.2.6.4 Sensibilité du trigger 122
         5.2.6.5 Positions de source et des accéléromètres 123
   5.3 Traitement manuel 125
      5.3.1 Démarrage du logiciel de traitement manuel 125
      5.3.2 Sélection d'une trace à modifier 127
      5.3.3 Modification du temps d'arrivée 128
      5.3.4 Zoom 130
      5.3.5 Impression 131
      5.3.6 Sauvegarde des résultats 131
      5.3.7 Sortie 131

Chapitre 1. Introduction

Ce système informatisé en temps réel, développé par Géophysique GPR International Inc., est destiné à la vérification et au test quantitatifs de la qualité et de la solidité des matériaux pour des routes et des ponts sans endommager les structures de matériaux. Les résultats peuvent être obtenus instantanément.

Ce système est basé sur la mesure des signaux émis par une source sismique, déterminant automatiquement les temps d'arrivee afin de mesurer les vitesses de propagation des ondes P et S dans les matériaux considérés ainsi que leurs modules mécaniques qui permettent d'obtenir l' état des routes et des ponts.

Les caractères principaux du système microsismique sont :

- **Quantitatif** : Ce système fournit directement les vitesses de propagation des ondes P et S et les valeurs des propriétés dynamiques des matériaux : les modules de Young, de masse, de cisaillement, le coefficient de Poisson et l'épaisseur de la couche. Tous ces paramètres donnent une description quantitative de la qualité et de la solidité des matériaux testés.
- **Rapide** : Le temps de l'opération pour un levé est d'environ 40 secondes (comprenant le déplacement du camion, l'installation des récepteurs, l'acquisition des signaux, le traitement et l'enregistrement des données et les résultats de traitement).
- **Présentation graphique** : Les signaux obtenus et les vitesses de propagation des ondes P et S sont affichés graphiquement sur l'écran. Les positions des temps d'arrivee sont indiquées sur les traces correspondantes. Les valeurs des vitesses et les paramètres mécaniques sont aussi affichés sur l'écran.

  Après le traitement, la qualité et la solidité des matériaux sur un tronçon de la route ou du pont à l'étude sont graphiquement décrites, incluant la largeur de la route, le chaînage, la grandeur de la zone étudiée; ceci permet d'obtenir directement l'état de la route ou du pont.
- **Facilité d'utilisation** : Interface de l'utilisateur permettant de manipuler facilement le logiciel.
- **Sans destruction des matériaux** : Il n'y a aucune destruction sur les matériaux par rapport aux méthodes classiques (forage, carottage).
- **Continuité** : A l'inverse des mesures ponctuelles que sont les forages dont l'intervalle d'échantillon est de quelque mètres, ce système permet de mesurer avec un intervalle minimum de 25 cm.
- **Précision** : L'opérateur peut ajuster les distances entre les récepteurs ainsi que la position de la source pour avoir une zone optimale à tester; du fait de l'utilisation d'une source sismique et et des récepteurs à haute fréquence, ainsi que de la haute vitesse de convertisseur de la carte d'acquisition, ce système a été conçu et peut être utilisé pour différents matériaux et pour différentes épaisseurs.
- **Compatibilité du système** : Ce système fonctionne sur les IBM PC et compatibles.

En considérant tous les facteurs mentionnées ci-haut, le système micro-sismique peut être utilisé dans le domaine du génie civil, pour 'évaluer et tester rapidement, économiquement et quantitativement l'état des matériaux. Le tableau suivant montre la comparaison des caractéristiques entre les méthodes microsismique et de géoradar :

Détection	Sismique	Géoradar
Détérioration par micro-fissure	A	
Détérioration par macro-fissure	A	B
Détérioration par altération chimique	A	B
Détérioration par délamination	A	B
Armature		A
Modules mécaniques	A	
Épaisseur de couche	A	A

Remarque : A - la méthode est satisfaisante.
B - la méthode est utilisable mais n'est pas satisfaisante.
blanc - la méthode n'est pas utilisable.

Ce système est composé par 2 parties :

Sauterelle - support mécanique de la source sismique et des accéléromètres.

Ordinateur - un IBM PC 486DX100 équipé d'une carte d'acquisition Flash-12TM de Strawberry Tree Inc. avec les logiciels d'acquisition, de traitement et de contrôle développés par Géophysique GPR International Inc.

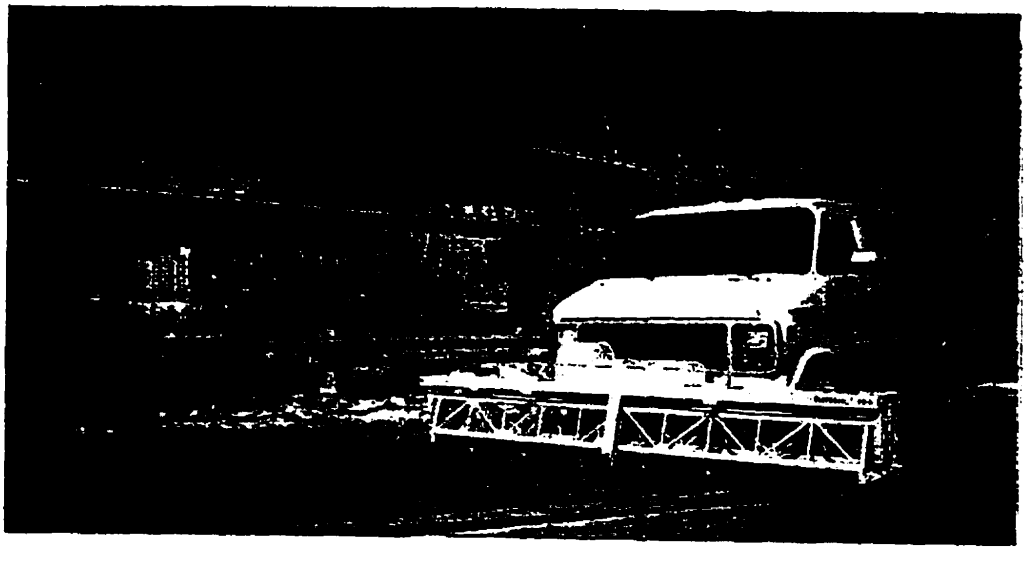


Fig. 1 Structure du système

Chapitre 2 Structure de MICROSIS

La structure de MICROSIS est le support de la source sismique et des récepteurs des ondes sismiques. Elle repose sur 4 roues et devant d'une camionnette où l'ordinateur est installé. Avec avancement de véhicule, la mesure est poursuite. Le conducteur du véhicule contrôle le chaînage à l'aide d'un odomètre de précision; il contrôle aussi la montrée de la structure de MICROSIS quand une mesure est terminée et avance le véhicule pour la mesure suivante. Le conducteur contrôle également le déclenchement de la source sismique pour générer un impact des ondes sismiques.

La génération des ondes sismiques est obtenue par l'impact d'un marteau ou d'un piston propulsé par un cylindre d'air comprimé. Un système de contrôle de pression assure un contact efficace et égal de chaque récepteur avec la surface.

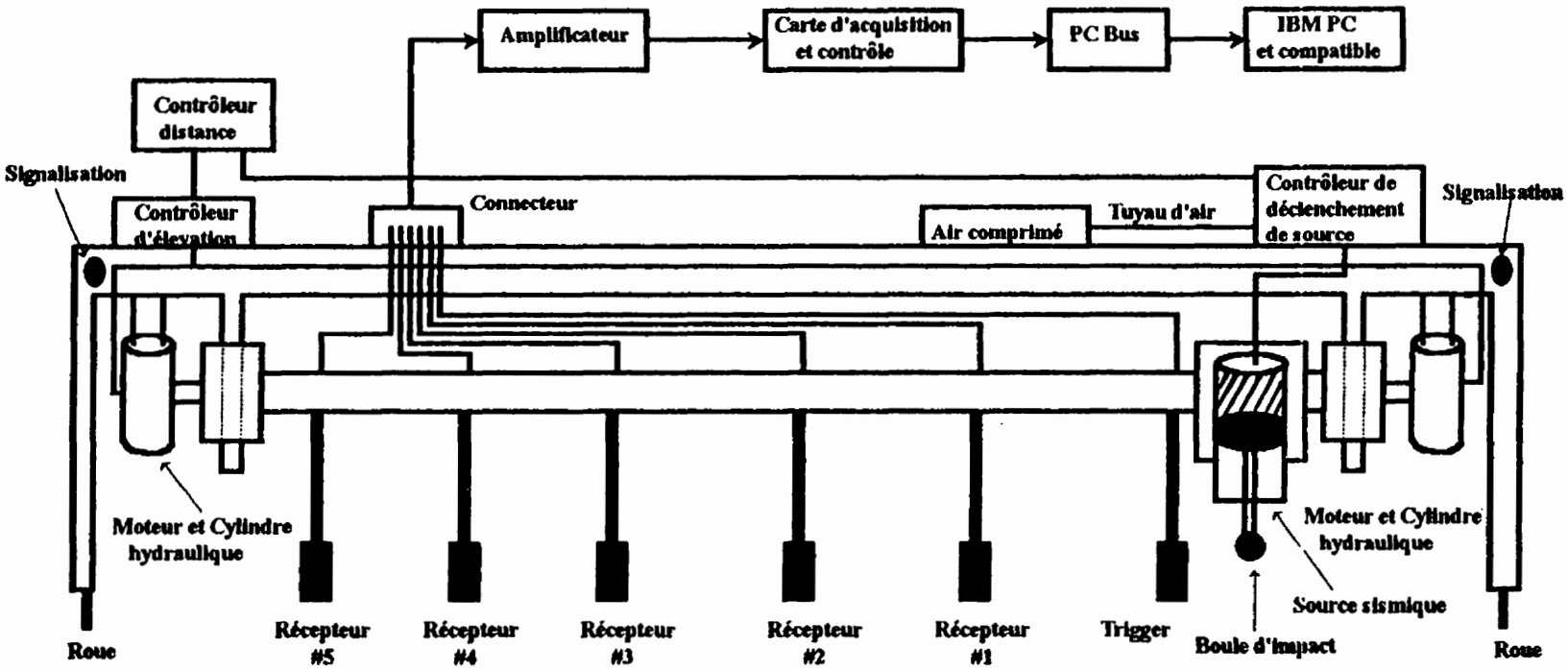
La bouteille du gaz comprimé installé sur la structure de MICROSIS actionne 2 pistons à air comprimé. La boîte de contrôle de la source permet à l'opérateur de contrôle le déclenchement du système à une distance éloignée de la structure de MICROSIS.

La boîte de contrôleur d'élévation permet de contrôler la montée et la descente des récepteurs pour assurer leurs contacts contre sur la surface du sol.

Tous les câbles des récepteurs sont connectés sur des amplificateurs des signaux.

Pour contribuer à la sécurité routière au cours de la mesure, 2 phares de signalisations sont respectivement installés sur les 2 côtés de la structure de MICROSIS.

La dimension de la structure de MICROSIS est : 350 x 51.5 x 61 cm, son poids est d'environ : 160 Kg.

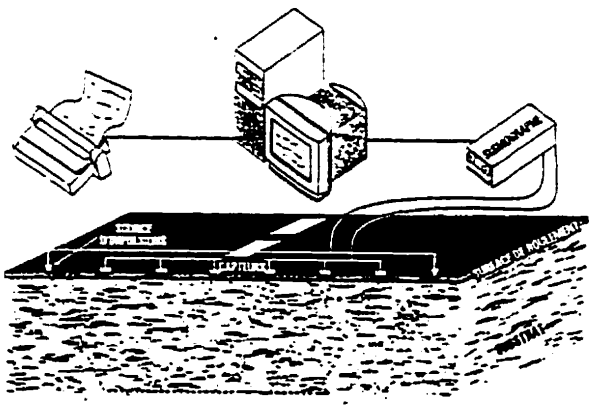

Amplificateur
Carte d'acquisition et contrôle
PC Bus
IBM PC et compatible
Contrôleur distance
Signalisation
Contrôleur d'élevation
Connecteur
Air comprimé
Tuyau d'air
Contrôleur de déclenchement de source
Signalisation
Moteur et Cylindre hydraulique
Moteur et Cylindre hydraulique
Source sismique
Roue
Récepteur #5
Récepteur #4
Récepteur #3
Récepteur #2
Récepteur #1
Trigger
Boule d'impact
Roue

Chapitre 3. Principe de mesure

Les ondes sismiques sont générées par une source (marteau, piston à air comprimé, fusil, etc) et se propagent dans les matériaux à tester. Les récepteurs (accéléromètres ou géophones) sont utilisés pour capturer les signaux des ondes sismiques et les convertissent en signaux électriques.

L'énergie de la source sismique se transmet dans les matériaux et est reçue par les récepteurs placés contre le surface du milieu. Les récepteurs génèrent des signaux électriques en réponse à l'accélération des particules.

Le schéma du système d'acquisition est présenté à la figure 2. La source sismique et les récepteurs sont installés sur un support mécanique - sauterelle à des distances appropriées. Le trigger est activé et le système d'acquisition déclenché. Les signaux sismiques sont reçus et convertis en signaux électriques par les récepteurs. Ils sont convertis en mode digital par le système. Les amplitudes de signaux et les temps correspondants sont enregistrés dans la mémoire de l'ordinateur. Les signaux des ondes sont affichées sur l'écran.



A l'aide des logiciels de traitement, les temps d'arrivee pour les ondes de compression (P) et les ondes de cisaillement (S) sont déterminés. Les vitesses de propagation des ondes P et S sont calculées d'après les temps d'arrivee et les positionnements de la source sismique et des récepteurs.

En utilisant les relations analytiques entre les modules dynamiques et les vitesses des ondes P et S et selon la densité des matériaux testés obtenus par la mesure ou par l'estimation, les modules mécaniques sont déterminés. Leurs valeurs sont affichées sur l'écran du système. Les signaux et les résultats peuvent être enregistrés dans le disque dur pour un traitement et évaluation futurs.

