

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté de génie

Département de génie civil

**AUSCULTATION NON DESTRUCTIVE DES
STRUCTURES EN BÉTON ATTEINTES PAR LA
RÉACTION ALCALIS-GRANULATS**

Mémoire de maîtrise

Spécialité : génie civil

Le Diem Quynh BUI

Jury : Patrice RIVARD (directeur)

Benoît FOURNIER

Serge Apedovi KODJO

Ammar YAHIA

Jean-François LATASTE

Sherbrooke (Québec) Canada

Septembre 2012

IV - 2266



Library and Archives
Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-93288-9

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-93288-9

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

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

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

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

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

RÉSUMÉ

Un nombre important de structures à travers le monde sont touchées par la réaction alcalis-silice (RAS), mais plusieurs points restent à valider concernant leur diagnostic. Il y a donc un besoin d'un moyen efficace d'identifier le problème, quantifier l'endommagement et faire le suivi des structures dans le temps afin de déterminer notamment l'efficacité des mesures de mitigation.

Le projet présenté dans ce mémoire met en relief les travaux de recherches menés dans le cadre d'un contrat de recherche avec le Federal Highway Administration des USA. L'objectif à moyen et long terme est d'élaborer un guide d'utilisation essais non destructifs sur les structures en service qui pourra être intégré à un protocole d'inspection. Ce projet a été scindé en deux parties complémentaires, soit une partie d'essais *in situ* et une partie en laboratoire où une nouvelle technique non linéaire du saut temporel a été étudiée.

La maniabilité et la sensibilité d'une combinaison de techniques acoustiques pour l'auscultation *in situ* ont été mises à l'épreuve sur des structures en service. Des ponts et viaducs autoroutiers dans le nord-est des États-Unis ont été évalués en utilisant l'impact-écho, la vitesse d'impulsions ultrasonores et le saut temporel, une nouveauté dans le contrôle non destructif. De ces trois techniques, quatre indicateurs ont été étudiés : vitesse provenant de la fréquence de résonance, la vitesse directe, la fréquence centroïde et le saut temporel.

Le saut temporel est une technique où des rafales ultrasonores de hautes fréquences balaient le matériau pendant qu'une onde élastique de basses fréquences perturbe le matériau et causant un délai dans la propagation des ultrasons. Contrairement aux autres techniques non linéaires très sensibles mais non applicables sur le terrain, le saut temporel semble pouvoir être utilisé efficacement sur les structures en service. La technique permet également d'évaluer des paramètres linéaires telle que la vitesse d'impulsions ultrasonores en plus du paramètre non linéaire.

L'étude a porté sur l'applicabilité à différents niveaux d'endommagement afin d'identifier les avantages et les limites de la technique ainsi que pour optimiser son utilisation avec différentes configurations de transmission. Les configurations indirecte et semi-directe ont été évaluées sur des échantillons de mortiers à différents niveaux d'endommagement généré par les cycles de gel-dégel. Les résultats ont démontré que le saut temporel est plus sensible lorsqu'utilisé en configuration de transmission indirecte, mais également beaucoup plus sensible que les indicateurs linéaires à l'initiation de l'endommagement. Sa sensibilité et sa versatilité (différents indicateurs pour différents niveaux d'endommagement) sont d'un grand intérêt pour l'évaluation rapide des structures.

Mots clés : acoustique non linéaire, réaction alcalis-granulats, ultrasons, béton, auscultation, infrastructures, saut temporel, endommagement

REMERCIEMENTS

Plusieurs personnes ont contribué à la réalisation de ce projet. En premier lieu, il a fallu que mon directeur de recherche, Patrice Rivard, décroche ce projet de recherche avec le Federal Highway Administration. Il m'a ainsi offert une opportunité de travailler en collaboration avec plusieurs autres universités canadiennes et américaine. C'est grâce à son appui que j'ai pu assister à plusieurs conférences et colloques scientifiques d'une valeur éducationnelle inestimable, mais aussi de présenter mes travaux dans deux de ceux-ci. Il m'a également beaucoup aidé au niveau logistique afin que je puisse compléter ma rédaction à distance.

Dans un deuxième temps, je dois souligner le grand apport de Serge Kodjo dont l'expertise, les connaissances et la curiosité m'ont permis de pousser les limites du projet et de développer une meilleure acuité scientifique. Il a été d'un grand support technique à tous les niveaux.

J'aimerais remercier les professeurs Benoît Fournier et Gérard Ballivy, le directeur du Groupe de recherche en auscultation et instrumentation, l'un pour ses commentaires précieux sur mes articles et l'autre pour ses commentaires sur ma démarche scientifique.

Évidemment, sans le support du personnel de soutien dont nos deux techniciens, Danick Charbonneau et Georges Lalonde, ainsi que notre secrétaire Nicole Laverdière, je n'aurais pu réaliser mes essais de terrains et en laboratoire et assister aux colloques et conférences. J'aimerais également remercier tous les étudiants du groupe, en particulier Ishak Medfouni, pour leur participation au projet.

Finalement, un gros merci à ma famille et à mes amis pour leur support et leur confiance. Un merci spécial à Jonathan et Xavier pour leur support moral et leurs encouragements.

Ce projet a été rendu possible grâce à l'appui financier du Federal Highway Administration ainsi que d'une bourse de Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB).

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1 – Introduction	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Définition du projet de recherche	2
1.3 Programme expérimental	3
CHAPITRE 2 – État de l’art	5
2.1 Le béton	5
2.1.1 Composition	5
2.1.2 Structure	5
2.1.3 Propriétés	5
2.2 La réaction alcalis-granulats (RAG)	6
2.3 Évaluation par méthodes physiques et mécaniques	9
2.3.1 Évaluation des propriétés mécaniques	9
2.3.2 Évaluations in-situ	10
2.3.3 Évaluation par pétrographie : <i>Damage Rating Index (DRI)</i>	11
2.3.4 L’essai de chargement cyclique (SDT)	12
2.3.5 Conclusion	12
2.4 Évaluation par méthodes non destructives	12
2.4.1 Les ondes acoustiques	13
2.4.2 L’acoustique linéaire	19
2.4.3 L’acoustique non linéaire	27
2.4.4 Conclusion	35
CHAPITRE 3 – Volet terrain : Validation des techniques	37
3.1 Méthodologie terrain	37

3.1.1	Équipement.....	37
3.1.2	Configurations de transmission.....	38
3.1.3	Indicateurs d'endommagement évalués	40
3.1.4	Structures auscultées	43
3.2	Résultats partiels.....	44
CHAPITRE 4 – Premier Article.....		49
4.1	Avant-propos	49
4.2	Introduction	51
4.3	Alkali-Silica Reaction.....	51
4.4	In-situ testing	52
4.4.1	Non destructive techniques	52
4.4.2	Equipment	55
4.4.3	Structures evaluated	56
4.5	Results and Discussion	58
4.5.1	Indirect Velocity.....	58
4.5.2	Direct Velocities.....	65
4.5.3	Peak frequency and Centroid Frequency	70
4.5.4	Time Shift.....	73
4.6	Conclusion	75
CHAPITRE 5 – Volet laboratoire : étude du saut temporel.....		79
5.1	Méthodologie.....	79
5.1.1	Préparation des échantillons.....	79
5.1.2	La technique du saut temporel	82
5.1.3	Programme d'essais.....	86
5.2	Résultats partiels.....	88

5.2.1	Paramètres optimaux d'essai et d'analyse	88
5.2.2	Essais UPV initiaux	89
5.2.3	Étude du signal semi-direct : essais sur échantillons en béton	91
5.2.4	La fréquence centroïde, indicateur d'endommagement	95
CHAPITRE 6 – Deuxième Article		99
6.1	Avant-propos	99
6.2	Introduction.....	101
6.3	Theoretical background	102
6.3.1	Wave Propagation at Interfaces with an Indirect and a Semi-direct Configuration 102	
6.3.2	Coda Wave Interferometry and Time Shift Technique	104
6.4	Test samples.....	106
6.4.1	Sample formulation and curing	106
6.4.2	Damaging process	107
6.5	Testing procedures	108
6.5.1	Experimental set-up.....	108
6.5.2	Data acquisition and processing	110
6.6	Results and discussion	111
6.6.1	Study of the Signal from a Semi-Direct Transmission Configuration	111
6.6.2	Repeatability.....	114
6.6.3	Reproducibility	118
6.6.4	Semi-Direct versus Indirect Transmission for Time-shift.....	119
6.6.5	Ultrasonic Pulse Velocity versus Time-shift Technique	122
6.7	Conclusions.....	123
CHAPITRE 7 – Conclusion		127

Liste des références 133

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Schématisation du processus itératif du projet de recherche	4
Figure 2.1 : Relation contrainte-déformation non linéaire du béton [Houde, 2007].....	6
Figure 2.2: Culée affectée par la RAG, Bangor, Maine, É.-U.	9
Figure 2.3: Propagation des ondes P et S [Al Wardany, 2005].....	13
Figure 2.4: Propagation des ondes Rayleigh et Love [Al Wardany, 2005]	15
Figure 2.5: Signal présentant les ondes coda	17
Figure 2.6: Un signal dans le domaine temporel et son spectre fréquentiel obtenu via une transformée de Fourier (FFT).....	19
Figure 2.7: Variation de la vitesse et de l'amplitude selon le niveau de dommage de cubes de mortier avec inclusions de vinyle [Chai <i>et al.</i> , 2011].....	23
Figure 2.8 : Disposition pour un test d'impact-écho avec capteur sans contact [Zhu et Popovics, 2007].....	27
Figure 2.9 : Système de joints dans un matériau hétérogène conférant la réponse non linéaire [Ostrovsky et Rudenko, 2009]	27
Figure 2.10 : Saut de la fréquence de résonance et l'effet de repli dus à une augmentation de l'amplitude de la sollicitation sur un matériau hétérogène [Kodjo, 2008].....	29
Figure 2.11 : Variation relative du carré de la fréquence de résonance durant le conditionnement [Kodjo <i>et al.</i> , 2011]	31
Figure 2.12 : Variation des ratios d'harmoniques a) de second et b) de troisième ordre avec l'endommagement pour différents niveaux de puissance d'entrée [Shah et Ribakov, 2009-b]	33
Figure 2.13 : Le saut temporel illustré par le décalage dans le temps des paquets d'onde avant et après impact [Kodjo, 2008].....	35
Figure 3.1 : Système Andescope©	38
Figure 3.2 : Les configurations de transmissions pour des essais acoustiques [The Constructor, 2011].....	39
Figure 3.3 : Mode de fonctionnement de l'impact-écho	40
Figure 3.4 : Temps d'arrivée de l'onde directe sur un signal en transmission.....	41
Figure 3.5 : Le spectre fréquentiel et la densité spectrale de puissance d'un signal en transmission indirecte.....	42