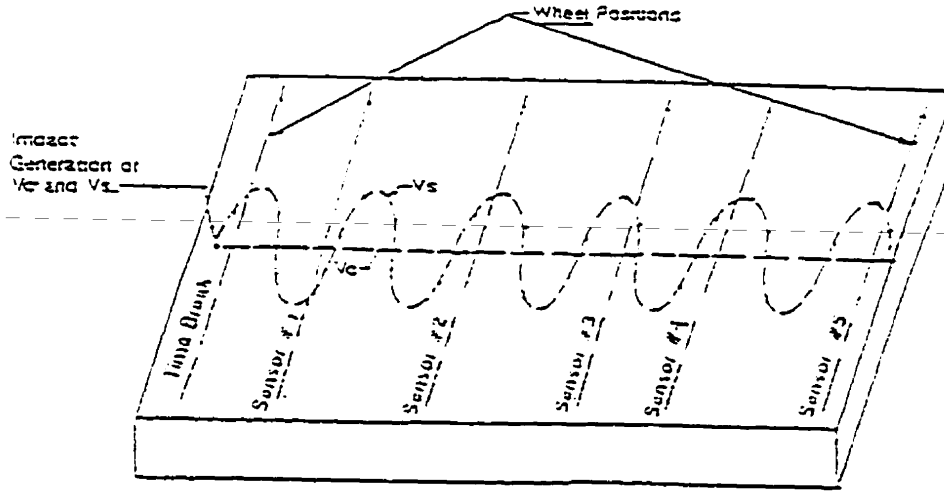
3.1 Ondes sismiques et leurs propagation dans le milieu élastique

Le compact de la source sismique génère deux types d'ondes dans un milieu équilibré : les ondes élastiques (bodywaves) et l'onde de surface (Rayleigh-wave).

Pour les ondes élastiques, d'après la direction de mouvement des particules par rapport à la direction de propagation d'onde, l'onde de compression (P) et l'onde de cisaillement (S) sont distinguées.

L'onde P crée un mouvement de compression, les directions de la propagation de l'onde et du mouvement des particules sont parallèles. L'onde P propage plus vite que les autres types d'ondes, donc, le temps d'arrivee est toujours le plus court parmi les ondes sismiques.

L'onde S génère un mouvement de cisaillement, la direction de la propagation de l'onde est perpendiculaire à la direction du mouvement des particules. L'onde S peut être polarisée. La propagation de l'onde S est plus lente que l'onde P et le temps d'arrivee est plus long que le temps d'arrivee de l'onde P.



Les ondes de surface propagées près la surface. La vitesse de l'onde de Rayleigh est de 90% celle de l'onde S. Le mouvement des particules associées à l'onde de Rayleigh contient les composantes verticales et horizontales. L'onde de Rayleigh produit un mouvement elliptique dans le surface du milieu. L'amplitude de l'onde de Rayleigh atténue aussi rapide avec l'augmentation de profondeur. Pour une profondeur égale d'environ à 1.5 fois de la longueur de l'onde de surface, l'amplitude verticale est d'environ de 10% de celle de surface.

Dans les conditions idéales, soient l'onde de compression, l'onde de cisaillement et l'onde de Rayleigh propage à partir d'une source qui vibre verticalement dans une surface homogène, isotopique élastique de demi-space, environ 76% de l'énergie d'entrée propagé de la forme de l'onde de Rayleigh, l'onde de compression (P) et l'onde de cisaillement (S) portent respectivement 7% et 26% de l'énergie. L'onde P et l'onde S se propage radialement en dehors de la source alors que l'onde de Rayleigh se propage vers l' avant suivant un front d'onde cylindrique près de la source. Bien que les ondes de compression et de cisaillement voyagent plus vite que l'onde de surface, les amplitudes des ondes P et S atténuent en proportion de $1/r^2$, l'amplitude de l'onde de surface dimimue en proportion de $1/r^{0.5}$, où r est la distance à partir de la source.

3.2 Vitesses des ondes sismiques

Les vitesses des ondes sismiques sont définies par celles de la progression des ondes dans les matériaux. La vitesse de l'onde sismique est une indication directe de la rigidité et de la solidité des matériaux; Les vitesses des ondes sismiques plus élevées sont associées à la rigidité et à la solidité plus grande. De plus, l'information des vitesses des ondes sismiques est utilisée pour déterminer les propriétés du matériel comme le module élastique, le coefficient de Poisson, les modules de Bulk et de Shear afin d'identifier la délamination, la fissure, l'épaisseur des couches etc. à partir de la résonance et des caractères des ondes de réflexion.

La vitesse de l'onde sismique propagée dans un matériel dépend de la densité et des propriétés du matériel. D'après la théorie mécanique, la vitesse de l'onde propagée est exprimée de la forme suivante :

$$V = \sqrt{\frac{elasticity}{density}}$$

La vitesse de l'onde P est :

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}$$

où : Vp = vitesse de compression,
λ = constante de Lame;
G = module de Shear,
ρ = densité de masse du milieu.

La vitesse S est égale à :

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Les vitesses entre l'onde P et l'onde S sont reliées par le coefficient de Poisson σ :

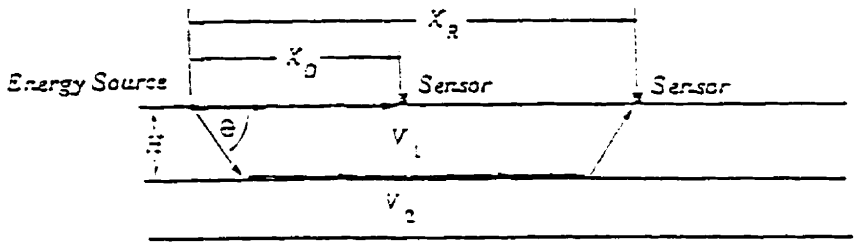
$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{0.5 - \sigma}{1 - \sigma}}$$

Pour une vitesse de cisaillement constante, la vitesse de compression augmente avec l'augmentation de coefficient de Poisson. Quand $\sigma = 0$, Vs /Vp = 1/1.414; pour $\sigma = 0.5$, (un matériel incompressible), Vs /Vp = 0. Le tableau suivant donne les vitesses des ondes sismiques pour certains matériaux typiques :

Matériel	Vp (m/s)	Vs (m/s)
Air	330	
Sand	300 - 800	100 - 500
Water	1450	
Moraine	1500 - 2700	900 - 1600
Limestone	3500 - 6500	1800 - 3800
Rocksalt	4000 - 5500	2000 - 3200
Granites	4600 - 6500	2500 - 4000
Diabases	5500 - 7000	3000 - 4500

À partir de ce tableau, on constate que la vitesse augmente avec l'accroissement de la densité du matériel, car l'accroissement des propriétés des matériaux est plus vite que celui de la densité.

Les vitesses de l'onde de compression Vp et de l'onde de cisaillement Vs sont déterminées en observant les temps d'arrivee et les positionnements de la source sismique et les récepteurs.



3.3 Propriétés dynamiques

Les modules mécaniques donnent une description des propriétés dynamiques des matériaux. Il est important de calculer les modules dynamiques d'après les vitesses de compression et de cisaillement et de la densité des matériaux.

Les modules mécaniques sont définis comme suit :

Module de Young: $$E = \rho V_p^2 \frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{1-\sigma}$$

Module de cisaillement: $$G = \rho V_s^2$$

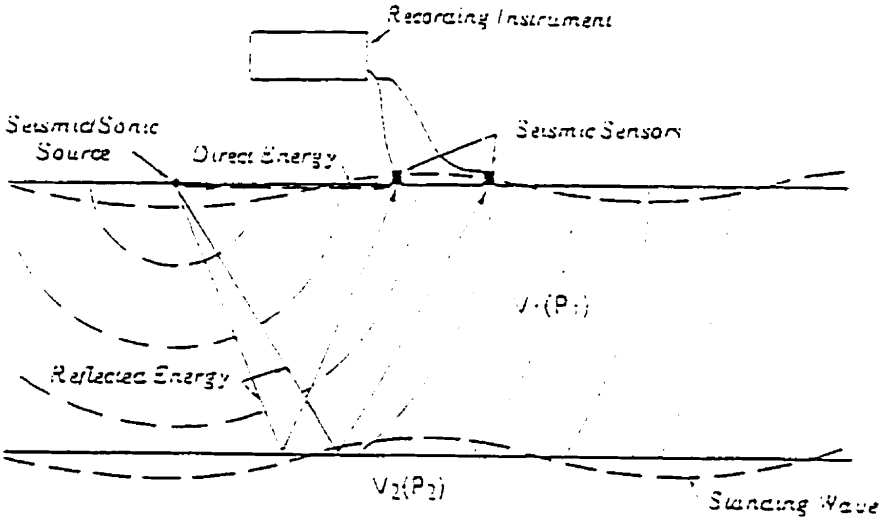
Module de compressibilité: $$K = \frac{E}{3(1-2\sigma)}$$

Coefficient de Poisson : $$\sigma = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

où : Vp = vitesse de l'onde de compression (onde P),
Vs = vitesse de l'onde de cisaillement (onde S),
ρ = densité massique du milieu

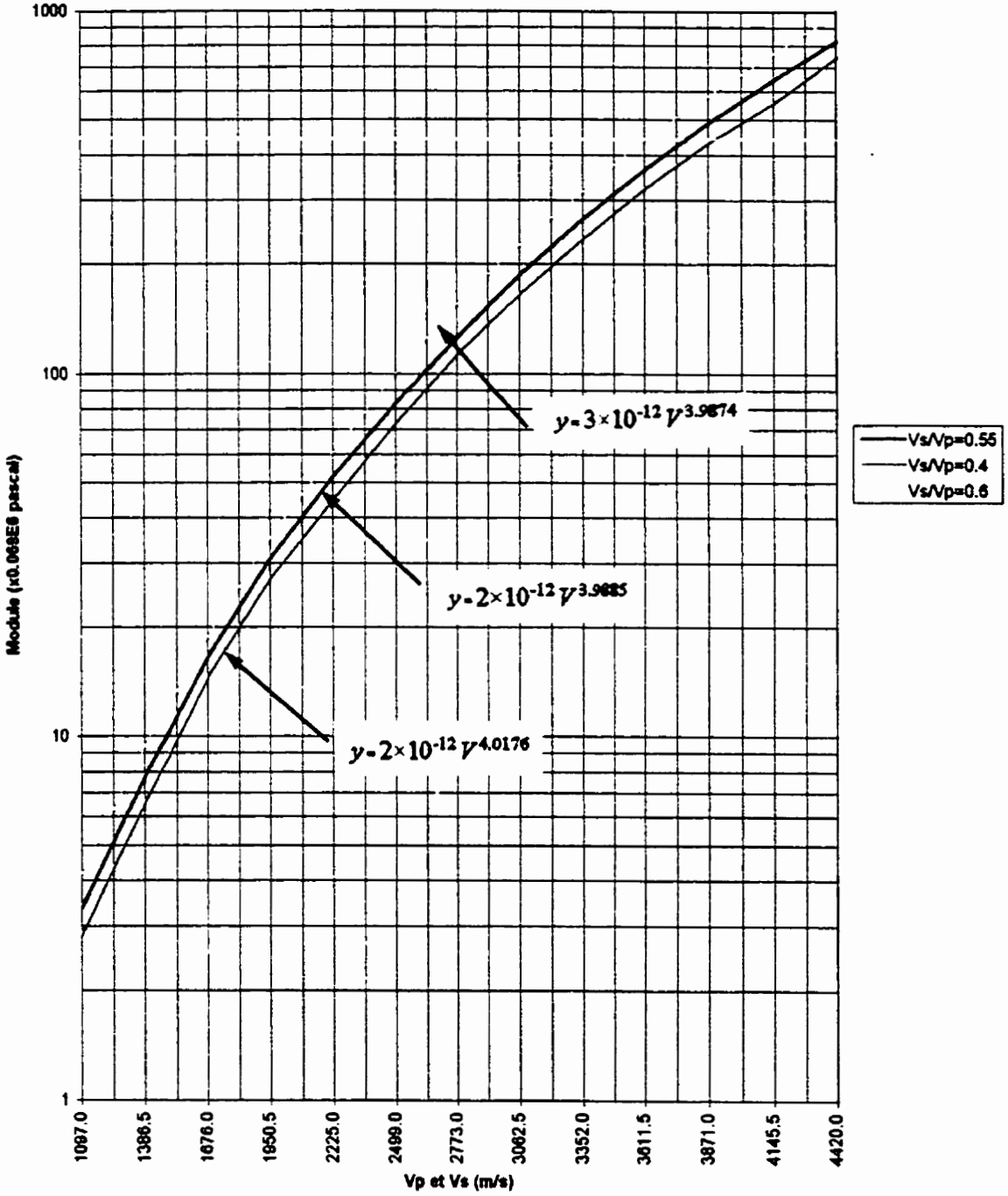
3.4 Ondes de réflexion

Quant une onde sismique se heurte à la limite des matériaux avec différentes propriétés (vitesses et densité), une partie de l'onde est réfléchie et une partie transmise.



Le dégré de réflexion dépend de l'effet combiné des changements de vitesse et de densité. Presque toute l'énergie sera réfléchi dans l'interface béton-air. Par conséquent, l'énergie est essentiellement emprisonnée dans le béton et un effet caractéristique de réverbération est constaté. Réciproquement, une interface béton-gravier peut permettre à une partie substantielle de l'énergie incidente d'être transmise. Donc, cette partie de l'énergie réfléchie peut rapidement diminuer et montrer les amplitudes qui sont plus petites que celles associées à l'énergie incidente.

Relation entre les vitesses et la résistance en compression



(Ref. "Concrete Strength Evaluation", p1-4, Weston NDT)

3.5 Résonance

La résonance a lieu quand l'énergie transmise excite la fréquence naturelle d'un élément de béton. La forme de cette onde peut varier avec les dimensions et les propriétés physiques des éléments du béton. Pour une section de la route réparée, le béton délaminé et certains éléments structurels, les résonances sont facilement déterminées.