Figure 3.6: Une section traitée du pavage au Delaware	43
Figure 3.7 : Spectre fréquentiel provenant d'un essai sur pavage présentant un pic de basse fréquence	45
Figure 3.8 : Spectre fréquentiel provenant d'un essai sur pavage présentant plusieurs pics de haute fréquence.....	45
Figure 3.9 : Spectre fréquentiel généré avec (a) un boulon et (b) avec une bille d'acier.....	47
Figure 4.1: Structures investigated: wall 1, 2 and 3 (a,b,d), Columns (c), Piers (e) and Barrier walls (f).....	56
Figure 4.2 : A measuring point on a Pier. The area spans approximately 80 cm by 45 cm.	59
Figure 4.3: Indirect velocity vs. Surface Damage Index for (a) all the structures and (b) for the overpass structures with a smaller vertical scale	60
Figure 4.4: Indirect velocity vs. surface damage index for barrier walls.....	61
Figure 4.5: Testing panels configuration on abutment walls for Impact-Echo. The <i>Wing</i> portion of the structure is directly exposed to moisture, while the <i>Center</i> portion is protected from direct exposure to moisture, being under the bridge deck.	62
Figure 4.6: Impact-echo test result (a) before and (b) after <i>wavelets</i> processing.....	63
Figure 4.7: Classification of concrete on the three structures according to indirect velocity from impact-echo test.....	64
Figure 4.8: 2D representation of indirect velocities from impact-echo for Wall 2 (a) side panel (exposed to weather) and (b) center panel (protected from weather).....	64
Figure 4.9: Velocity in indirect transmission vs. Damage Index on walls, columns and piers in (a) 2010 and (b) 2011	67
Figure 4.10: Velocity in through transmission vs. Damage Index on the barrier walls in Vermont.....	68
Figure 4.11: Direct Velocity (UPV in through transmission) vs. Indirect Velocity (Impact-Echo) from barrier walls.....	69
Figure 4.12: (a) Peak frequency, (b) Centroid Frequency from signal's spectrum and (c) Centroid frequency from PSD vs. Surface Damage Index (2010 measurements)	71
Figure 4.13: Centroid Frequency from signal's spectrum vs. Surface Damage Index (2011 measurements).....	72
Figure 4.14: Time shift vs. surface damage index for 4 structures (2010 measurements).....	73

Figure 4.15: Time Shift vs. Surface Damage Index (2011 measurements)	74
Figure 4.16: Time Shift vs. Surface Damage Index regression line for indexes up to 45	75
Figure 5.1 : Fissuration à la surface de 4 échantillons après 34 cycles de gel-dégel	81
Figure 5.2: Dispositif pour impacter les échantillons.	83
Figure 5.3 : Configurations de transmission des transducteurs sur les échantillons en laboratoire.....	84
Figure 5.4 : L’interface du logiciel d’analyse ST Analyser	85
Figure 5.5 : Le saut temporel schématisé	86
Figure 5.6 : Échantillon de béton avec un vide de 10 cm en surface.	87
Figure 5.7. Essais en transmission semi-directe sur un échantillon avec vide en surface (a) vide vers le haut, (b) vide vers le bas.	93
Figure 5.8 : Signal en transmission semi-directe pour l’échantillon intact, avec un vide orienté vers le haut et avec un vide orienté vers le bas.	94
Figure 5.9 : Les fréquences centroïde de chaque échantillon à différents niveaux d’endommagement calculées à partir a) de la DSP et b) du spectre fréquentiel d’un signal en transmission semi-direct et c) du spectre fréquentiel d’un signal en transmission indirecte	96
Figure 6.1 : Semi-direct configuration with transducers placed on a Plexiglas wedge	103
Figure 6.2: Aggregate particles configuration in MA1 and MA2 samples.....	107
Figure 6.3: Experimental setup with indirect (a) and semi-Direct (b) configuration.....	109
Figure 6.4 : Signal of a semi-direct transmission on cement paste slab showing the four wave arrivals.....	111
Figure 6.5 : Signals in semi-direct transmission from (a) the MA0G01, (b) the MA0G11 and (c) the MA1G01 samples showing PD, PB, SD and SB-wave arrivals	113
Figure 6.6: (a) Time shifts of identified waves from 13 to 34 freeze-thaw cycles (b) Variation of time shifts from 13 to 34 freeze-thaw cycles for identified waves averaged from all 7 freeze-thaw samples	114
Figure 6.7 : Repeatability of time-shift when an MA1 is tested at 24 hours intervals in semi-direct transmission.....	115
Figure 6.8: Time shifts of an MA2-type of mortar after 13 cycles of freeze-thaw for 10 time-windows over the signal using semi-direct transmission with intervals of approximately 1 minute.....	116

Figure 6.9: The effect on time delay of a series of impacts striking a sample repeatedly.....	117
Figure 6.10: Time shifts evaluated as the difference of time delay between (a) the instants before and after the impact and (b) the difference between the initial state and the instant after each impact for 3 consecutive impacts (T1, T2 and T3).	118
Figure 6.11: Time shifts for the three MA2-type samples after 13 freeze-thaw cycles (a) in indirect transmission and (b) in semi-direct transmission	119
Figure 6.12 : Sum of time shifts over 10 time-windows for each sample at 4 levels of freeze thaw in (a) indirect transmission and (b) semi-direct transmission.....	120
Figure 6.13: Variation of (a) UPV and (b) time shift between 0 and 20 freeze-thaw cycles in indirect and semi-direct transmission	123

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Facteur de pondération pour chaque caractéristique de la méthode de DRI.....	11
Tableau 2.2 : Classification du béton selon la vitesse de l'onde P [Malhotra, 1976] [Whitehurst, 1951]	20
Tableau 2.3: Classification du granulat selon la vitesse d'une impulsion ultrasonore dans le béton [Solís-Carcaño et Moreno, 2008]	21
Tableau 2.4 : Influence du type de changement sur la moyenne et la variance de la perturbation du temps de vol [Snieder <i>et al.</i> , 2002]	34
Tableau 4.1 : Concrete classification based on ultrasonic pulse velocity [Malhotra, 1976] [Whitehurst, 1951]	53
Tableau 5.1 : Présence de particules de granulats dans les trois types d'échantillons.....	80
Tableau 5.2: Fissuration observables sur les échantillons suite à l'endommagement par gel- dégel.	81
Tableau 5.3 : Vitesses d'onde P et S avec différentes configurations avant gel-dégel (en italique, les échantillons ont été séchés à 100°C).....	91
Tableau 5.4 : Comparaison des temps d'arrivée calculés et observés pour les ondes P et S directes et l'onde S de volume.	92
Tableau 6.1 : Mortar Composition	106
Tableau 6.2 : Aggregates arrangement in the samples.....	106
Tableau 6.3: Observed width of cracks on samples put to freeze-thaw treatment. The samples mark by * were drought at 100°C	108
Tableau 6.4: Calculated and observed velocities and arrival times for the identified PD, SD, PB and SB waves	112
Tableau 6.5 : Variation of time shifts from 13 to 34 freeze-thaw cycles.....	121
Tableau 7.1 : Résumé des techniques étudiées et de leurs caractéristiques	128

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Le XX^e siècle a connu une poussée fulgurante de l'industrie automobile grâce à la chaîne de montage qui a permis la démocratisation de l'utilisation de ce véhicule. Pour répondre à cette poussée, le réseau routier s'est agrandi, étendu et amélioré. De nos jours, le Québec à lui seul compte 185 000 km de routes comprenant 12 000 ouvrages d'art, dont 4 700 ponts et viaducs (Transport Québec, 2011). Une grande quantité de ces ouvrages a été construit en béton et date de plus de 40 ans.

Le béton, un matériau qui a révolutionné le monde de la construction, comporte néanmoins des points faibles. C'est un matériau au comportement fragile qui a une très faible résistance à la traction. Il fissure sous l'effet des contraintes en service, des cycles gel-dégel, du retrait, etc. Un des processus de fissuration et de dégradation se nomme réaction alcalis-granulats (RAG). Cette réaction chimique affecte plusieurs types de structures (ponts, barrages, routes, etc.) et contribue à la ruine prématurée des ouvrages.

Depuis la découverte de la RAG, beaucoup de recherches ont été faites pour mieux comprendre le mécanisme et les facteurs d'influence. Il a été compris que trois éléments sont nécessaires à l'occurrence d'une RAG et qu'en jouant sur un de ces trois éléments, on peut désormais formuler des bétons mieux adaptés à cette réalité et réduire, voire éliminer, les risques de RAG. Cependant, un problème demeure : il existe encore une quantité innombrable de structures affectées par la RAG dans le parc routier mondial. La documentation sur ces vieilles structures étant souvent incomplète, il est difficile d'établir si elles sont sujettes à la RAG et à quelle intensité, des réponses qui auraient pu provenir de la formulation du béton et du type de granulat utilisé. Afin de poser une intervention appropriée, il faut être en mesure d'évaluer l'endommagement de ces structures.

Toutefois, une évaluation de l'état de la RAG dans ces structures comporte quelques contraintes, comme le fait de travailler sur des structures en service. Il faut donc conserver l'intégrité de l'ouvrage, minimiser la fermeture des voies de circulation, être en mesure de tirer des conclusions avec les résultats sans avoir les valeurs à l'état initial, etc. Dans cette mesure, le contrôle non destructif devient une voie intéressante car il permet de surveiller l'intégrité de l'ouvrage, permet un balayage plus complet de la structure dans un minimum de temps et, selon les techniques employées, ne nécessite pas de valeurs de référence.

1.2 Définition du projet de recherche

Le but ultime du projet est d'arriver à mettre de l'avant le contrôle non destructif comme méthode de détection et de suivi de la RAG sur les structures en évaluation en établissant un protocole de travail pouvant être appliqué par tout gestionnaire d'ouvrage ayant l'équipement nécessaire. Dans ce mémoire de maîtrise, il sera question de voir quelles méthodes sont envisageables pour une telle finalité et de déterminer le champ de pratique et les limitations de ces méthodes. Finalement, des recommandations doivent être données quant à l'utilisation des méthodes non destructives sur des ouvrages existants.

Malgré l'existence de plusieurs méthodes d'auscultation non destructives pour ce type d'endommagement, aucune d'entre elles n'est encore prouvée assez robuste et fiable pour des applications sur le terrain. C'est que le travail de terrain admet certaines contraintes telles, l'absence de données sur l'ouvrage en question, des géométries difficiles à travailler, des dimensions qui, par elles-mêmes, atténuent le signal, l'impossibilité d'avoir une valeur à zéro, beaucoup de bruit ambiant, des fenêtres de travail limitées, etc.

Dans cette optique, il faut se poser plusieurs questions :

- Est-ce possible d'évaluer l'endommagement par fissuration avec des méthodes non-destructive?
- Est-ce possible de le faire sur des structures existantes en service?
- Est-ce possible de le faire sans valeur à l'état initial de la structure?

- Est-ce possible par ces méthodes d'affirmer qu'il s'agit d'une RAG et non d'un autre type d'endommagement?

Il existe, en effet, de nombreuses techniques reposant sur l'acoustique non linéaire telles le saut de fréquence [Kodjo, 2008], la génération d'harmonique [Shah and Ribakov, 2009b] et la dynamique lente [Bentahar *et al.*, 2008] qui permettent de détecter la microfissuration dans le béton et de comparer le niveau de fissuration des bétons. D'autres techniques non destructives sont utilisées en chantier telles l'impact-écho, la vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV). Dans cette étude, un nombre limité de techniques a été sélectionné afin d'être mis à l'essai sur des structures en service. L'étude de ces techniques se décline en trois étapes, à savoir :

- 1) Une étude préliminaire de chaque technique suite à une application terrain afin de déterminer leurs champs d'application, les limitations et les perspectives possibles;
- 2) Des essais en laboratoire sur ces techniques afin d'identifier les paramètres optimaux d'utilisation;
- 3) Une validation terrain des recommandations résultant des deux premières étapes.

1.3 Programme expérimental

Parce que ce projet est très exploratoire et cherche à comprendre le fonctionnement de différentes techniques non destructives appliquées sur le béton dans un contexte *in situ*, la méthodologie appliquée est peu linéaire, mais ressemble plus à une boucle itérative où chaque résultat réoriente le programme expérimental (Figure 1.1 : Schématisation du processus itératif du projet de recherche).

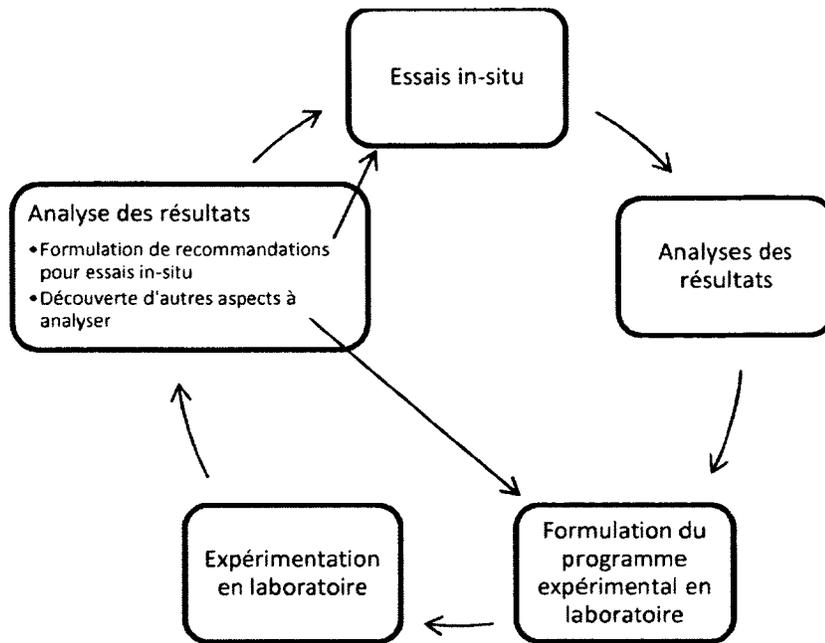


Figure 1.1 : Schématisation du processus itératif du projet de recherche

Cette approche permet une grande flexibilité et répond aux contraintes du volet terrain. En effet, parce que le projet s'inscrit dans un programme américain, il y a peu de mainmise de notre part sur le nombre de structures auscultées, le temps alloué aux campagnes d'évaluation et la fréquence des visites. Comme certains aspects du projet sont encore des nouveautés, cette approche itérative permet également d'explorer toutes les facettes d'intérêt sans compromis.

CHAPITRE 2

ÉTAT DE L'ART

2.1 Le béton

2.1.1 Composition

Le béton est un matériau composé principalement d'eau, de matériaux cimentaires et de granulats allant du sable fin à la roche concassée ou gravier naturel. De nos jours, il est devenu possible de composer des bétons dits binaires ou ternaires en remplaçant un volume de ciment par un autre matériau cimentaire comme les cendres volantes et la fumée de silice. Pour obtenir une meilleure maniabilité ou mise en place du béton sans ajouter trop d'eau, il existe également des adjuvants appelés superplastifiants ou agents fluidifiants. En effet, la technologie a permis le développement d'une gamme complète d'adjuvants pouvant modifier plusieurs propriétés du béton pour répondre à des besoins spécifiques.

2.1.2 Structure

Le béton est un matériau hétérogène de par sa structure composée d'une pâte de ciment poreuse et de particules granulats. Le ciment utilisé dans l'industrie est appelé ciment Portland. Le ciment est un liant hydraulique qui forme des hydrates stables en présence d'eau. Le principal hydrate qui confère la dureté et la rigidité au ciment, est le C-S-H (silicate de calcium hydraté). La matrice cimentaire est également composée de grains de ciment non-hydraté, d'espaces capillaires et de bulles d'air. Dans les pores capillaires et entre les feuilletts de C-S-H, il y a présence d'une solution interstitielle au pH très élevé (autour de 13) en raison de sa composition très forte en ions Na^+ et K^+ .

2.1.3 Propriétés

Le béton est un matériau fort utilisé en raison notamment de sa grande résistance à la compression. Toutefois, sa résistance à la traction est relativement faible, à l'instar du roc et autre matériaux de type céramique. Utilisé seul, le béton est reconnu comme ayant un comporte-

ment fragile (absence de déformation plastique avant rupture) et fissure facilement [Gagné, 2000].

Parce que le béton est un matériau hétérogène, son module d'élasticité n'est pas tout à fait linéaire (Figure 2.1), c'est-à-dire que sa rigidité varie en fonction de la charge imposée [Solodov *et al.*, 2011]. Pour les matériaux isotropes et homogènes, la relation contrainte-déformation est donnée par la loi de Hooke :

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.1)$$

Dans le cas du béton, la relation se complexifie avec l'introduction de termes de deuxième, troisième degré [Kodjo, 2008], etc. :

$$\sigma = E(\varepsilon + \beta\varepsilon^2 + \delta\varepsilon^3 + \dots) \quad (2.2)$$

Le béton possède des discontinuités au niveau microscopique, que cela soit de la fissuration, des interfaces pâte-granulat, des pores ou des vides. Ces discontinuités font en sorte que le béton présente des zones de faible rigidité dans une matrice dure, ce qu'on appelle système de joints. C'est ce système qui lui confère une forte réponse non linéaire absente dans les matériaux purement élastiques.

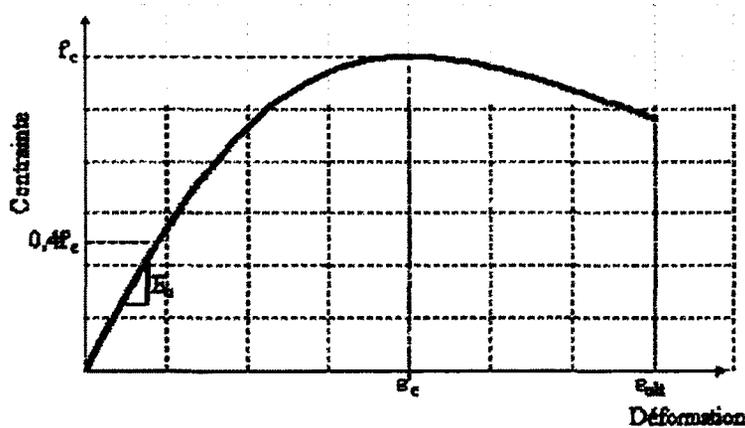


Figure 2.1 : Relation contrainte-déformation non linéaire du béton [Houde, 2007]

2.2 La réaction alcalis-granulats

Il existe deux types de RAG : la réaction alcalis-silice (RAS) et la réaction alcalis-carbonates (RAC). La réaction alcali-silice (RAS) est la plus répandue en Amérique du Nord [Fournier et

Bérubé, 2000]. Pour qu'une réaction ait lieu et perdure, il faut la combinaison de trois facteurs : la présence d'un granulats réactif, une concentration élevée d'hydroxydes alcalins dans la solution interstitielle du béton ainsi qu'un taux d'humidité relative dans le béton de plus de 80 %. Une RAS se produit globalement en trois temps :

- 1) Les granulats réagissent avec les hydroxydes alcalins (Na^+ , K^+ , OH^-);
- 2) La réaction produit un gel gonflant en présence d'humidité;
- 3) Le gonflement du gel induit l'expansion et la fissuration du béton.

Le gel produit par la réaction alcalis-silice peut présenter différentes compositions chimiques et divers degrés de viscosité. Un gel « frais » est souvent transparent en apparence et à la consistance de l'huile à moteur ou de la résine. Avec l'absorption de fluide interstitiel, ce gel peut se fluidifier et être en mesure de s'écouler dans les capillaires et remplir les pores et les vides, mais surtout le long des fissures qu'il génère dans la pâte [Poole, 1992]. Avec le temps et en la présence d'air, le gel va carbonater, durcir et devenir blanchâtre. Pour le moment, la relation entre la composition, la viscosité, la capacité à absorber l'eau ainsi que la pression que le gel peut développer sont encore peu compris et fort complexes. Les valeurs d'expansion varient de 4% à 80% sans un lien clair avec la composition tout comme la pression développée qui varie entre 0,5 MPa et 11 MPa [Poole, 1992]

La réactivité des granulats et des sables dépend de leurs compositions minéralogiques et de leurs structures cristallines. En effet, l'arrangement cristallin de la silice fait en sorte qu'elle est plus ou moins soluble ou plus ou moins réactive [Michel *et al.*, 2003]. Les formes les plus réactives sont les formes amorphes, désordonnées, micro- ou cryptocristalline [Fournier et Bérubé, 2000]. Comprendre la structure cristalline des phases minérales qui composent les granulats réactifs est d'intérêt car les méthodes d'auscultation acoustiques peuvent être sensibles à la structure du matériau.

Des facteurs environnementaux peuvent également influencer le développement de la RAG et ses effets. Les cycles de mouillage-séchage ralentissent l'expansion du béton en surface. Du coup, l'expansion différentielle entre le cœur et la surface accentuent la macrofissuration. Les

cycles gel-dégel, quant à eux, accentuent l'expansion et la fissuration de surface [Fournier et Bérubé, 2000].

Les effets de la RAG sur les propriétés mécaniques du béton se traduisent par une diminution des modules de Young statique et dynamique, de la résistance en traction et de la résistance en flexion [Swamy, 1997]. La résistance à la compression est généralement peu affectée à moins d'atteindre de forts niveaux d'expansion [Sargolzahe *et al.*, 2010]. Par ailleurs, on a remarqué que la RAG a un effet plus important sur la rigidité du béton que sur la microfissuration [Swamy, 1992]. L'expansion engendrée par la réaction impose également une contrainte non-négligeable sur les aciers d'armature. Selon Hobbs [1988], une expansion globale d'un élément structural de l'ordre de 0,12 % à 0,15 % amène l'acier vers la déformation inélastique. Ainsi, l'ajout de charge vive peut conduire à des déflexions irréversibles. De plus, au-delà de 0,15 % d'expansion, il y a concentrations des contraintes dans les cadres dues à la distorsion géométrique différentielle ou au transfert des forces à travers les joints [Hobbs, 1988].