D'après la résonance des matériaux et la vitesse de l'onde de compression, l'épaisseur de la couche peut être déterminée.

$$H = 0.5 \frac{V_p}{f_{resonance}}$$

Chapitre 4. Système d'acquisition et de traitement

La méthode d'auscultation microsismique repose sur l'acquisition et l'analyse, en temps réel, des ondes sismiques générées par une source installée sur la sauterelle. L'onde de choc se propage dans le milieu (béton de ciment). Selon le principe de réfraction et de réflexion, le signal de l'onde sismique est capté par les accéléromètres placés contre la surface de la chaussée. D'après le temps nécessaire à l'onde pour se transmettre de la source sismique vers chacun des accéléromètres, le logiciel détermine automatiquement les vitesses des ondes P et S ainsi que les modules dynamiques des matériaux envisagés de tester. Les signaux des ondes reçus par les accéléromètres et les résultats de traitement sont graphiquement et instantanément affichés sur l'écran.

Les résultats de traitement sont enregistrés dans le disque dur, permettant de cartographier les zones détériorées en utilisant un logiciel de mise en plan.

Un logiciel de l'analyse spectrale permet de traiter des signaux dans le domaine de fréquence et de déterminer l'épaisseur de la couche du béton.

4.1 Spécifications du système d'acquisition et du traitement

En considérant les facteurs de l'application microsismique : l'épaisseur de matériaux envisage de mesurer, l'énergie de la source sismique, la fréquence des récepteurs, le nombre des échantillonnages, le temps d'écoute du système, la résolution des signaux et le mode du trigger, une carte d'acquisition Flash-12 est choisie pour le développement du système microsismique. Les spécifications du système sont présentées dans les tableaux suivants :

Rang (Bipolaire)	Résolution	Précision (%)	Brut interne
± 10 V	4.88 mV	± 0.02%	5 mV
± 5 V	2.44 mV	± 0.05%	2.5 mV
± 2.5 V	1.22 mV	= 0.05 %	1.25 mV
± 1 V	488 µV	± 0.05%	1.25 mV
± 500 mV	244 µV	± 0.075 %	600 µV
± 250 mV	122 µV	± 0.075 %	300 µV
± 100 mV	48.8 µV	± 0.1%	300 µV
± 50 mV	24.4 µV	± 0.1 %	300 µV

Tab.4 Rang et précision de canal

Résolution(bit)	Vitesse maximum (un canal)
12	1 MHz

Tab. 5 Vitesse d'échantillonnage

Voltage maximal	± 30 V (En marche) ± 20 V (Non-operating)
Impédance d'entrée	> 100 GΩ
Capacitance	< 50 pF

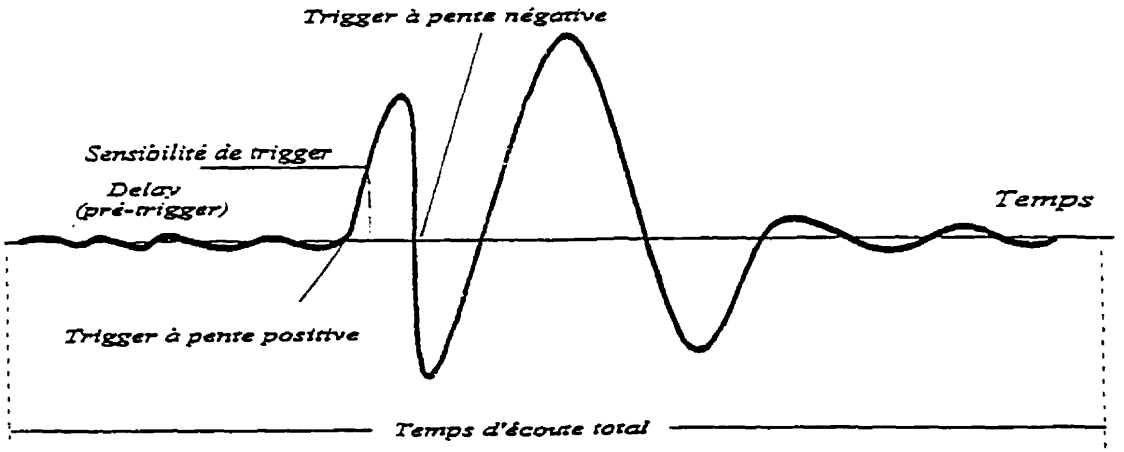
Tab.5 Protection d'entrée

Type de trigger	Pente positive or pente négative
Niveau de trigger	de 0 à +10 V dans 128 pas

Tab.6 Mode et Niveau de Trigger

Longueur des échantillonnages/canal: 1024
Longueur/échantillon: 2 octets
Nombre de canaux: 6
Température d'opération: 0°C à 50°C
Délai : 0 à 1024 échantillons
Référence du voltage sorti: 6.667 V ± 1%
Bloc d'alimentation: 110/220 V automatique
Format des fichiers des données et de résultats: ASCII

Ce système doit être déclenché quand le canal de trigger reçoit un signal dont l'amplitude est supérieure à la valeur pré-définie. Il y a 2 modes de trigger analogique: pente positive et pente négative. Le mode du trigger et la sensibilité du trigger sont contrôlés par le logiciel.



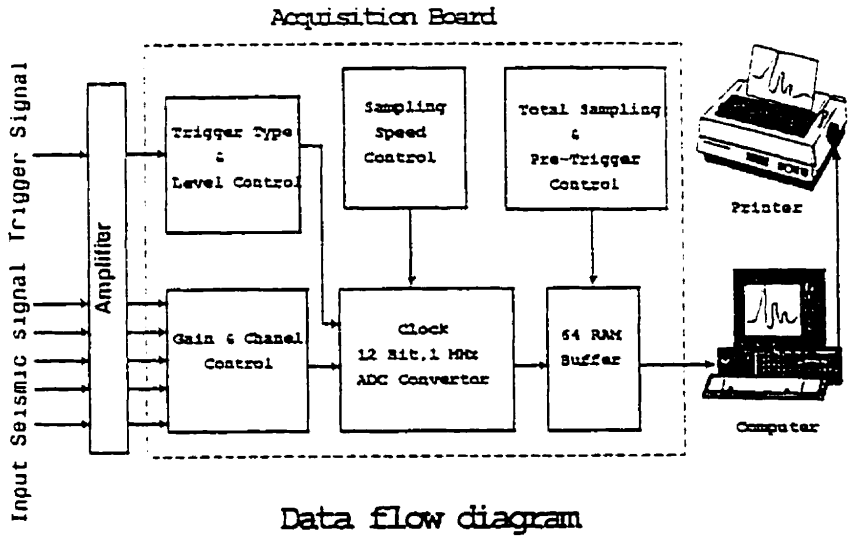
Le délai (pré-trigger) est changeable et contrôlé par le logiciel, l'unité de la valeur de pré-trigger est en nombre d'échantillonnage, l'utilisateur peut ajuster cette valeur selon son application.

Le format des fichiers des données enregistrés et du résultat de traitement sont en ASCII, permettant de à l'utilisateur de les importer dans un logiciel de tabulateur (Excel, Quatro etc) pour analyse et traitement.

4.2 Description du système d'acquisition et du traitement

Les ondes des signaux sismiques sont affichées sur l'écran. D'après les temps d'arrivée des ondes de compression et de cisaillement qui sont déterminées automatiquement, les vitesses propagées des ondes P et S sont calculées en utilisant la méthode de moindre carré. Les propriétés dynamiques des matériaux sont déterminées selon les formules mentionnées dans le chapitre Principes de mesure.

La partie informatique du système microsismique est composée par une carte d'acquisition et de contrôle, un micro-ordinateur IBM et les logiciels d'acquisition, de traitement, d'affichage et d'archivage des données. Le schéma suivant montre la connection des matériaux du système :



Le logiciel du système, qui se compose de la partie d'acquisition des signaux sismiques, de contrôle, de convertissement de signaux analogiques en numériques, de traitement, d'affichage graphique, d'archivage des données et d'impression, est présenté dans le schéma suivant.

Le système débute par la calibration de la carte d'acquisition et de contrôle, l'utilisateur doit entrer la densité du milieu qui est destinée au calcul des propriétés dynamiques du milieu testé. Les entrées des chaînages servent à identifier les positionnements de levés.

D'après les applications générales du système microsismique, les paramètres de la carte d'acquisition, contrôle la mesure comme la vitesse d'échantillonnage, le nombre de canaux, l'échelle de voltage des signaux, le temps de pré-trigger, le mode et la sensibilité du trigger, et les paramètres des positionnements de la source sismique et des récepteurs, sont pré-définis. Le système affiche tous ces paramètres par défaut pour la première fois de démarrage. L'utilisateur peut modifier ces paramètres pour sa propre application du système.

L'utilisateur déclenche l'acquisition quant les paramètres de contrôle de la carte et des positionnements de la source et des récepteurs sont corrects, le système se trouve à l'état d'attente. Si l'amplitude du signal de trigger, qui est venue de la source sismique, est supérieure au seuil de la sensibilité du trigger, le système reçoit les signaux sismiques venus des récepteurs qui sont amplifiés par l'amplificateur.

Ces signaux analogues sont convertis en digital et placés dans un buffer de mémoire de la carte. Par le bus interne de l'ordinateur, les données sont emmagasinées dans une zone de mémoire de l'ordinateur. Les temps d'arrivée des ondes de compression et de cisaillement sont automatiquement déterminés selon les caractéristiques des ondes sismiques en utilisant un algorithme de cochage.

Les vitesses de propagation des ondes de compression et de cisaillement V_p et V_s sont obtenues d'après les temps d'arrivée et les positionnements de la source des récepteurs à l'aide de la méthode numérique de moins de carré. Le calcul des propriétés dynamiques des matériaux est réalisé selon les relations analytiques de mécanique élastique.

Les signaux et les vitesses des ondes sismiques sont graphiquement affichés sur l'écran. Les positions des temps d'arrivee des ondes de compression (P) et de cisaillement (S) sont indiquées pour chaque trace, qui permet à l'utilisateur de visualiser la variation des temps d'arrivee entre différentes traces.

L'utilisateur peut enregistrer les données et les résultats de traitement dans le disque dur si la mesure est satisfaisante et commencer le levé suivant ou bien annuler le levé courant et recommencer une autre fois.

Un driver d'impression est réalisé pour HP Paintjet et IBM matrice (9 ou 24 pins) permettant d'imprimer les courbes des signaux et des vitesses, les valeurs des vitesses et des propriétés dynamiques du milieu.

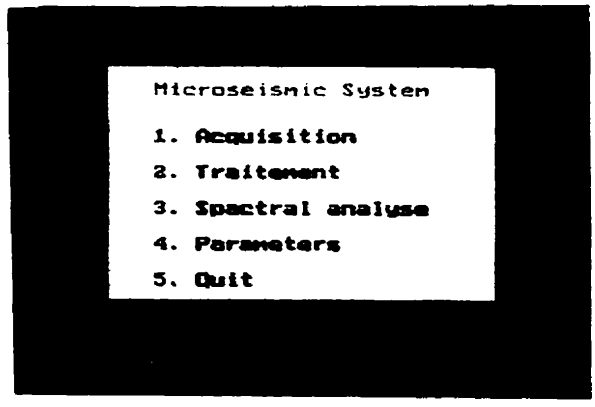
Chapitre 5. Opération du Système micro-sismique

Ce système informatisé en temps réel permet de déterminer quantitativement les caractéristiques des matériaux pour déduire la qualité des routes ou des ponts, en acquérant et en analysant des signaux sismiques.

L'utilisation de ce système est simple et interactif pour les utilisateurs et les menus graphiques permettent aux utilisateurs de sélectionner les opérations préférées.

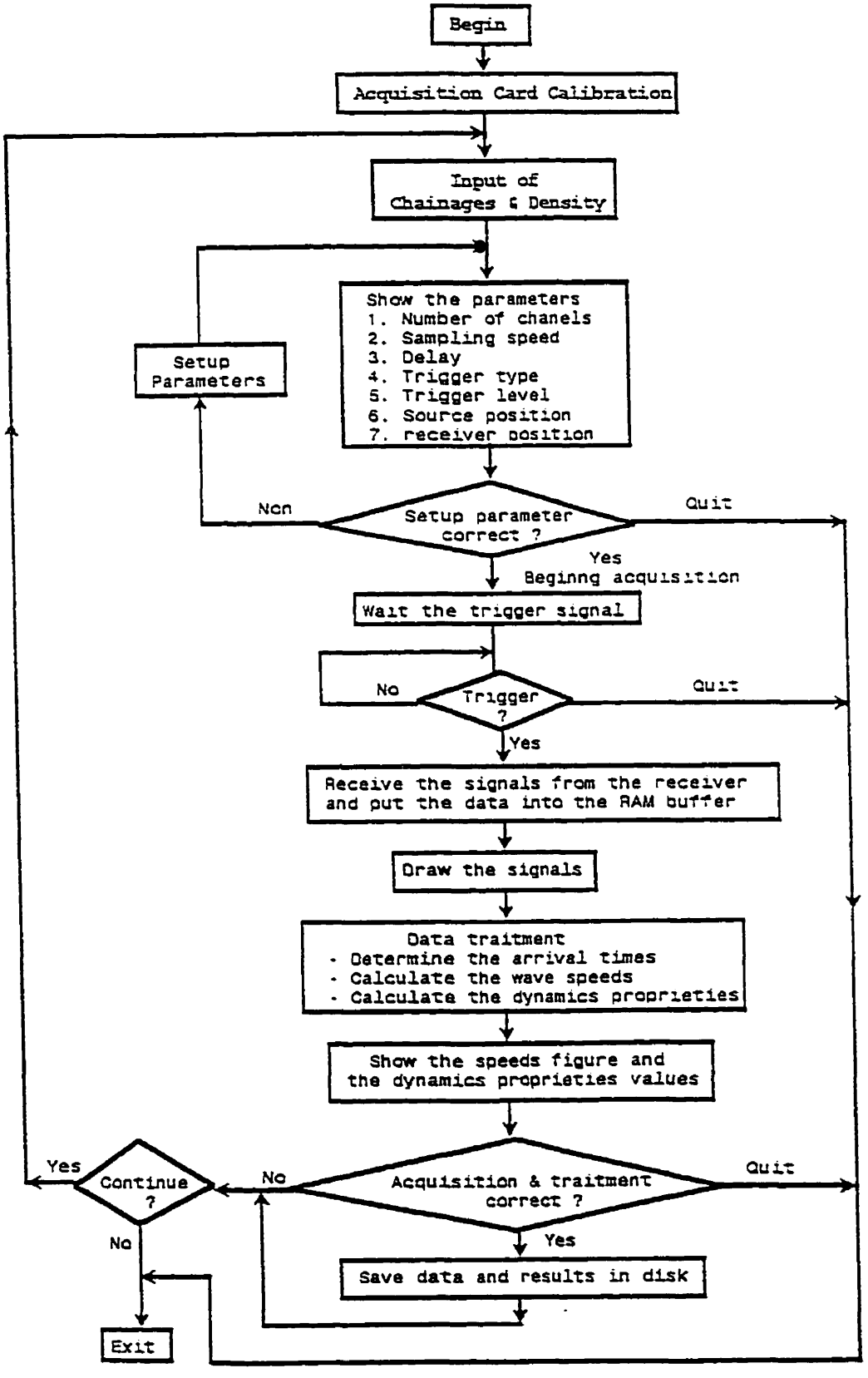
5.1 Démarrage du système

Le système va être déclenché quand l'opérateur tape la commande de GPR sous DOS, un logo de GPR affiche sur l'écran. A l'aide de la touche Enter, le menu principal du système apparait sur l'écran permettant à l'opérateur de choisir la commande de l'acquisition des données ou du traitement assisté.