Il est plus rare pour des structures affectées par la RAG de nécessiter un remplacement ou une réparation substantielle [Sims, 1992], sauf dans le cas de certains barrages (ex. : centrale de Mactaquac, Nouveau-Brunswick). Aucune structure connue n'a encore défailli à cause de la RAG seulement. Ainsi, une gestion par suivi et actions mitigatives (scellement, renforcement, confinement) peut suffire dans la majorité des cas.

Quatre signes visuels permettent généralement d'émettre une hypothèse d'attaque par la RAG lorsque celle-ci est suffisamment avancée (Figure 2.2):

- 1) Présence de fissuration polygonale ou dans le sens des contraintes principales (armatures);
- 2) Exsudation du gel de silice laissant des traces blanchâtres à la surface de l'élément affecté;
- 3) Taches brunâtres au niveau des fissures;
- 4) Désalignement et/ou déplacement de la structure du au gonflement [Fournier et Bérubé, 2000].

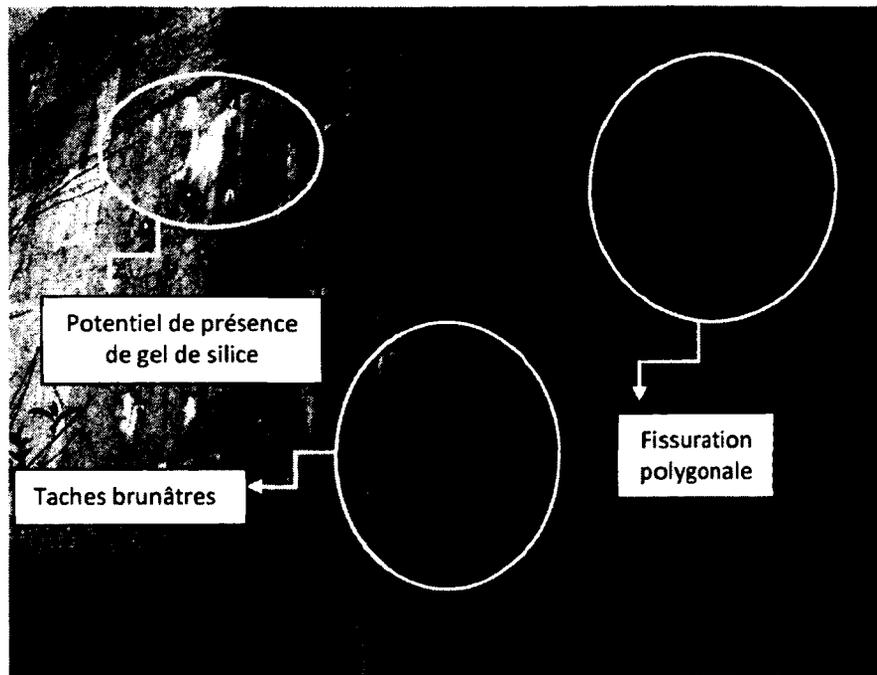


Figure 2.2: Culée affectée par la RAG, Bangor, Maine, É.-U.

Deux problèmes se posent dans l'évaluation visuelle. Premièrement, elle ne permet pas de confirmer une RAG de façon définitive (un examen pétrographique pratiqué sur une carotte de forage est alors nécessaire). Deuxièmement, lorsque les signes de RAG deviennent visibles, d'autres problèmes de durabilité peuvent déjà avoir été engendrés.

2.3 Évaluation par méthodes physiques et mécaniques

Des méthodes traditionnelles d'évaluation ont été mises en place afin de diagnostiquer la RAG sur les structures en service. Certaines ont recours à une observation visuelle des patrons de fissuration, d'autres ont recours à des essais sur carottes.

2.3.1 Évaluation des propriétés mécaniques

L'évaluation des effets de la RAG peut se faire à travers une évaluation du module d'élasticité ou de la résistance du béton à la traction ou à la flexion. Des études ont montré que le module d'élasticité dynamique enregistre des pertes mesurables avant même qu'une expansion significative n'ait eu lieu [Swamy, 1997] [Sargolzahi *et al.*, 2010]. Toutefois, pour ce type

d'évaluation, il faut carotter la structure autant dans les zones saines que dégradées afin d'avoir des références pour la comparaison.

2.3.2 Évaluations in-situ

Parmi les différentes mesures pouvant être prises pour caractériser un béton sujet à la RAG, la première est le taux d'humidité interne à différentes profondeurs et dans différentes membrures afin de déterminer la zone d'équilibre interne [Bérubé *et al.*, 2005]. L'humidité étant un des trois facteurs nécessaires à la RAG, en tenir compte est important, mais en complément à d'autres mesures. Il va de soi que dans les structures de grand volume, cette méthode est peu applicable.

La cartographie des fissures de surface (ou méthode de fissuration de surface) afin de définir les patrons de fissuration, la taille et l'ouverture des fissures est une autre technique d'évaluation de la RAG qui mesure l'expansion de la structure de façon indirecte [Smaoui *et al.*, 2004-a]. Cependant, il a été conclu que cette technique peut mener à de fausses conclusions car elle est extrêmement sujette aux conditions météorologiques, environnementales et autres problèmes de durabilité [Swamy, 1997, Smaoui *et al.*, 2004-b] et ce, malgré des estimations satisfaisantes sur certaines structures en service. Afin d'obtenir des mesures de terrain représentatives de l'expansion, ces mesures doivent se faire sur les surfaces les plus endommagées visuellement [Bérubé *et al.*, 2005]. Une deuxième technique est la mesure du taux d'expansion avec des plots insérés dans l'ouvrage. Bien que cette technique permette une mesure plus directe de l'expansion, il faut plusieurs mesures espacées dans le temps pour calculer le taux d'expansion et compenser pour les variations climatiques au moment des mesures. La période d'attente peut être très longue avant de détecter une expansion intéressante [Bérubé, 2005].

D'autres instruments tels les extensomètres, les inclinomètres et les cordes vibrantes permettent de mesurer les mouvements, déflexions et déformations. Ces mesures doivent se faire sur un long intervalle de temps comme les méthodes de suivi afin d'enregistrer des changements et les instruments doivent parfois être mis en place au moment de la coulée du béton (cordes vibrantes).

Il a été question dans la section 2.2 des contraintes induites dans les aciers d'armature par l'expansion du béton. Ces contraintes peuvent également être mesurées afin de déduire la déformation subie par le béton. Cette technique demande une mise en place complexe et ne convient pas toujours à des structures autoroutières, pour lesquelles dégager les barres d'armatures peut compromettre la durabilité [Gagné, 2000].

2.3.3 Évaluation par pétrographie : *Damage Rating Index (DRI)*

L'indice d'endommagement pétrographique est le résultat d'une étude des signes d'endommagement sur une aire quadrillée définie d'une surface de carotte polie. Chaque type d'endommagement correspond à un facteur de pondération et plus l'endommagement est étroitement associé à la RAG, plus la pondération est élevée (Tableau 2.1 : Facteur de pondération pour chaque caractéristique de la méthode de DRI. La somme pondérée de tous les endommagements est ensuite normalisée à une surface de 100 cm² [Fournier et Bérubé, 2000] [Rivard et Ballivy, 2005] [Sargolzahi *et al.*, 2010].

Tableau 2.1 : Facteur de pondération pour chaque caractéristique de la méthode de DRI

Caractéristique	Facteur de pondération
Fissure fermée dans le granulat	0.75
Fissure ouverte dans le granulat	4
Fissure avec gel dans le granulat	2
Granulat décollé	3
Ceinture de réaction autour du granulat (<i>reaction rim</i>)	0.5
Fissure dans la matrice cimentaire	2
Fissure avec gel dans la matrice cimentaire	4
Vide contenant du gel	0.5

Des études ont démontré que cette méthode estimait bien l'expansion des prismes de béton en laboratoire [Rivard et Ballivy, 2005]. Pour identifier la RAG, il s'agit d'une des méthodes les plus efficaces car elle se base sur un endommagement caractéristique à la RAG. Beaucoup d'information peut être tirée d'un examen pétrographique comme celui-ci. Toutefois, parce que l'évaluation est localisée à un forage et une profondeur, l'évaluation quantitative est plus sujette à erreurs. Afin de bien évaluer l'expansion et l'état de dégradation d'une structure, il faudrait plusieurs forages à différentes profondeurs pour bien couvrir l'entièreté de la struc-

ture. Ce type d'analyse pétrographique prend néanmoins beaucoup de temps et requiert un pétrographe expérimenté.

2.3.4 L'essai de chargement cyclique (SDT)

L'essai de chargement cyclique utilise 5 cycles de chargement de 0 à 5,5 MPa (essai standard) afin de définir une courbe contrainte-déformation du matériau. L'aire de l'hystérésis produite permet de déterminer la quantité d'énergie dissipée qui, elle, est fonction du degré de fissuration/expansion du matériau dans le sens de chargement [Smaoui *et al.*, 2004-a].

Pour le SDT, il a été observé que l'essai est sensible au type de granulat en place. Les résultats peuvent donc varier entre deux bétons ayant le même taux d'expansion. De plus, il s'agit d'une évaluation localisée avec une orientation préférentielle. Le choix des lieux d'échantillonnage est donc important. Il demeure que le SDT est l'essai ayant obtenu les résultats les plus constants lors des essais de Smaoui *et al.* [2004b].

2.3.5 Conclusion

Ce petit tour d'horizon a permis de voir les différentes techniques présentement utilisées par les chercheurs qui se penchent sur le problème de la RAG sur le terrain. On a pu voir que chaque méthode possède une partie de l'information, mais qu'elles possèdent également des désavantages quant à la fiabilité, la facilité à appliquer et l'efficacité. Souvent, ces méthodes seront utilisées de façon complémentaire afin de diminuer les imprécisions et la subjectivité de chacune prise individuellement.

2.4 Évaluation par méthodes non destructives

En ce qui concerne les essais non destructifs pour l'évaluation de RAG, il existe une panoplie de méthode allant du marteau rebondissant (scléromètre) à la thermographie, le radar et les rayons X. Toutefois, toutes ne sont pas adaptées au type d'endommagement à l'étude. Pour la microfissuration et la dégradation générale du béton, les méthodes acoustiques sont préconisées.

2.4.1 Les ondes acoustiques

La physique admet trois types d'ondes mécaniques, soit:

- L'onde P ou onde longitudinale ou onde de compression (Figure 2.3);
- L'onde S ou onde transversale ou onde de cisaillement (**Error! Reference source not found.**);
- Les ondes de surface.

En réalité, tous les milieux dans lesquels ces ondes voyagent possèdent une géométrie et des hétérogénéités (vides, fissures, granulats, etc.) qui réfléchissent, diffusent et atténuent une partie des ondes transmises. De ces réflexions multiples naissent les ondes secondaires qui constituent la queue du signal.

A) Les ondes de corps P et S

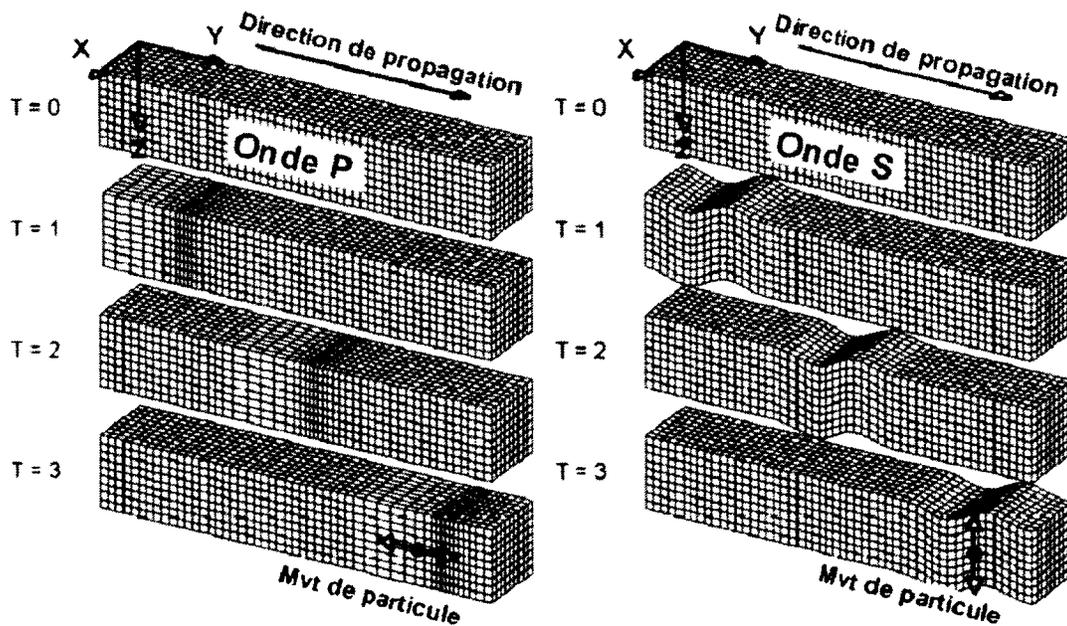


Figure 2.3: Propagation des ondes P et S [Al Wardany, 2005]

L'onde P est une onde de compression se propageant dans le corps du matériau. La propagation de l'onde se fait grâce à la compression des particules dans la direction de propagation,

amenant des variations de densité de façon localisée. Cette onde peut voyager dans les trois états de la matière (solide, liquide et gaz).

Sa vitesse est gouvernée par la loi suivante :

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (2.3)$$

où V_p est la vitesse de l'onde P, E est le module d'élasticité et ν est le coefficient de Poisson [Towhata, 2008]. Cette équation explique pourquoi le module de Young est un indicateur plus sensible à la fissuration ou l'expansion que la vitesse de l'onde, la vitesse étant gouvernée et par le module de Young, et par le coefficient de Poisson.

Dans les massifs rocheux intacts, cette vitesse se situe autour de 5000 m/s [Towhata, 2008]. Dans un béton sain, sa vitesse varie autour de ~4000 m/s et peut aller au-delà de 4500 m/s [Malhotra, 1976] [Whitehurst, 1951]. En exploration géophysique, on utilise V_p pour déterminer le module de Young en fixant le coefficient de Poisson entre 0,25 et 0,30. La vitesse augmente avec l'augmentation du coefficient de Poisson. L'onde P transporte environ 7% de l'énergie dissipée lors d'un impact [Schubert et Kohler, 2008].

L'onde S est une onde de cisaillement se propageant seulement dans le corps des matériaux solides; elle n'existe pas dans les fluides. Le mouvement des particules pendant la propagation de l'onde se fait transversalement à la direction de propagation.

L'onde S est en fait composée de deux mouvements transversaux, soit un mouvement vertical comme présenté à la Figure 2.3 et un mouvement horizontal. On retrouve ainsi la dénomination SH et SV dans certaines références [Towhata, 2008].

Sa vitesse est gouvernée par l'équation suivante :

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.4)$$

G étant le module de cisaillement du matériau et ρ est sa masse volumique.

Sa vitesse est habituellement de l'ordre 3000 m/s dans les massifs rocheux intacts [Towhata, 2008]. L'énergie de l'onde S compte pour 24% de l'énergie déployée lors d'un impact [Schubert et Kohler, 2008]. Cette plus grande énergie signifie une plus grande facilité à détecter l'onde dans différentes conditions. Il devient donc intéressant de pouvoir l'exploiter en auscultation acoustique.

B) Les ondes de surface

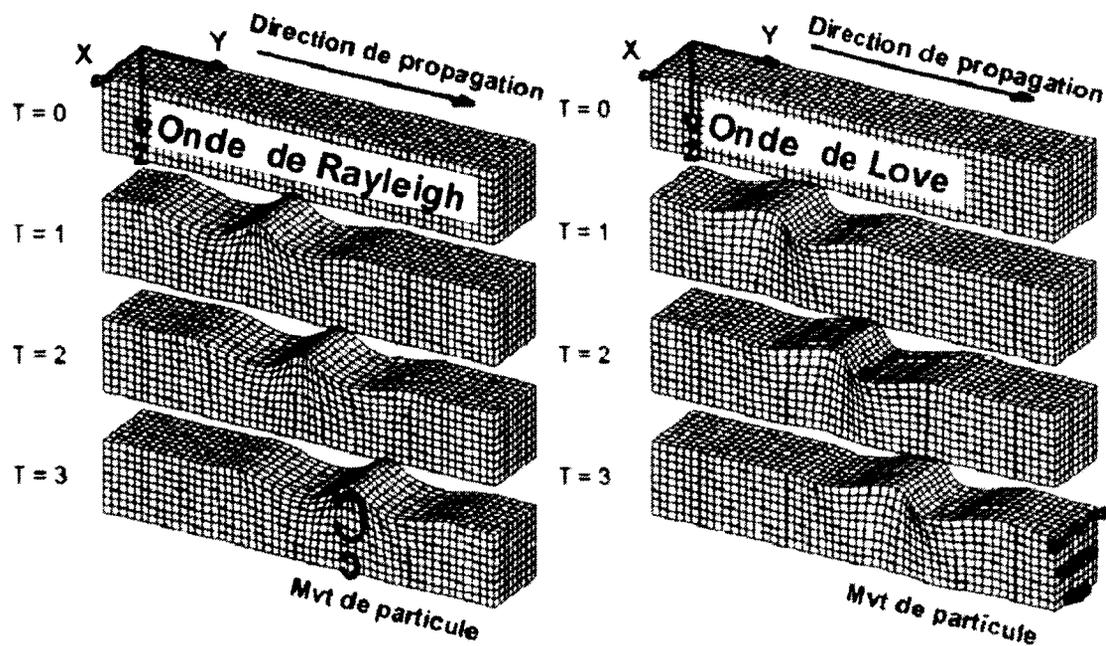
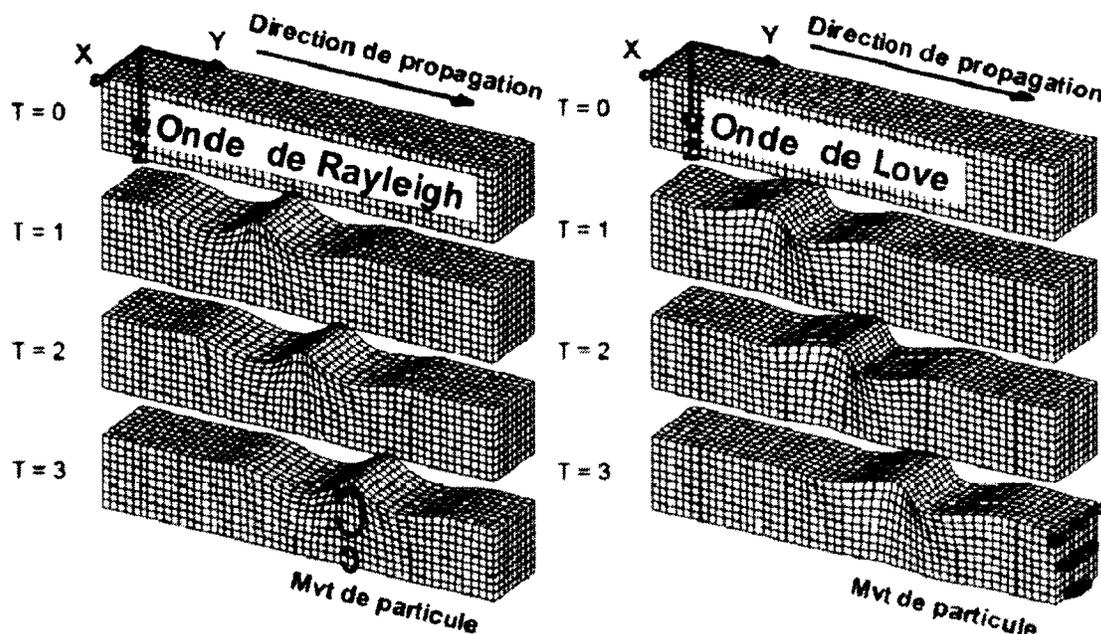


Figure 2.4: Propagation des ondes Rayleigh et Love [Al Wardany, 2005]

Les ondes de surface se présentent sous deux formes, soit des ondes Rayleigh, des ondes de Lambs ou des ondes Love (



L'onde Love se manifeste généralement en présence d'un matériau moins rigide sur un substrat rigide. C'est en fait la projection de l'onde S sur un plan en surface. La vitesse de cette onde varie en fonction de sa fréquence également. Ce type d'onde commence tout juste à être utilisée en contrôle non destructif (CND) car sa génération et détection demeurent complexe [Kielczyrski, 1997]. Parce que l'onde Love est générée sur des matériaux viscoélastiques en couches, les applications sur le béton sont improbables.

C) Les ondes secondaires

Les ondes secondaires proviennent de la diffusion des ondes primaires (P et S) sur les parois ou hétérogénéités du matériau. En sismologie, l'onde résultant de la superposition de ces ondes secondaires en fin de signal est appelée *coda* (Figure 2.5) [Herraiz et Espinosa, 1987]. Par leur nature hautement répétable, les ondes coda sont utilisées pour détecter les changements dans le milieu de propagation. On dit également qu'elles parcourent un plus grand volume du médium [Snieder 2004].