5.2 Système d'acquisition et de traitement

A partir du menu principal du système, la sélection de la commande de l'acquisition va démarrer les logiciels de l'acquistion des données.


Begin
Acquisition Card Calibration
Input of
Chainages & Density
Show the parameters
1. Number of chanels
2. Sampling speed
3. Delay
4. Trigger type
5. Trigger level
6. Source position
7. receiver position
Setup
Parameters
Non
Setup parameter
correct ?
Quit
Yes
Beginng acquisition
Wait the trigger signal
No
Trigger
?
Quit
Yes
Receive the signals from the receiver
and put the data into the RAM buffer
Draw the signals
Data traitment
- Determine the arrival times
- Calculate the wave speeds
- Calculate the dynamics proprieties
Show the speeds figure and
the dynamics proprieties values
Yes
Continue
?
No
Acquisition & traitment
correct ?
Quit
No
Yes
Save data and results in disk
Exit

5.2.1 Préparation d'acquisition

Avant l'opération de mesure, il est recommandé que l'utilisateur crée son propre répertoire et effectue les levés dans celui-ci au cours des mesures, afin d'éviter la confusion et la perte des données. L'utilisateur peut créer son répertoire à l'aide du numéro de contrat, par exemple: M96333.

La procédure est la suivante :

C:\>md m96333 Enter

C:\>cd m96333 Enter

C:\M9633\>

5.2.2. Démarrage du système d'acquisition

Après la vérification des connections entre les accéléromètres et la boîte de connecteur, l'utilisateur peut démarrer le système d'acquisition à partir de son répertoire, en entrant la commande

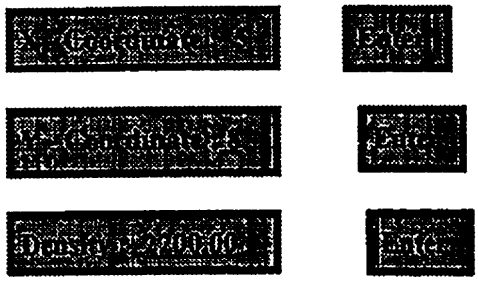
C:\m96333\> trace Enter

Le programme est déclenché et le système calibre automatiquement la carte d'acquisition qui est installée à l'intérieur de l'ordinateur.

5.2.3 Entrée des paramètres de chaînages et la densité de matériau

Si la calibration du système est terminée avec succès, l'utilisateur est demandé à entrer les coordonnées des chaînages sur X et Y, ainsi que la densité des matériaux envisagés de tester. Ces informations seront enregistrées dans la tête de fichier des données pour identifier les fichiers et calculer les modules mécaniques dans le programme.

Après avoir entré la valeur de chaque item, il est nécessaire de valider en tapant la touche Enter. Le système garde les valeurs précédentes des items, ce qui permet à l'utilisateur de se souvenir des anciens chaînages et de modifier seulement les valeurs des items qui doivent être changées. Ex:



5.2.4. Data Acquisition et traitement automatique

Après avoir entré correctement les coordonnées et la densité des matériaux, le menu principal, contenant les paramètres de l'initialisation de la carte et les paramètres des positions de la source sismique, du premier et du dernier accéléromètre, ainsi que la partie des commandes, est affiché sur l'écran de la forme suivante :

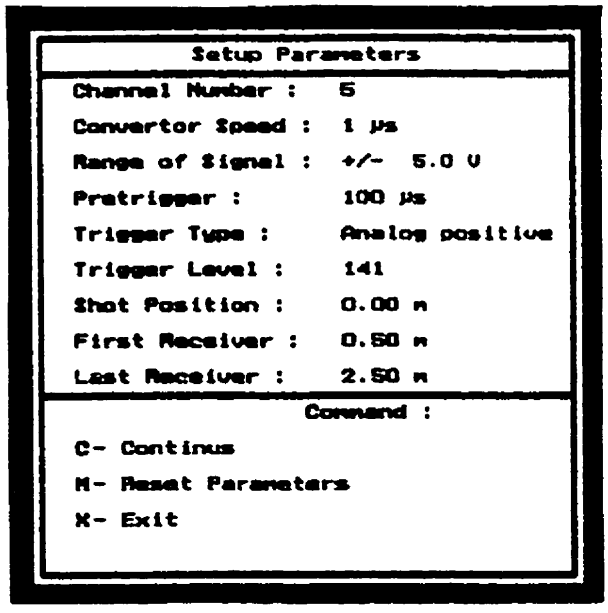


Fig 1. Menu Principal

Lors du démarrage de ce système, pour la première fois, tous les paramètres affichés dans le menu principal **Setup Parameters** sont les valeurs prédéfinies dans le système.

Les commandes et les touches correspondantes sont affichées dans la deuxième partie du menu principal.

Si l'utilisateur est d'accord avec les valeurs de paramètres affichées dans le menu principal, il peut taper la touche G pour déclencher la procédure d'acquisition. Un sous-menu au-dessus va apparaître sur l'écran :

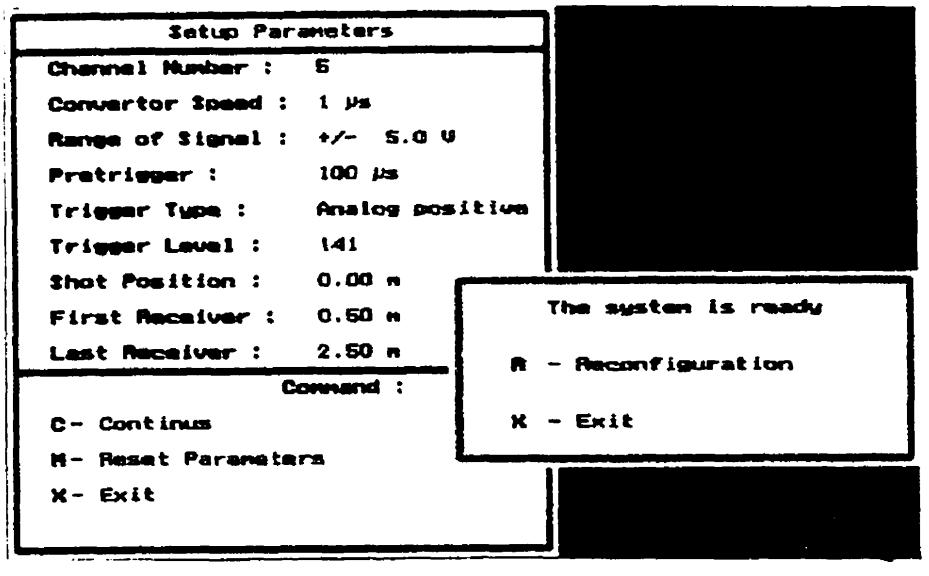


Fig 2. Menu d'Acquisition

Ceci signifie que le système est prêt pour l'acquisition de signaux et attend l'arrivée du signal du trigger.

L'utilisateur peut aussi arrêter le système d'acquisition et retourner au système DOS en tapant la touche X.

Quand le canal du trigger reçoit un signal, dont l'amplitude est égale ou supérieure au seuil spécifié, le système récupère les signaux par les 5 canaux qui sont connectés sur 5 accéléromètres.

Les signaux sont affichés sur l'écran avec les indications d'indices des canaux à gauche. Le système analyse et traite les données instantanément pour déterminer respectivement les temps d'arrivée pour les ondes P et S. D'après les temps d'arrivée et les positions de la source, du premier et dernier accéléromètre, ainsi que le nombre de canaux, les vitesses pour les ondes P et S sont calculées. Ensuite, les modules mécaniques tels que Young, Poisson, Bulk et Shear sont déterminés selon les relations analytiques entre les vitesses P, S et la densité des matériaux.

Deux lignes verticales se trouvant dans chaque trace de signaux indiquent respectivement les positions des temps d'arrivée pour les ondes P et S. Les courbes et les valeurs des vitesses sont affichées sur l'écran. Les valeurs de modules mécaniques sont représentées sous la forme d'un tableau affiché en haut à droite de l'écran.

Un petit menu de commandes situé en bas à droite de l'écran permet à l'utilisateur d'effectuer les opérations suivantes :

P —— Impression de l'écran sur l'imprimante.

S —— Sauvegarde des données et des résultats de traitement dans le disque dur.

Esc —— Retourne au menu principal pour le levé suivant ou pour la sortie du système d'acquisition ou bien la modification des paramètres.

Si l'utilisateur ne satisfait pas les signaux obtenus, il peut retourner à l'étape 2 en tapant la touche Esc sans sauvegarder les données et les résultats de traitement. L'utilisateur doit ré-entrer les chaînages et il peut aussi modifier les paramètres de la carte.

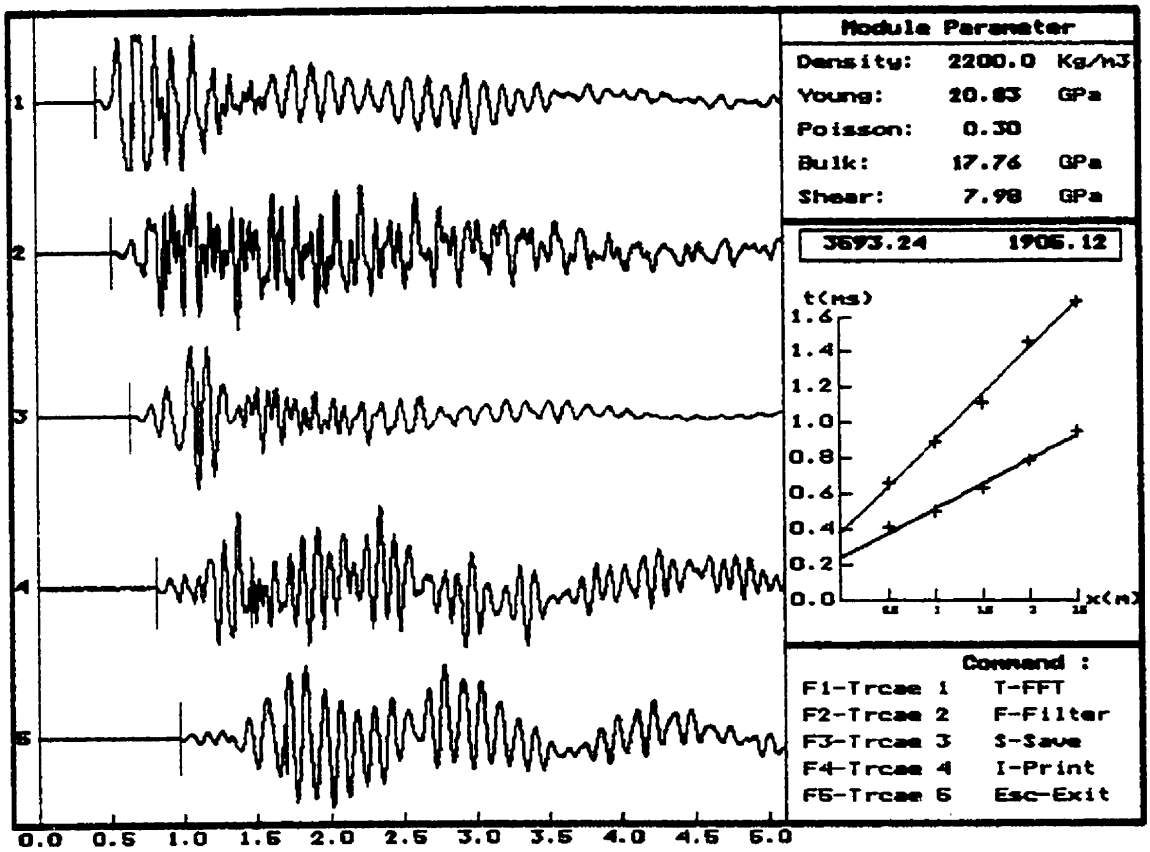


Fig 3. Résultats d'acquisition

5.2.5 Sauvegarde de données et de résultats de traitement

Si les formes des ondes sont belles ou les signaux sont traitables manuellement, l'utilisateur peut enregistrer les données et les résultats de traitement dans le disque dur à l'aide de la commande S.

Quand l'utilisateur sélectionne la commande d'enregistrement, le système demande à l'utilisateur dans quel répertoire où les données seront sauvegardées.

C —— Sauvegarde des données dans le sous-répertoire DIR_C du répertoire courant de l'utilisateur. ex: C:\M96333\DIR_C

M —— Sauvegarde des données dans le sous-répertoire DIR_M du répertoire courant de l'utilisateur. ex: C:\M96333\DIR_M

Si ces répertoire n'existent pas, le système va créer automatiquement.

Quand la commande C ou M est sélectionnée, le système sauvegarde automatiquement les données dans le répertoire spécifié et affiche le nom de fichier complet sur l'écran en s'accompagnant de la sonnerie afin d'aider l'utilisateur à mémoriser la correspondance entre les fichiers de données et les chaînages.

Les noms de fichiers des données sont numérotés, le premier enregistrement est systématiquement nommé 1.dat. Le suivant est systématiquement incriminé à 1. Sans considérer la limite du nombre des fichiers pour le système d'exploitation, le nombre maximal des fichiers est 65355.

LCaution : (1). Dû à la grande capacité du fichier de données (environ 82 K) et la présence de nombreux fichiers de données, l'opérateur doit fréquemment vérifier la capacité du disque dur et transférer ces fichiers de données dans les disquettes pour libérer le disque dur.

Cette version du logiciel ne supporte pas la vérification de la capacité du disque et n'informe pas l'utilisateur du manque d'espace du disque.

(2). Car il n'y a pas la correspondance entre les chaînages et les noms de fichiers des données, l'opérateur doit noter la correspondance entre les chaînages et les noms des fichiers.

Si l'utilisateur n'a pas pu entrer les coordonnées correctement au cours d'acquisition pour certains fichiers, il est nécessaire que l'opérateur note les noms de ces fichiers, il peut les modifier ultérieurement parce que le format des fichiers de données est enASCII.

Les résultats de traitement sont systématiquement enregistrés dans un fichier ASCII, appelé ARAM.TXT dans le répertoire courant de l'utilisateur.

5.2.6 Modification des paramètres

Avant la procédure de l'acquisition des données, il faut initialiser certains paramètres pour la carte d'acquisition et des paramètres qui spécifient les positionnement de la source et des récepteurs.

Les paramètres de la carte sont utilisés pour la configuration de la carte d'acquisition, la sélection et la modification des paramètres de la carte d'acquisition permettant à l'utilisateur d'obtenir les meilleurs signaux selon les matériaux envisagés à mesurer. Dans la présente version de logiciel, il contiennent la vitesse de convertisseur, le rang de signal, le niveau de trigger et le Délai avant de trigger.

Les paramètres de positionnements se composent par la position de la source, du premier et du dernier accéléromètre en supposant que les distances entre les 5 accéléromètres sont égales.

Comme on a mentionné dans l'étape 3, les paramètres sont automatiquement affectés par le système pour le première fois du démarrage. Mais l'utilisateur peut choisir les paramètres de la configuration de carte d'après son besoin.

A partir du menu principal, la sélection de la commande M permet de modifier les paramètres de la configuration de la carte d'acquisition et des positionnements de la source sismique et des accéléromètres. Un sous-menu SETUP va afficher sur l'écran :

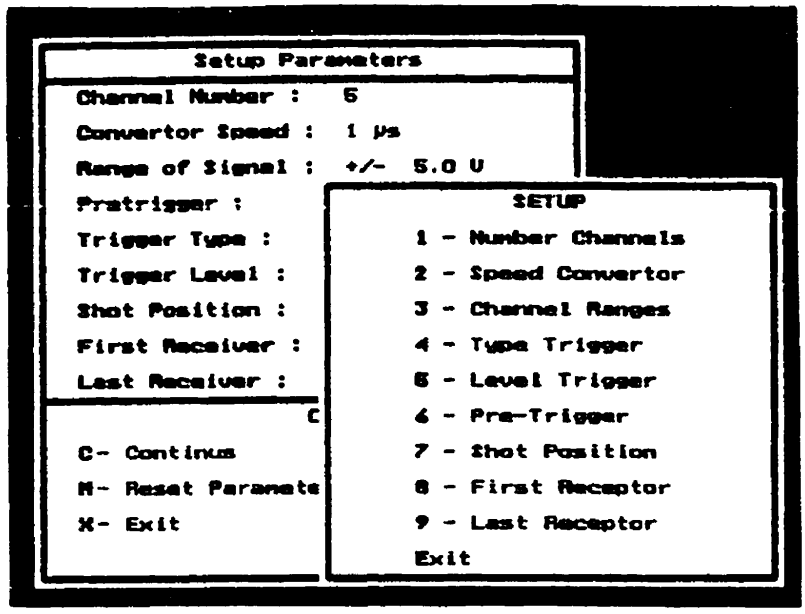


Fig 4. Menu de SETUP

L'utilisateur peut sélectionner l'item dans le menu SETUP que l'on veut changer en déplaçant le curseur ou en appuyant la touche numérique. La seule différence entre le curseur et la touche numérique est :

Curseur : la couleur de fond de l'item sélectionné devient jaune, l'utilisateur doit valider son choix en tapant la touche pour activer directement le sous-menu correspondant le choix.

Touche numérique : activer directement le sous-menu correspondant au choix de l'opérateur.

: permettant de retourner au menu précédent.

5.2.6.1 Vitesse d'echantionnage

L'utilisateur peut choisir la vitesse de convertisseur de la carte selon son application et les matériaux envisagés à mesurer. Les vitesses de A/D de la carte d'acquisition disponibles sont : 1 µs, 2 µs, 5 µs, 10 µs, 20 µs, 50 µs, 100 µs et 200 µs. Pour les applications microsismiques, il est recommandé de sélectionner 1 µs comme le choix par défaut.

Quand l'item **Speed Convertor** est activé à partir du menu **SETUP**, le sous-menu **Speed Convertor** est affiché sur l'écran :

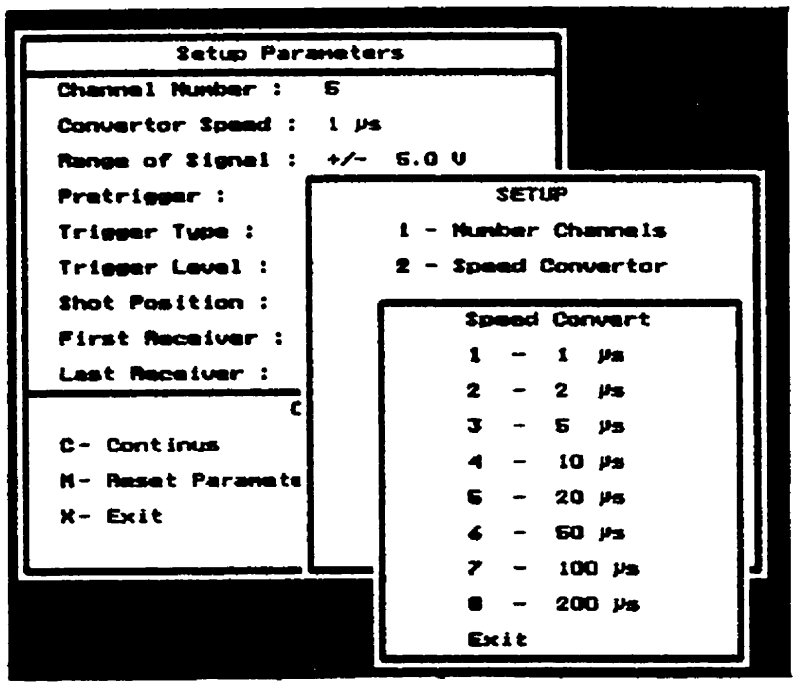


Fig 5. Menu de **Speed Convertor**

5.2.6.2 Gain de signaux

La sélection ou la modification des gains pour les signaux permettent à l'utilisateur d'appliquer dans différentes utilisations dont l'intensité du signal de la source est variée.

Le gain de signaux disponibles pour cette carte sont : ± 10V, ± 5V, ± 2.5V, ± 1V, ± 500 mV, ± 250 mV,± 100 mV et ± 100 mV.

Le sous-menu de **Range Channel** est activé à partir du menu de **SETUP** et permet à l'utilisateur de sélectionner son choix préféré.

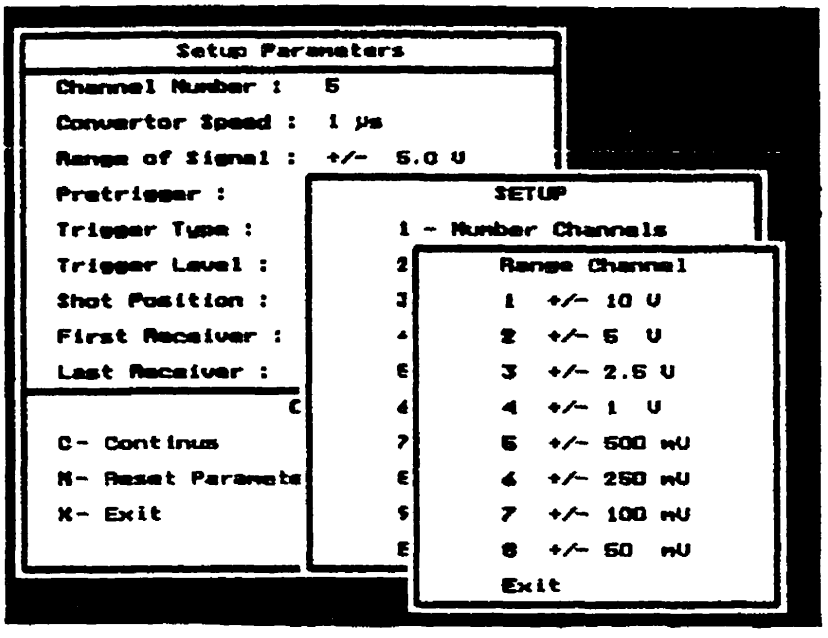


Fig 6. Menu de **Range Channel**

Dans cette version de logiciel, le changement des gains des signaux se fait ensemble, soit que l'opérateur ne peut pas modifier les 5 canaux en différents gains.

5.2.6.3 Délai de signal

Afin de faciliter le traitement des signaux pour les utilisateurs, il faut bien visualiser la partie du début de signal, il est commode de donner un délai avant l'arrivée du signal de trigger. Dans ce système, le délai de signal est modifiable selon les applications. Le délai par défaut est 100 µs. La modification de délai de signal est effectuée par la sélection de la valeur de délai dans le sous-menu de **Pretrigger** qui est activé à partir du menu **SETUP**. Le domaine de la variation des valeurs de delai varie entre 0 et 500 µs.

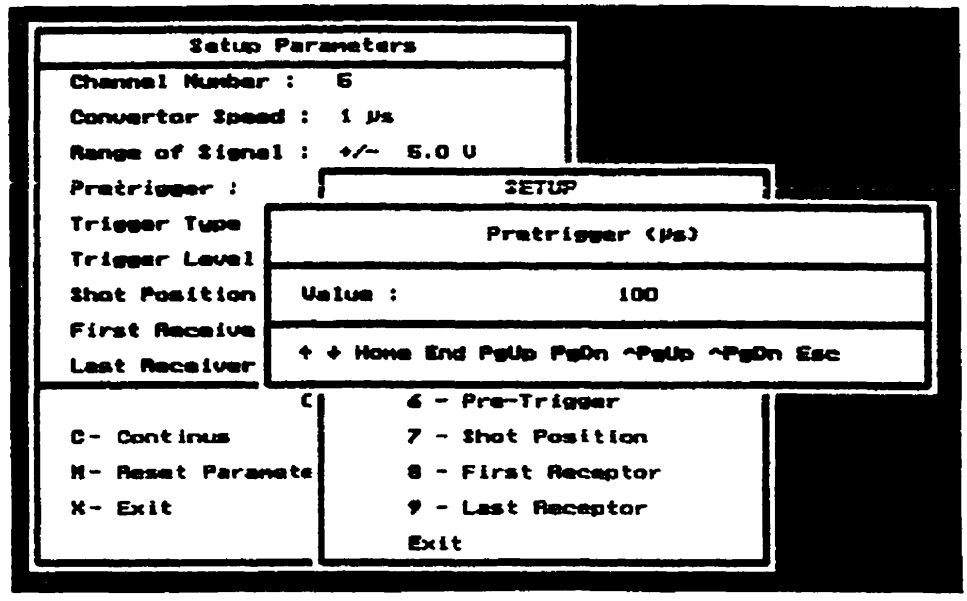


Fig 7. Menu de **Pretrigger**

À partir du sous-menu **Pretrigger**, l'opérateur peut changer les valeurs de délai au moyen des touches indiquées dans le sous-menu **Pretrigger** :

Touche	Fonctionnalité	Touche	Fonctionnalité
	Incrément à 1 µs	**PgUp**	Augmentation de 5 µs
	Décrément à 1 µs	**PgDown**	Diminution de 5 µs
Home	Initialisation à 0 (minimum)	**^PgUp**	Augmentation de 10 µs
End	Initialisé à 500 µs (maximum)	**^PgDown**	Diminution de 10 µs

Esc	Retourne au menu précédent		

5.2.6.4 Sensibilité du trigger

Dans certains endroits, le signal de la source peut être relativement très faible à cause de l'absobtion d'énergie des matériaux envisagés de tester, le canal du trigger ne peut pas activer, l'opérateur doit diminuer le seuil du trigger; Dans certains cas, du fait de la présence de la forte perturbation électromagnétique dans l'environnement de l'opération, le système d'acquisition peut déclencher sans recevoir le signal de la source, il est nécessaire d'augmenter le seuil du trigger. Le domaine de variation des niveaux de trigger est entre -5 V et 5 V. Le seuil du trigger par défaut est environ 1.06 V.

La modification du seuil de trigger est réalisée par changement de la valeur de seuil dans le sous-menu **Trigger Level** qui est activé à partir du menu **SETUP**.