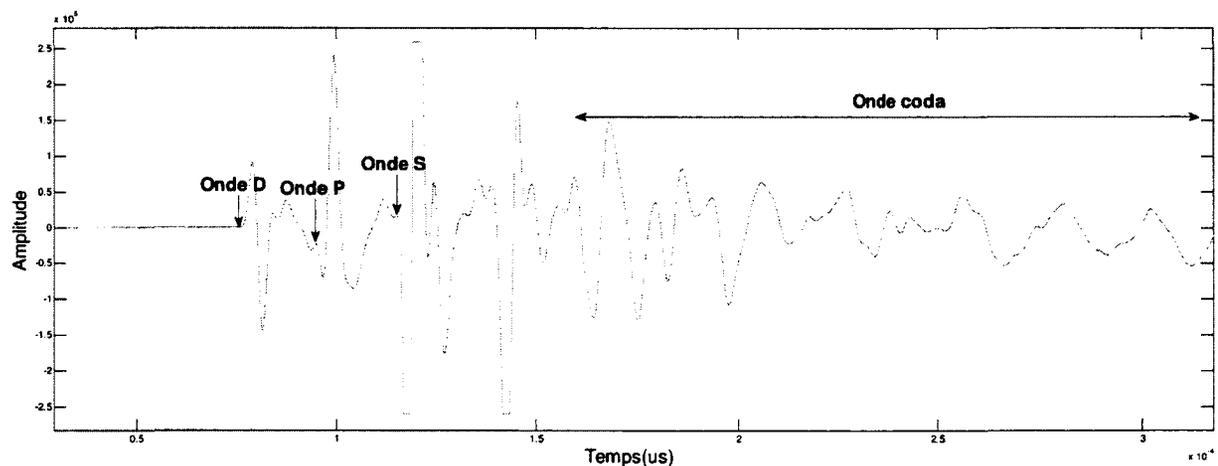


Figure 2.5: Signal présentant les ondes coda

Malgré sa dénomination différente, l'onde coda n'est qu'une résultante de la superposition d'onde S et P. Aki et Chouet [1975] assument que la fraction d'onde de cisaillement est dominante et cela a été démontré mathématiquement par Snieder *et al.* [2002].

Aki et Chouet [1975] ont observé que le facteur de qualité des ondes coda augmente en fonction de la fréquence. En étudiant l'atténuation des ondes de haute fréquence S sans recours à

un modèle de diffusion, il a été observé que le facteur de qualité des ondes S dépend également de la fréquence, ce qui appuie l'hypothèse que la coda est principalement constituée de conversion S-S rétrodiffusées. La rétrodiffusion est affaiblie lorsque les ondes sont de faibles fréquences [Herraiz et Espinosa, 1987].

Les ondes de rétrodiffusion sont plus sensibles aux différences d'impédance alors que les ondes de diffusion avant (ondes primaires) sont plus sensibles aux gradients de vitesse. Les ondes de première arrivée sont de plus hautes fréquences et sont fortement affectées en amplitude et en phase par les hétérogénéités. Cela est intéressant pour un matériau de nature homogène car en étudiant les variations d'amplitudes, on peut évaluer les défauts. Toutefois, pour un matériau de nature hétérogène comme le béton, l'atténuation résultante peut rendre difficile l'analyse des signaux captés.

2.4.2 L'acoustique linéaire

Des méthodes d'acoustique linéaire existent depuis plus de 40 ans pour ausculter des matériaux de toutes sortes [Popovics et Popovics, 1992] en évaluant soit la vitesse ou l'atténuation de la propagation d'ondes de surface ou de volume, soit en mesurant la fréquence de résonance du matériau. Ces méthodes sont intéressantes, car relativement faciles à utiliser et relativement faciles à interpréter dans le domaine temporel autant que fréquentiel grâce aux transformées de Fourier (Figure 2.6). La vitesse d'impulsion ultrasonore (*ultrasonic pulse velocity*), la fréquence de résonance fondamentale (mise en résonance d'un élément de béton avec des transducteurs piézoélectriques) et l'impact-écho (mise en résonance d'un élément de béton par impact mécanique) sont des méthodes couramment utilisées pour évaluer globalement la qualité du béton.

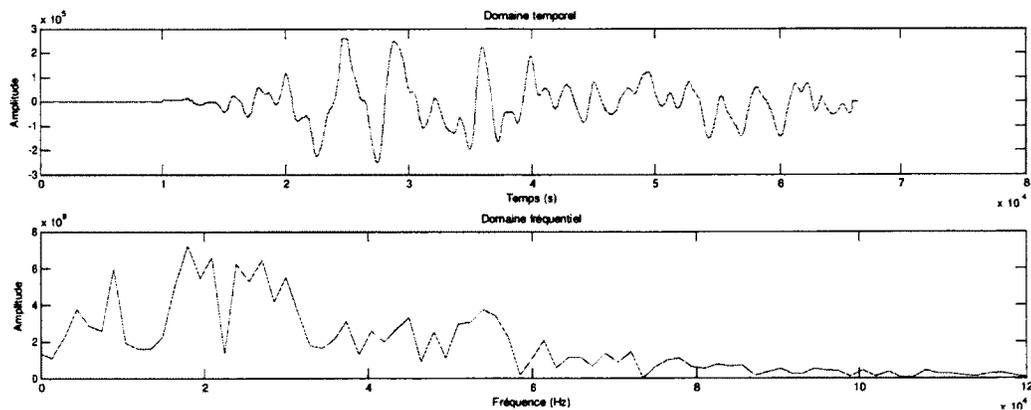


Figure 2.6: Un signal dans le domaine temporel et son spectre fréquentiel obtenu via une transformée de Fourier (FFT)

A) Vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV)

La technique de vitesse d'impulsion ultrasonore consiste à envoyer des ondes longitudinales ultrasonores dans le matériau et à capter ces ondes sur une distance déterminée. En divisant le temps de vol des ondes sur la distance entre l'émetteur et le récepteur, nous obtenons la vitesse de propagation des ondes P. Elle est largement utilisée depuis plusieurs dizaines d'années pour estimer la résistance du béton à jeune âge et est normalisée selon la norme ASTM C597-02.

Plusieurs systèmes de classification de la qualité du béton selon la vitesse existent. Le plus commun est celui présenté au Tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Classification du béton selon la vitesse de l'onde P [Malhotra, 1976] [Whitehurst, 1951]

Vitesse de propagation (m/s)	Qualité du béton
$V > 4575$	Excellent
$4575 > V > 3660$	Bon
$3660 > V > 3050$	Passable
$3050 > V > 2135$	Mauvais
$V < 2135$	Très mauvais

Cette technique a le potentiel d'évaluer la résistance à la compression, à la fracture ainsi que le module d'élasticité dynamique [Prassianakis et Prassianakis, 2004]. Toutefois, les résultats d'évaluation du module dynamique ont eu des écarts de l'ordre de 8% par rapport aux essais destructifs dans l'étude de Prassianakis et Prassianakis. Dans une autre étude, on a pu voir que pour une même résistance à la compression, la vitesse varie avec la qualité du granulat [Solís-Carcaño et Moreno, 2008]. Ces auteurs ont évalué la qualité de granulats de calcaire suivant 8 critères leur permettant d'attribuer un facteur de qualité à chaque type de granulat. Ils ont remarqué d'excellentes corrélations entre la vitesse et la résistance à la compression du béton pour les granulats de qualité semblable. Ils sont parvenus à établir une correspondance entre vitesse, qualité du granulat et qualité du béton, questionnable étant un béton de moins de 20 MPa, bon pour une résistance entre 20 et 28 MPa et très bon pour des résistances supérieures à 28 MPa (Tableau 2.3). Toutefois, pour des structures en service, il est souvent difficile de déterminer la qualité du granulat.

Tableau 2.3: Classification du granulat selon la vitesse d'une impulsion ultrasonore dans le béton [Solís-Carcaño et Moreno, 2008]

Vitesse de propagation (m/s)	Qualité du granulat		
	Basse	Moyenne	Haute
$V < 3500$	Questionnable	Questionnable	Questionnable
$3500 < V < 3700$	Bon	Questionnable	Questionnable
$3700 < V < 3900$	Très bon	Bon	Questionnable
$3900 < V < 4100$	Très bon	Très bon	Bon
$V > 4100$	Très bon	Très bon	Très bon

En effet, les résultats de vitesses dépendent de plusieurs facteurs dont les propriétés et proportions des constituants du béton, l'âge du béton, la présence de microfissures, l'humidité et la température du béton ainsi que la présence d'armatures [Huang *et al.*, 2011]. De plus, il a été observé qu'un échantillon provenant d'une structure en service ne présente pas nécessairement de corrélation entre ses caractéristiques physiques et mécaniques à l'opposé des échantillons dégradés en laboratoire [Rivard et Saint-Pierre, 2009].

Dans une revue des normes internationales concernant l'UPV, Komlos *et al.* [1996] relèvent les faiblesses des normes quant à la façon d'appliquer les résultats. En effet, plusieurs normes proposent des équations pour calculer le module élastique du matériau. Alors que ces formules sont exactes pour des matériaux linéaires (dont la relation contrainte-déformation est linéaire) et homogènes, ce n'est pas le cas pour le béton. Ils déplorent également le fait que ces normes listent des applications potentielles de l'essai sans mettre en garde contre les incertitudes inhérentes. Selon Komlos *et al.*, les seules applications souhaitables pour l'UPV est dans l'évaluation de l'uniformité d'une structure en béton non armée et pour faire le suivi de la structure dans le temps.

Il est intéressant de constater que ces auteurs estiment l'UPV comme ne permettant d'évaluer la résistance à la compression qu'avec une exactitude de $\pm 20\%$. Pour ces auteurs, combiner cette technique avec une autre technique comme le marteau rebondissant n'améliore en rien sa performance. Popovics et Popovics [1992] abondent dans le même sens en spécifiant que l'UPV n'est pas suffisamment fiable dans un but pratique.

B) Atténuation des ondes ultrasonores

La mesure d'atténuation est une mesure de la baisse en énergie d'un signal par absorption ou par diffusion/dispersion du signal. Plus un matériau présente de micro-défauts, plus il y a de diffusion et dispersion du signal transmis. En mesurant l'amplitude à l'entrée et à la sortie de l'échantillon, on peut déterminer le facteur d'atténuation. Les matériaux sont caractérisés par un coefficient d'atténuation. L'atténuation pour un même matériau varie selon sa composition, la fréquence du signal transmis ainsi que la longueur de transmission [Shah et Ribakov, 2009-a]. Parce que l'amplitude d'une onde est plus sensible aux défauts qu'une vitesse de propagation, l'atténuation est intéressante pour détecter l'endommagement plus tôt dans le processus [Shah et Ribakov, 2009-a].