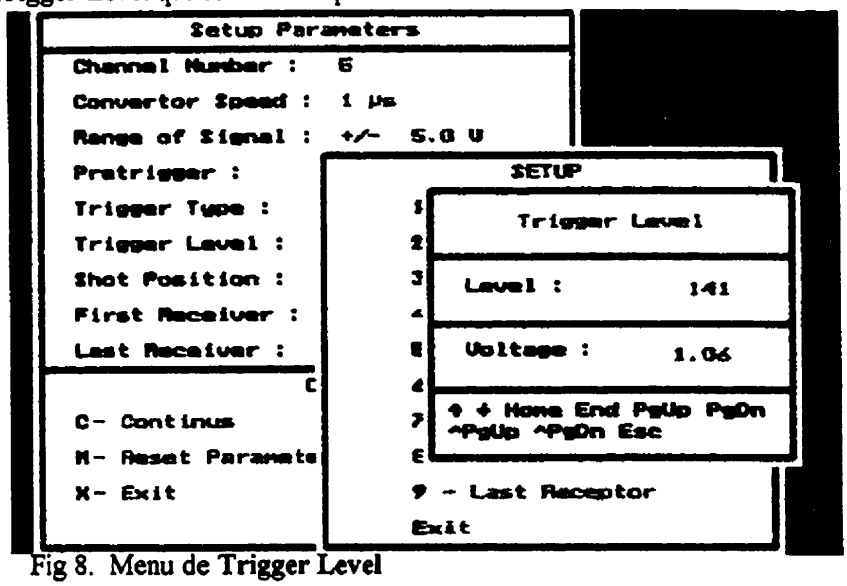


Fig 8. Menu de Trigger Level

Le Premier item du menu est le niveau du trigger, qui varie entre 0 et 255. Le deuxième item du menu est le voltage du trigger. La correspondance entre eux est :

Level	Voltage (V)
0	- 5
255	+ 5

Le changement du niveau de trigger est effectué par les touches indiquées dans le sous-menu **Trigger Level**, les fonctionnalités des touches sont identiquées que la description du changement de délai (5.3).

5.2.6.5 Postions de source et des accéléromètres

Les positions de la source sismique et des accéléromètres dépendent de l'installation de la source et des accéléromètres sur la sauterelle(support mécanique de la source et des accéléromètres). Les valeurs par défaut sont respectivement 0 m, 0.5 m et 2.5 m à condition que les distances entre les 5 accéléromètres soient égales.

L'utilisateur peut changer ces paramètres d'après son propre installation en activant les sous-menus **Shot Position**, **First Receiver** et **Last Receiver** à partir du menu **Setup**.

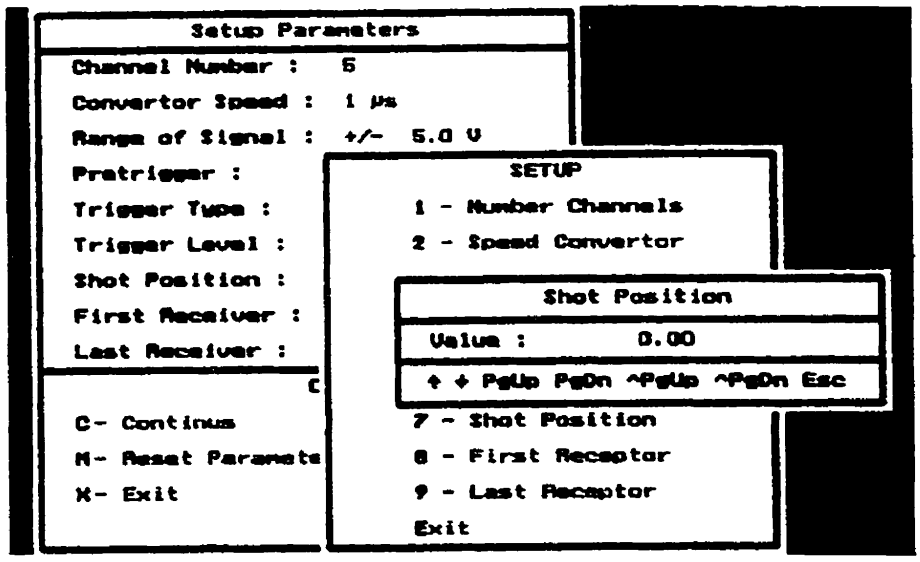


Fig 9. Menu de **Shot Position**

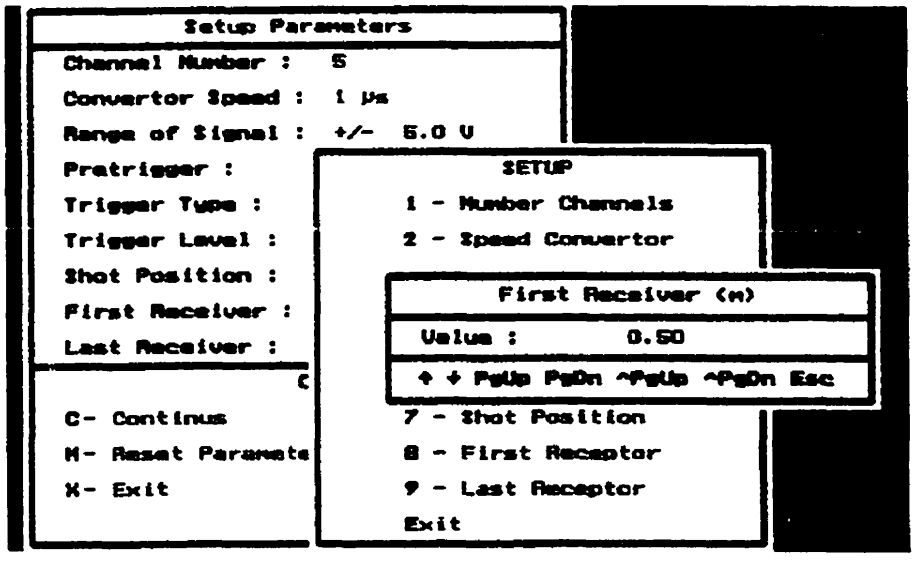


Fig 10. Menu de First Receiver

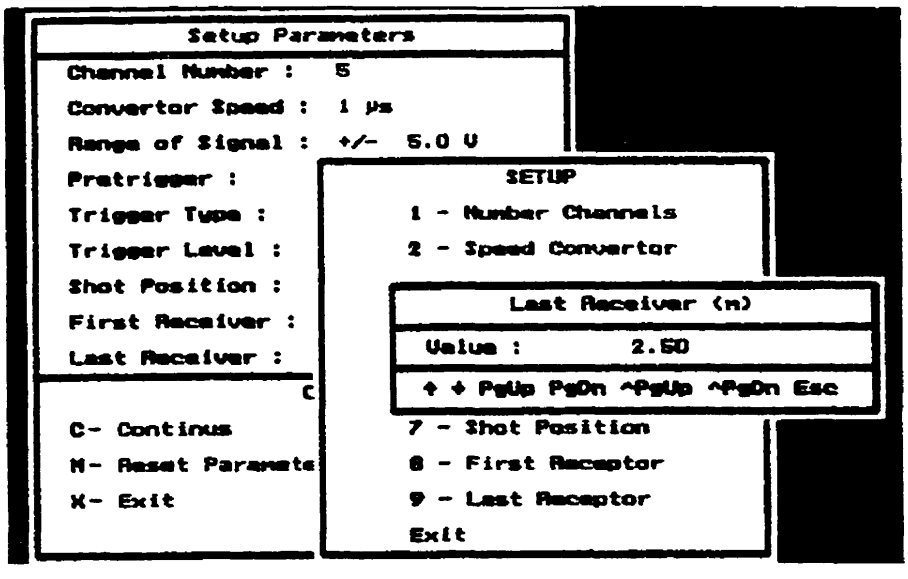


Fig 11. Menu de Last Receiver

5.3 Traitement manuel

Du fait de la limite de précision du logiciel de traitement automatique pour certaines traces des signaux sismiques pendant l'acquisition sous terrain, un programme de traitement manuel est conçu permettant à l'utilisateur de traiter manuellement après le levé. Ce logiciel permet de modifier les temps d'arrivée des ondes de compression (P) et de cisaillement (S) pour les traces spécifiées. L'utilisateur peut corriger les temps d'arrivée à l'aide du déplacement du curseur, il peut aussi grandir une partie de signal pour bien visualiser la forme de signal, à partir de la courbe grandie, l'utilisateur peut effectuer la modification.

Les modifications manuelles des temps d'arrivée corrigent automatiquement les vitesses des ondes sismiques et les valeurs des paramètres dynamiques. Les résultats de traitement peuvent être enregistrés dans le disque dur ou imprimés sur l'imprimante.

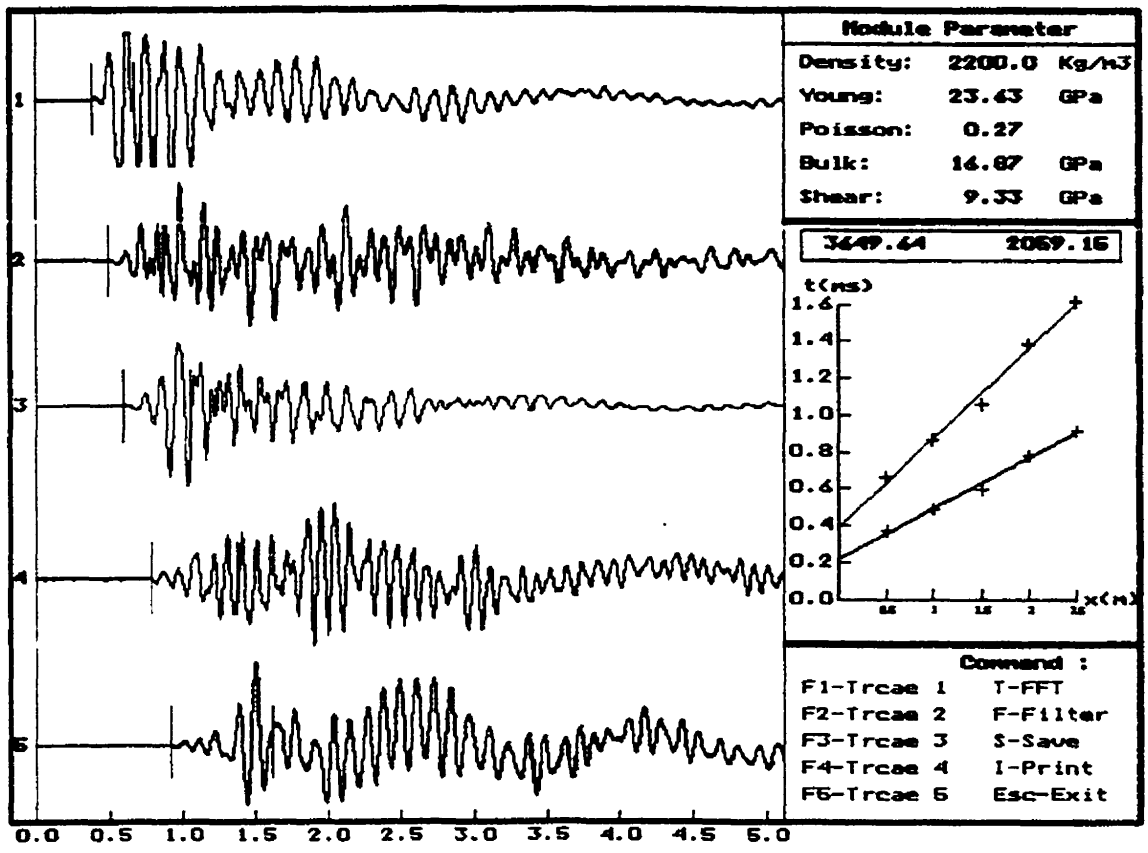
La manipulation du logiciel de traitement est simple, les commandes de l'opération sont affichées sur l'écran.

5.3.1 Démarrage du logiciel de traitement manuel

À partir du menu principal du système, la sélection du menu item traitement est faite par la touche 2 ou par la souris. L'utilisateur doit entrer le nom de fichier de données à traiter sans le nom d'extension.

File Name : 156

À la suite de la validation d'entrée du nom de fichier des données, les courbes des signaux, les courbes des vitesses P et S, les positionnements des temps d'arrivée ainsi que les valeurs des paramètres dynamiques sont affichés sur l'écran comme la figure suivante :

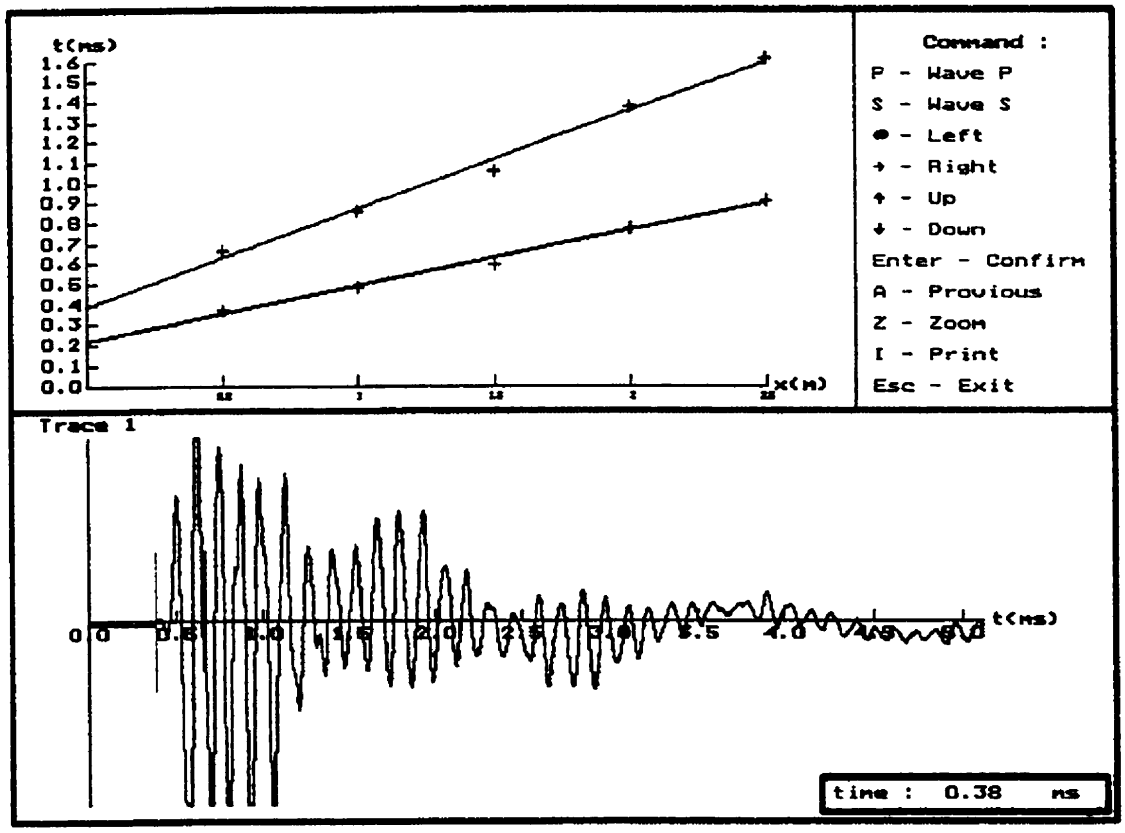


Les temps d'arrivée, les vitesses des ondes et les paramètres dynamiques sont automatiquement déterminés par le programme qui est utilisé au cours de l'acquisition, les temps d'arrivée pour certaines traces ne peuvent pas être corrects, il est nécessaire que l'opérateur les

modifient manuellement.