Dans une étude, Saint-Pierre *et al.* [2007] ont proposé d'utiliser pour des carottes de forages l'atténuation des ondes ultrasonores plutôt que la vitesse de propagation pour la simple raison que la vitesse n'est pas aussi sensible que l'atténuation pour une application sur la RAG. En effet, l'étude a démontré qu'après 50 semaines de conditionnement, une éprouvette réactive atténue 90% du signal à une fréquence de 100 kHz (dont 60% est attribuable à la RAG) contre 40% pour un bloc non-réactif. La vitesse de propagation a, quant à elle, seulement diminué de 8% dans le même laps de temps. Toutefois, elle n'évite pas le carottage des structures car la mesure d'atténuation a dû se faire en laboratoire sur des carottes dans le cadre de ces essais.

Prassianakis et Giokas [2003] ont proposé un indice d'endommagement interne qui utilise l'atténuation pour corrélérer avec la contrainte appliquée sur l'échantillon de béton :

$$D = 1 - \frac{H_i}{H_0} \quad (2.5)$$

où H_0 et H_i sont les amplitudes du signal sortant avant et pendant l'application d'une contrainte σ_0 et σ_i , respectivement. À partir de cet indice, des essais de résistance ultime en compression sur le béton et des essais en compression uniaxiale, en tension directe et en flexion sur le marbre ont été réalisés et des courbes de comportement ont été obtenues [Prassianakis et Prassianakis, 2004]. Un modèle simple a pu être développé pour prédire les réponses des essais acoustiques et il s'avère que la théorie et l'expérimentation concordent relativement

bien autant en compression qu'en tension. Toutefois, des essais supplémentaires doivent être réalisés pour conclure sur la validité des courbes pour différents types de bétons ou matériaux rocheux. Sachant que la teneur en humidité à elle seule peut modifier le comportement des ondes acoustiques, il est difficile de penser qu'une courbe de calibration universelle est possible.

Chai *et al.* [2011] ont proposé d'utiliser l'atténuation du signal dans une application tomographique (imagerie 2D ou 3D de résultats de transmissions acoustiques). La tomographie appliquée sur site fait généralement appel au calcul de temps de vol (vélocité) sur une multitude de trajectoires croisées. Ces chercheurs ont remarqué que l'amplitude décroissait de façon beaucoup plus importante que la vitesse de propagation lorsque le niveau d'inclusions des cubes de mortier croissait (Figure 2.7).

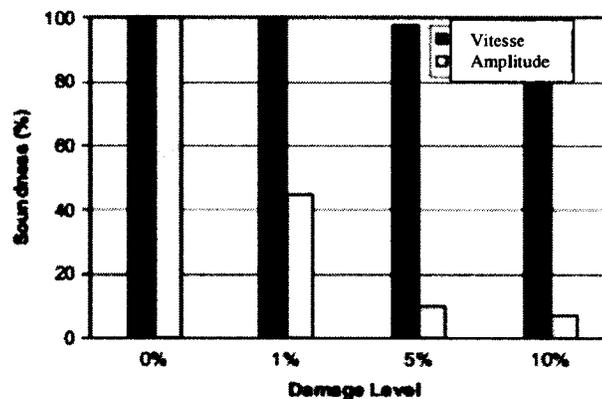


Figure 2.7: Variation de la vitesse et de l'amplitude selon le niveau de dommage de cubes de mortier avec inclusions de vinyle [Chai *et al.*, 2011]

Utilisant les mêmes données tomographiques, les chercheurs ont calculé les vitesses et les facteurs d'amplitude des signaux afin d'évaluer leur sensibilité à la présence de défauts dans une dalle de béton de 1500 x 1500 x 300 mm de dimension. Ils évaluent en fait le ratio entre un résultat donné et le résultat pour un béton sain. Bien que les résultats présentés confirment que l'étude de l'atténuation permet de définir les zones défectueuses avec une meilleure précision, il faut se poser des questions quant aux facteurs influençant la perte d'énergie d'un signal. Les auteurs identifient l'acier d'armature ou toutes autres formes de défauts autres que les fissures, comme des éléments affectant l'atténuation. Même les aspects structuraux et microstructuraux

comme les granulats, les grains de sable et les pores peuvent influencer l'atténuation. Alors que ces éléments ne semblent pas avoir une influence significative selon les auteurs, ceux-ci ne mentionnent pas le problème de couplage.

L'atténuation mesurée dépend fortement du couplage des capteurs avec le matériau et c'est un paramètre difficile à contrôler sur le terrain. De plus, ce paramètre est semi-quantitatif et demande une valeur de référence pour comparer l'endommagement.

C) Technique de résonance

La méthode de fréquence de résonance fondamentale peut, elle aussi, évaluer le module d'élasticité. En mettant un échantillon en vibration soit par un amplificateur électromécanique ou par impact, on va détecter sa fréquence de résonance. Le module d'élasticité dynamique est donné par l'équation suivante :

$$E_{dynamique} = CMn^2 \text{ ou } DM(n')^2 \quad (2.6)$$

où C et D sont des coefficients de forme selon que le calcul est basé sur la fréquence transversale ou longitudinale, M est la masse de l'échantillon, n est la fréquence transversale et n', la fréquence longitudinale [ASTM C215]. Il est également possible d'évaluer le module de rigidité en utilisant la fréquence de torsion fondamentale. La limite de ces méthodes, c'est qu'elles ne sont praticables que sur de petits échantillons de formes simples et non sur des structures.

D) Impact-écho

Une méthode simple, mais dont l'efficacité est encore sous étude est l'impact-écho. À cause de son principe même, cette méthode permet surtout la détection des délaminations (ou plans de discontinuité) et est moins adaptée aux réseaux de fissures. Elle est normalisée sous l'article ASTM C 1383. Dans une étude où on compare la réponse de l'impact-écho à une inspection au marteau, il est indiqué que malgré des résultats similaires, plusieurs raisons favorisent le choix de la méthode d'impact-écho:

- le bruit du trafic n'affecte pas les essais;
- l'impact-écho peut détecter la délamination en profondeur;
- il n'y a pas d'interprétation subjective;

- elle est relativement rapide;
- elle peut être utilisée avec les dalles recouvertes d'asphalte [Cheng et Sansalone, 1993].

En impact-écho, on applique un impact la surface du béton afin d'enregistrer les différentes fréquences générées et d'y déceler la réponse du béton. L'impact engendré par la frappe d'une bille ou d'un marteau sur le béton génère un front d'ondes sphérique. Une partie de ce front va percuter l'interface béton/autre matériau et être partiellement reflété. Ce va-et-vient du front d'onde crée une vibration de l'élément de béton [Sansalone,1997]. Le capteur enregistre le déplacement de la surface dans le temps. Cet enregistrement dans le temps est ensuite transformé en spectre fréquentiel. La fréquence de résonance s'identifie souvent comme un pic, car c'est la fréquence préférentielle du béton et celui-ci va l'amplifier.

Sansalone [1997] fait référence à la fréquence de résonance comme la fréquence du mode de vibration d'épaisseur de l'onde P. En effet, il existe un autre mode de vibration lorsqu'on est en présence d'un élément de faible épaisseur, dont la longueur est finie, vibrant comme une corde tendue (i.e. : délamination). Ce mode, appelé mode de vibration flexurale, génère des fréquences beaucoup plus faibles. En étudiant les différentes fréquences générées, nous pouvons obtenir des informations sur l'endommagement du béton.

Comme son nom l'indique, la fréquence du mode de vibration d'épaisseur dépend de la vitesse de propagation de l'onde dans ce béton et l'épaisseur de l'élément suivant la relation :

$$f = \frac{\beta C_p}{2A} \quad (2.7)$$

β étant un coefficient variant selon la géométrie de l'élément testé et A représentant la dimension de l'élément dans la direction de la propagation d'onde [Cheng et Sansalone, 1993] [Sansalone, 1997]. Pour des éléments de type plaque, dont la dimension longitudinale est beaucoup supérieure à l'épaisseur, $\beta=0.96$. Lorsque la distance parcourue par les ondes est inférieure à la longueur d'onde ou peu supérieure, les défauts sont difficilement détectés [Rhazi, 2010]. Avec les appareils actuels, il est possible de mesurer cette fréquence et, ainsi, déterminer soit l'épaisseur de l'élément, soit la vitesse de propagation, selon ce qui est connu. La vitesse est intéressante dans la mesure où elle nous donne une idée approximative de l'état du béton.

Dans un article très intéressant, Kesner *et al.* [2004] explore la possibilité d'utiliser l'impact-écho pour évaluer la fissuration distribuée, comme dans un cas de RAG. Ils ont été en mesure de quantifier l'endommagement en étudiant le signal en impact-écho, spécifiquement le taux d'atténuation. Toutefois, la méthode ne leur permet pas encore d'identifier la cause de l'endommagement. Évidemment, pour évaluer l'atténuation d'un signal, il faut un accouplement parfait, ce qui n'est pas toujours réalisable en chantier.

Néanmoins, la technique ne fait pas l'unanimité. Dans une critique de la technique, Shcubert et Kohler [2008] notent plusieurs failles dans la formule même de calcul d'épaisseur, dans le fait que l'impact-écho ne considère que l'onde P alors qu'elle ne contient que 7 % de l'énergie totale, dans le fait que l'analyse se faisait principalement dans le domaine fréquentiel alors qu'il croit qu'il y a du potentiel à y combiner la réponse temporel sous forme de scan 2 ou 3D. De fait, les auteurs croient que le fait même d'avoir des points discrets de mesure est un grand défaut de l'impact-écho. Des pistes de solutions sont proposées dont un système mécanique de scan permettant des prises de mesure systématique sur l'ensemble de la structure et une méthode numérique pour traiter la grande quantité d'informations pouvant en découler. Les autres limites de l'impact-écho sont notamment la praticabilité sur des surfaces non parallèles ou fortement endommagées.

Aujourd'hui, des travaux sont entrepris afin de mitiger certains problèmes soulevés par Schubert et Kohler en utilisant un capteur sans contact/couplé à l'air [Zhu et Popovics, 2007]. Ces capteurs ont le potentiel d'accélérer l'acquisition de données car il n'est plus nécessaire d'assurer un bon couplage entre le capteur et la surface de béton, donc, de permettre l'imagerie par impact-écho. Ces capteurs profitent de la production d'ondes Lamb en surface qui entraînent, elles, la production d'ondes P dans l'air. C'est le principe d'onde de surface fuyant (*leaky surface wave*) se produisant à la frontière entre le solide et le fluide. La difficulté de l'approche vient du fait qu'il faut éliminer la détection des ondes acoustiques directes produites par l'impact afin de concentrer la réception de l'onde de vibration du béton. Le capteur utilisé est donc un microphone inséré dans un dispositif insonorisant pour réduire le bruit am-

biant ainsi que les ondes acoustiques directes, mais également pour réduire la réverbération des ondes fuyants à l'intérieur du dispositif (Figure 2.8).