5.3.2 Sélection d'une trace à modifier

L'opérateur peut sélectionner une trace à modifier à partir du menu de commande qui est affiché en bas à droite de l'écran, en appuyant une touche de fonction parmi [redacted] à [redacted] qui correspondent respectivement aux traces 1 à 5. Si une trace est choisie, les courbes de la vitesse et de signal et un menu de commande sont affichés sur l'écran :



5.3.3 Modification du temps d'arrivée

L'opérateur peut modifier les temps d'arrivée pour l'onde P ou pour l'onde S en appuyant la touche P ou S, ensuite un curseur de la forme ligne verticale apparait dans la même position du temps d'arrivée, l'opérateur peut déplacer le curseur dans la position correcte en utilisant les touches suivantes :

Page Up : Déplace le curseur à droite avec le pas de 5 unités,

Page Down : Déplace le curseur à gauche avec le pas de 5 unités,

→ : Déplace le curseur à droite avec le pas de 1 unité,

← : Déplace le curseur à gauche avec le pas de 1 unité,

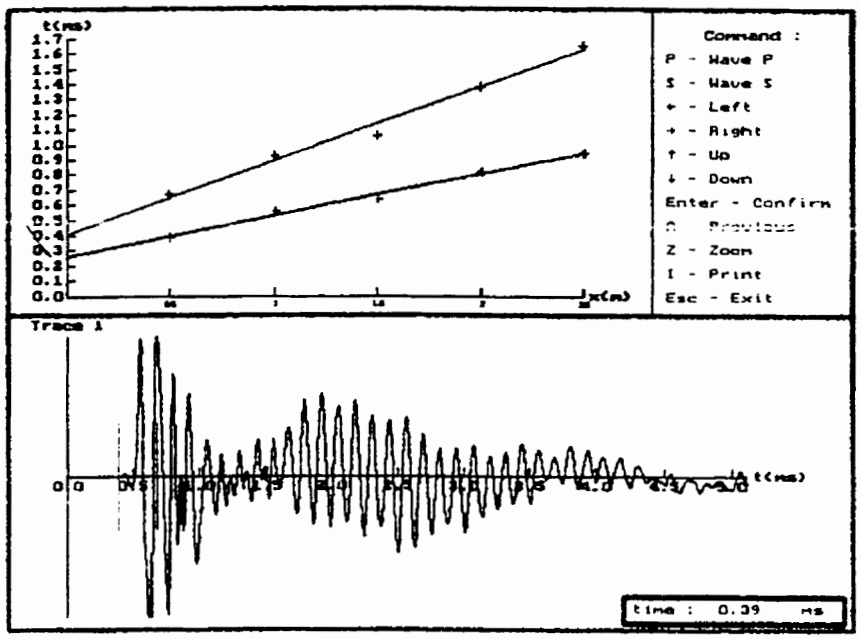
↑ : Déplace le curseur en haut avec le pas de 1 unité,

↓ : Déplace le curseur en bas avec le pas de 1 unité,

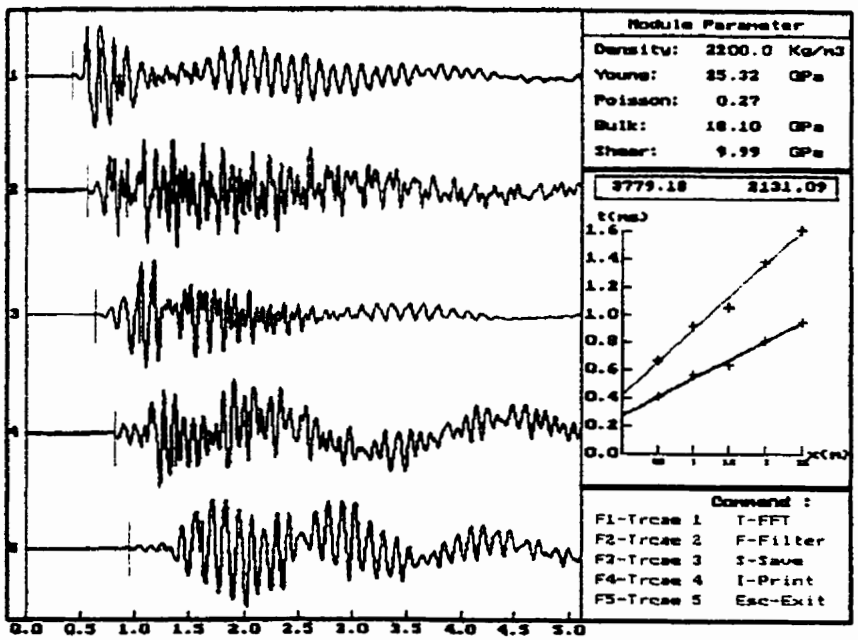
Enter : Validation de la modification.

Après chaque fois de la modification en déplaçant le curseur, l'opérateur doit valider son choix en appuyant la touche Enter.

L'opérateur peut répéter la même procédure de la modification jusqu'à ce que la position appréciée est trouvée. Il ne faut pas oublier que chaque fois de la modification, on doit appuyer la touche P ou S pour activer le curseur de déplacement.



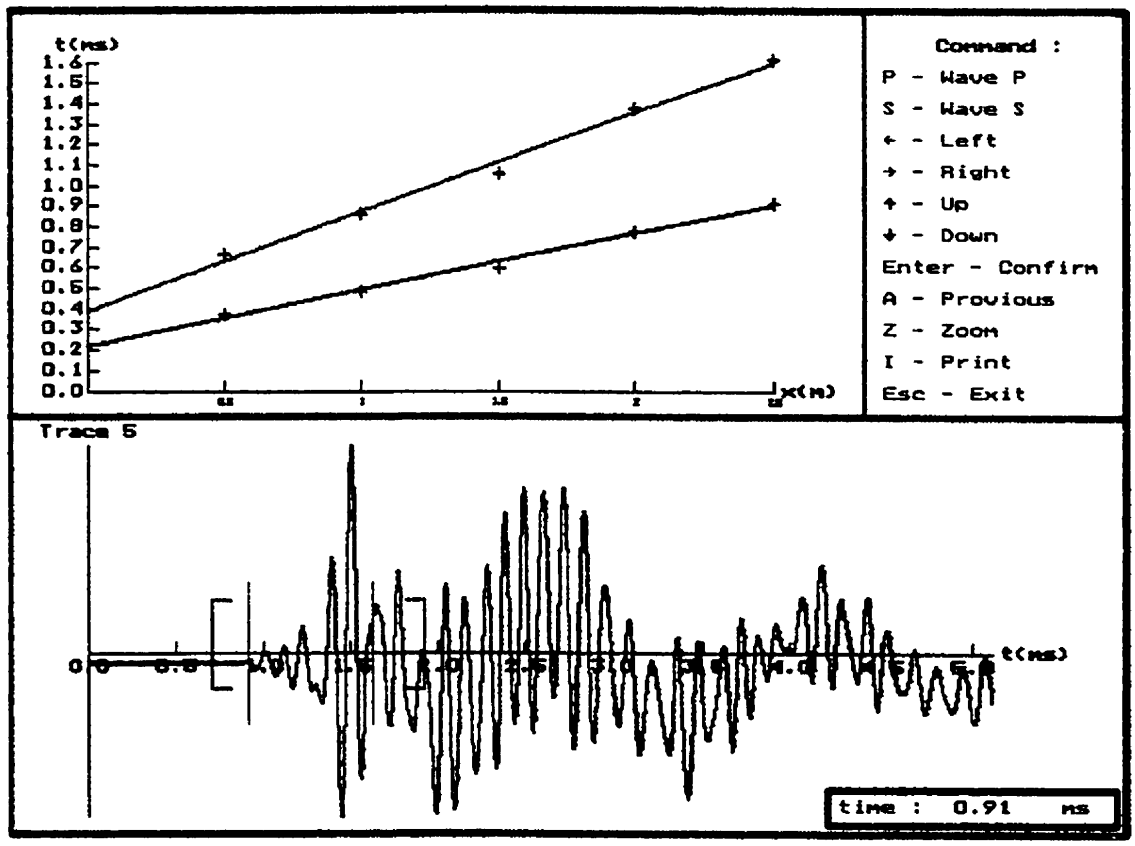
Après la validation de la modification, on voit que la forme de la courbe et la valeur de la vitesse sont changées. En appuyant la touche A pour returner à l'écran précédant. Les valeurs des modules dynamiques sont aussi modifiées.

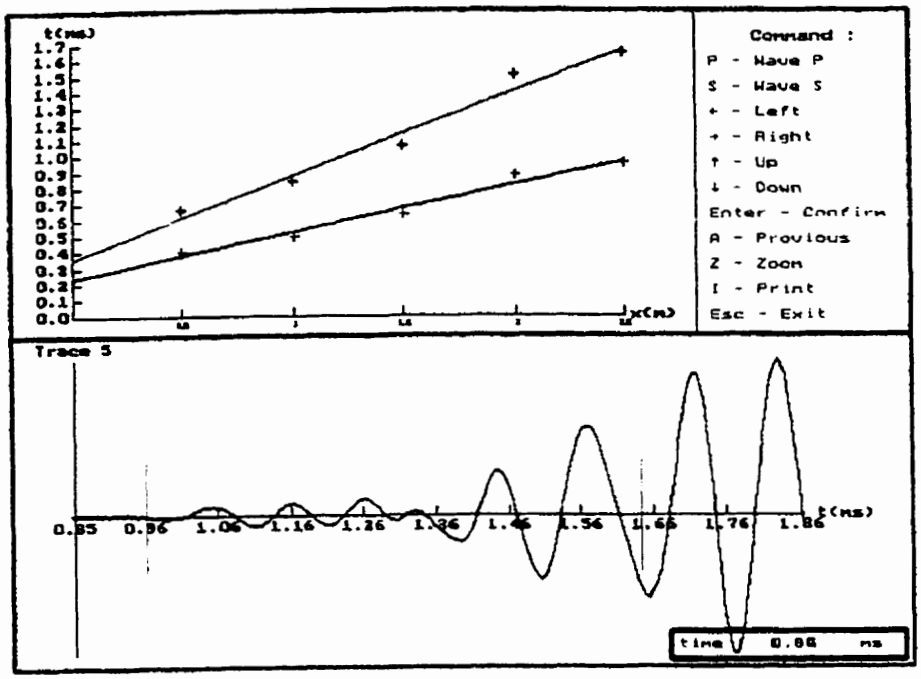


5.3.4 Zoom

Pour faciliter le cochage manuel de l'utilisateur, l'option de Zoom permet de grandir une partie du signal sur l'écran afin de bien visualiser la forme de l'onde.

Cette option est déclenché par l'appui de la touche et un crochet gauche apparait sur l'écran, l'opérateur déplace ce crochet dans une position comme le début de la partie à grandir et valide avec la touce ; **ensuite deuxième crochet apparait sur l'écran, on déplace ce crochet** dans une position comme la fin de la partie à grandir en utilisant les touches des déplacements et valide cette opération en appuyant la touche , **la partie du signal est affiché :**





5.3.5 Impression

L'opérateur peut imprimer l'écran sur une imprimante HP Paint-Jet en appuyant la touche .

5.3.6 Sauvegarde des résultats

Quand l'utilisateur termine l'opération de la modification et retourne à l'écran précédant, il doit sélectionner la commande de Save pour enregistrer les résultats des modifications dans un fichier "PARAM.TXT" à l'aide de la touche .

Le fichier "PARAM.TXT" contient les informations comme le nom de fichier, les chainages, la densité du milieu, les vitesses des ondes P et S ainsi que les valeurs des paramètres dynamiques du milieu.

5.3.7 Sortie

L'opération de la modification peut être interrompue par l'utilisateur en appuyant la touche .

ANNEXE B

Résultats microsismiques, viaduc Dickson

Viaduc DICKSON - Levés microsismiques

Dans le cadre d'un projet de recherche avec le CERIU, GPR et ses partenaires (Polytechniques, les universités de Sherbrooke, McGill et la Ville de Montréal) ont évalué plusieurs technologies non destructives, dont la microsismique. Pour exposer un cas pratique, nous présentons un plan montrant les vitesses obtenues par microsismique à tous les mètres sur les deux côtés du tablier du viaduc. Il ressort de ces résultats sismiques que les deux zones fortement endommagées ont pu être clairement identifiées par l'analyse de la variation de la vitesse des ondes "P".

Ces zones étaient déjà connues grâce à l'échantillonnage effectué par l'Université McGill et par la Ville de Montréal. La qualification des échantillons, qui se retrouve dans les rapports de M. Mirza, a été établie suite à l'analyse des parois des puits d'exploration tandis que pour les 21 échantillons prélevés en 1999, leur qualification provient d'une description visuelle.

Ces analyses de carottages et de parois ont été incorporées aux résultats microsismiques et démontrent clairement l'efficacité et la pertinence de la méthode microsismique. Des exemples d'enregistrement montrant la qualité du signal pour différents types de béton sont aussi inclus à titre informatif.

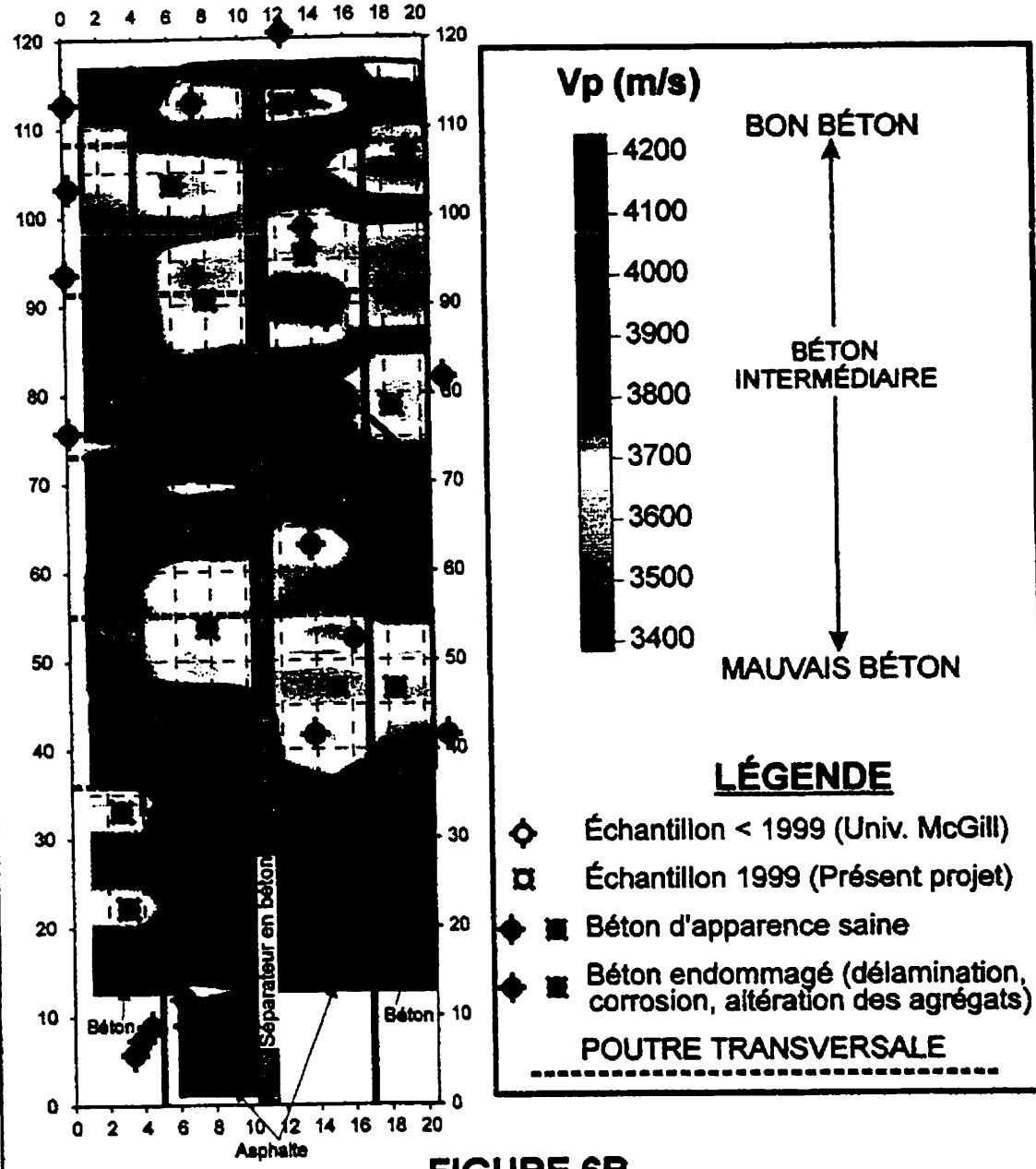


FIGURE 6B
VIADUC DICKSON, MONTRÉAL

CARACTÉRISATION DE L'ÉTAT DU BÉTON
À L'AIDE DU SYSTÈME MICROSISMIQUE
MICROSIS® MD-3

RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

GÉOPHYSIQUE GPR INTERNATIONAL INC. *JANVIER 2000*

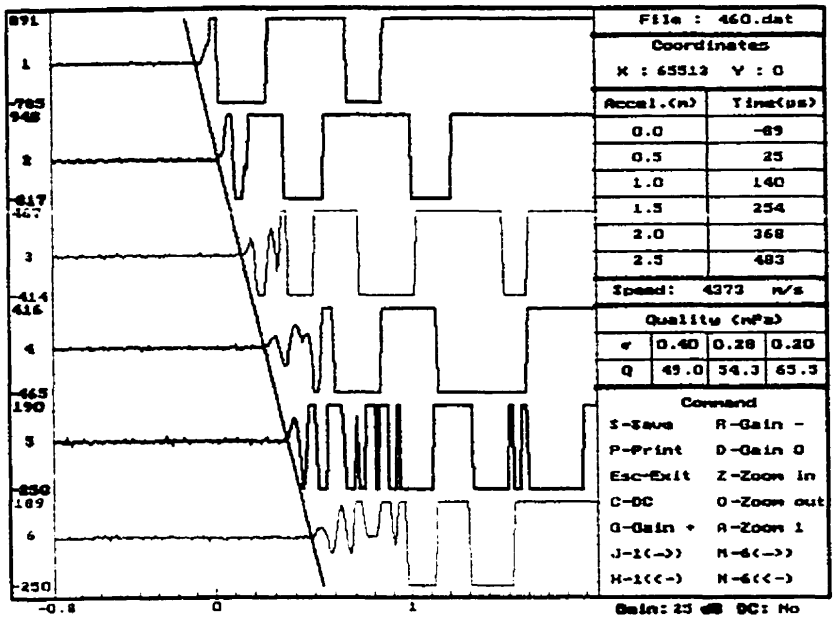


FIGURE B3 ENREGISTREMENT DU SYSTÈME MICROSIS® MD-3 DONNÉES BRUTES (X = 1 m à 3,5 m et Y=113 m)

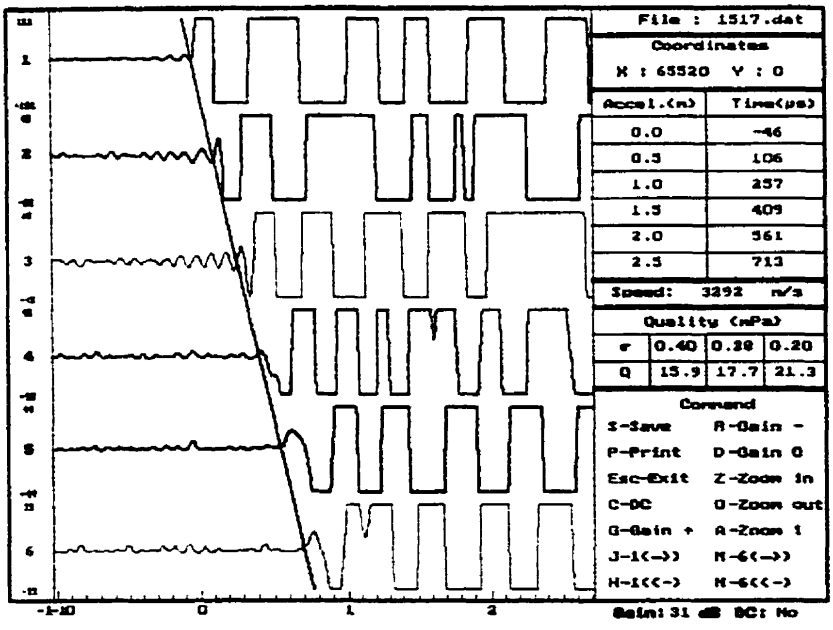


FIGURE B4 ENREGISTREMENT DU SYSTÈME MICROSIS® MD-3 DONNÉES FILTRÉES - PASSE BAS 20 KHz (X = 18 m à 20,5 m et Y=92 m)

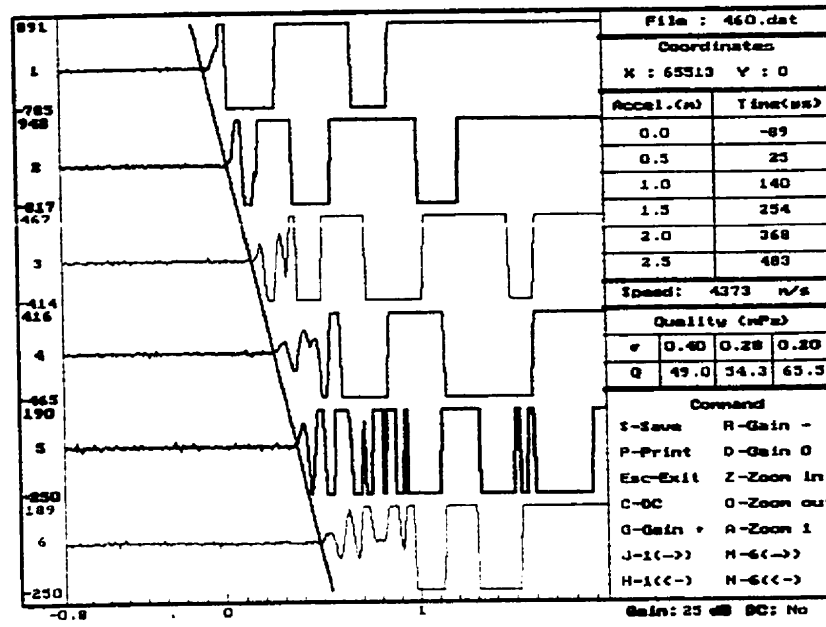


FIGURE B3 ENREGISTREMENT DU SYSTÈME MICROSIS® MD-3 DONNÉES BRUTES (X = 1 m à 3,5 m et Y=113 m)

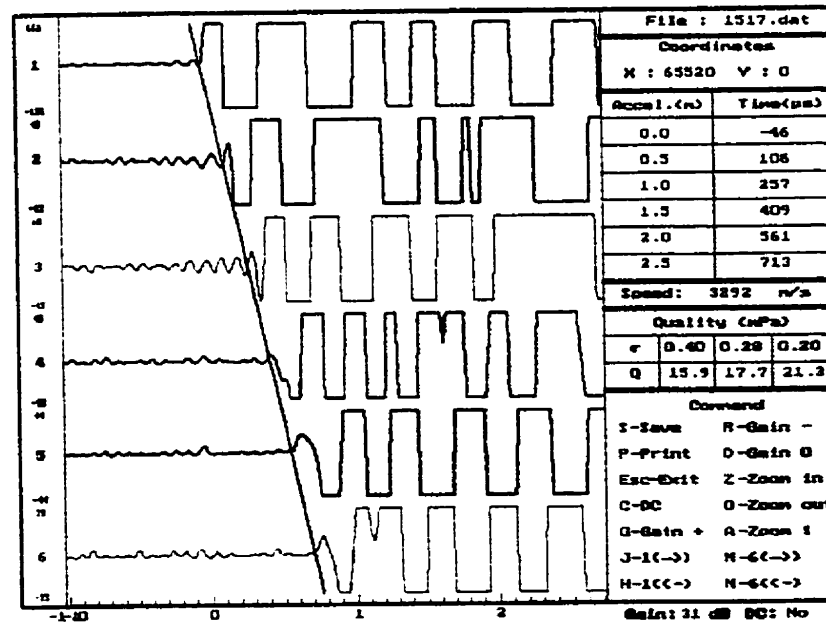


FIGURE B4 ENREGISTREMENT DU SYSTÈME MICROSIS® MD-3 DONNÉES FILTRÉES - PASSE BAS 20 KHz (X = 18 m à 20,5 m et Y=92 m)

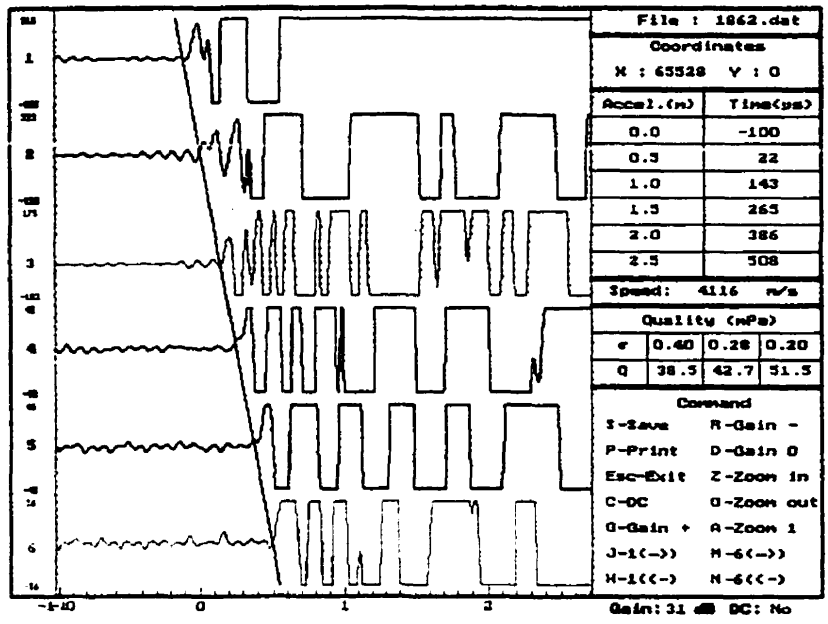


FIGURE B5 ENREGISTREMENT DU SYSTÈME MICROSIS® MD-3 DONNÉES FILTRÉES - PASSE BAS 20 KHz (X = 18 m à 20,5 m et Y=20 m)