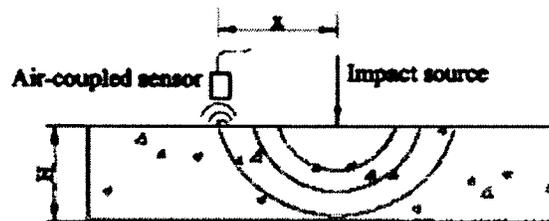


Figure 2.8 : Disposition pour un test d'impact-écho avec capteur sans contact [Zhu et Popovics, 2007]

2.4.3 L'acoustique non linéaire

Les microfissures confèrent au béton un comportement élastique non linéaire très marqué [Ostrovsky et Johnson, 2001]. C'est que les hétérogénéités, telles les interfaces matrice-fibre pour les composites et les systèmes de joints dans le roc, confèrent un comportement hystérétique non linéaire au matériau. On impute la non-linéarité principalement aux portions tendres/interstices d'un système de joints (Figure 2.9).

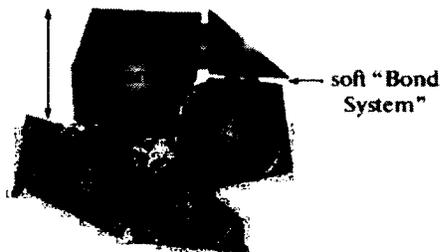


Figure 2.9 : Système de joints dans un matériau hétérogène conférant la réponse non linéaire [Ostrovsky et Rudenko, 2009]

En acoustique non linéaire, on provoque l'ouverture-fermeture des microfissures par une onde de forte amplitude. On amène ainsi le matériau à un état de non-équilibre [Bentahar *et al.*, 2006]. Ces ouvertures-fermetures des microfissures modifient les propriétés élastiques et visco-élastiques du milieu, entraînant ainsi une réponse non linéaire. Plus le béton est endommagé (plus d'hétérogénéités), plus les paramètres non linéaires deviennent importants. La parti-

cularité de l'acoustique non linéaire par rapport à l'acoustique linéaire est la possibilité d'observer la variation des propriétés du milieu pendant la propagation de l'onde. Cela permet notamment de ne pas avoir recours à un référentiel ou une comparaison entre deux états.

Ainsi, dans un essai d'acoustique non linéaire où on excite mécaniquement l'élément de béton, on peut observer:

- 1) La dynamique lente qui correspond au temps pris par le matériau à revenir à son module d'élasticité dynamique initial [Ostrovsky et Johnson, 2001];
- 2) Le *décalage* de fréquence de résonance qui peut être utilisé pour déterminer la variation du module moyen et de la vitesse de l'onde;
- 3) La génération d'harmoniques dont les ratios d'amplitude avec la fondamentale permettent d'évaluer l'endommagement, même à de faibles contraintes [Shah et Ribakov, 2009-b];
- 4) L'atténuation non linéaire qui peut être perçue à de très faibles déformations [Ju, 2006];
- 5) Le saut temporel est défini comme la modification du temps de parcours associée à un changement des propriétés élastiques du matériau après une perturbation mécanique qui retarde l'onde acoustique [Kodjo, 2008].

La plupart de ces indicateurs peuvent être facilement détectables avec des tests en laboratoire avec un générateur d'onde suffisamment puissant. Le défi consiste à être en mesure d'utiliser ces indicateurs même en chantier.

A) Résonance non-linéaire

L'étude de la fréquence de résonance d'un matériau permet habituellement de déterminer la vitesse de propagation des ondes et l'atténuation dans le matériau. Pour obtenir la fréquence de résonance, on envoie une onde sinusoïdale continue qui fait vibrer le matériau jusqu'à ce qu'il atteigne sa résonance naturelle. En observant le signal émis par le matériau sous cette excitation par balayage en fréquence et amplitude, on remarquera une fréquence préférentielle qui est amplifiée par le matériau; il s'agit de la fréquence naturelle de résonance.

Sur un matériau hétérogène, lorsqu'on augmente l'amplitude de l'onde transmise, on observe un déplacement/décalage de la fréquence de résonance vers des valeurs plus basses, une *résonance non linéaire*. Cette résonance non linéaire est associée à un phénomène de *dynamique rapide* [Bentahar *et al.*, 2006]. Le déplacement de la fréquence naturelle ω_0 vers une nouvelle fréquence ω suit la relation :

$$\omega = \omega_0 + \kappa A^2 \quad (2.8)$$

avec A étant l'amplitude de l'oscillation et κ une constante provenant de *coefficients anharmoniques* (Figure 2.10). L'autre conséquence de la résonance non linéaire est *l'effet de repli* où la forme de la courbe de résonance est distordue [Elmer, 1998]. Ces phénomènes sont d'autant plus prononcés lorsque le matériau présente des micro-défauts.

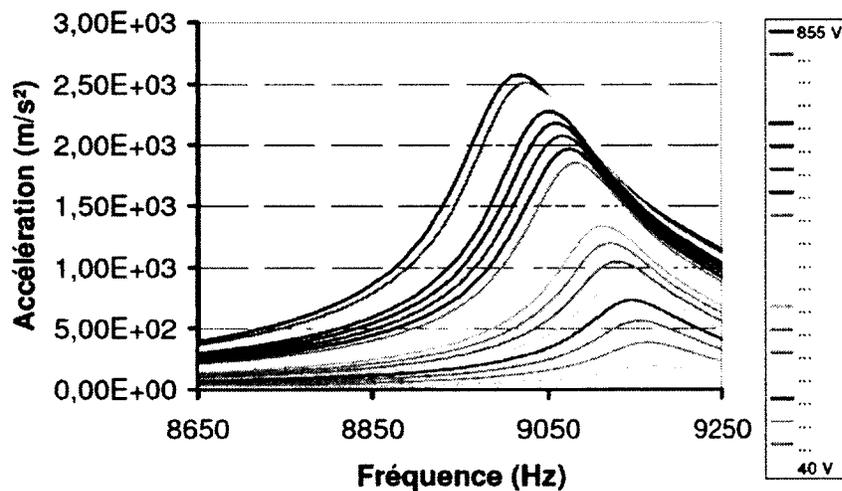


Figure 2.10 : Saut de la fréquence de résonance et l'effet de repli dus à une augmentation de l'amplitude de la sollicitation sur un matériau hétérogène [Kodjo, 2008]

Dans un travail de modélisation du comportement du matériau en dynamique rapide et lente, Bentahar *et al.* [2006] ont réalisé des essais de dynamique rapide où ils ont observé le déplacement de fréquence de résonance et ont remarqué qu'il y avait un changement de pente d'un facteur de 400 entre l'état intact et endommagé alors qu'en atténuation, le facteur n'est que de 3,5, démontrant une sensibilité supérieure de la résonance non linéaire versus l'atténuation.

Toutefois, Bentahar *et al.* [2006] émettent des réserves quant à l'utilisation des méthodes de dynamique rapide pour une application pratique. La mise en résonance d'éléments structuraux réels est encore difficile à concevoir et pourrait compromettre l'intégrité structurale de l'ensemble. Ils notent qu'il faut recourir à une grande énergie élastique pour l'obtention d'effets minimes, difficilement détectables *in situ*, en addition avec la sensibilité des indicateurs en dynamique rapide aux conditions environnementales (i.e. : température, humidité, pression de confinement), amenant des variations des résultats qui n'ont pas nécessairement de lien avec l'endommagement.

B) Dynamique lente

La dynamique lente est un phénomène qui a été observé suite au conditionnement à grande amplitude d'un matériau au comportement élastique hystérétique. La phase de conditionnement - pendant laquelle l'échantillon est soumis à une excitation d'amplitude constante - mène à des variations des propriétés élastiques et viscoélastiques, donc à une chute instantanée puis progressive de la fréquence de résonance [Kodjo *et al.*, 2011][Bentahar *et al.*, 2006]. À l'arrêt du conditionnement, le matériau restitue l'énergie de conditionnement et retourne à son module d'élasticité dynamique initial; ses propriétés reviennent lentement à leur état d'équilibre de façon graduelle. Ce phénomène est relié à la phase de relaxation *d'un système sujet au fluage* et correspond à une augmentation de la rigidité du matériau. Plus le matériau est endommagé, plus la chute de fréquence est importante et plus le temps de récupération sera important. Deux indicateurs sont étudiés, soit la chute de fréquence pendant le conditionnement et le temps de récupération. Toutefois, le temps de récupération est un paramètre plus long à obtenir.

Kodjo *et al.* [2011] ont adopté une approche légèrement différente de la dynamique lente afin de caractériser un endommagement dû à la RAG versus un endommagement mécanique. Ils assument que le gel de silice, produit par la réaction et remplissant les vides et fissures, confère un caractère presque visqueux aux fissures du béton, à l'opposé d'une fissure mécanique vide qui a un comportement proche d'un matériau parfaitement élastique. Au lieu d'observer le comportement du matériau durant la phase de relaxation, on conditionne sur une plus

longue durée et on observe la dynamique lente pendant le conditionnement. Ce type de conditionnement est similaire à un chargement soutenu dans un essai de fluage statique.

Durant les essais, il a été remarqué que la fréquence de résonance diminuait continuellement durant le conditionnement, démontrant un phénomène de dynamique lente bien marqué. Il est à noter que le temps de conditionnement est beaucoup plus grand pour les échantillons endommagés par la RAG (Figure 2.11). Cette variation est logarithmique.

Les auteurs ont ensuite évalué le temps de fluage à partir de la variation relative de la fréquence de résonance au carré. Cela a permis de montrer que les échantillons endommagés par la RAG avaient un temps de 3.5 fois supérieur aux échantillons endommagés mécaniquement.

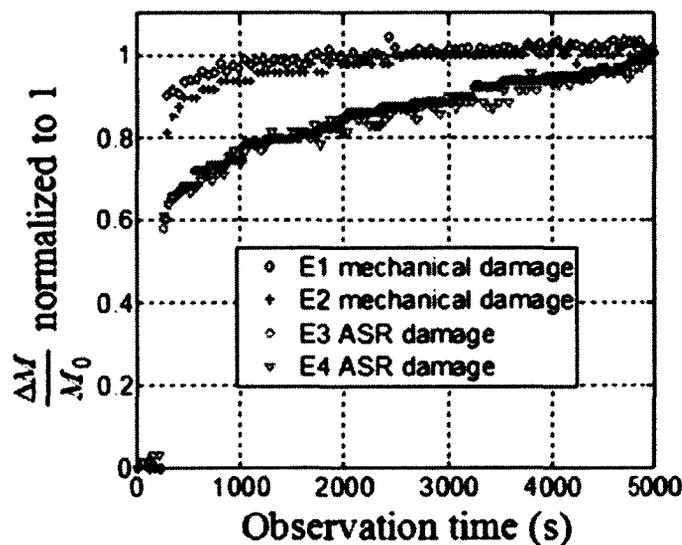


Figure 2.11 : Variation relative du carré de la fréquence de résonance durant le conditionnement [Kodjo *et al.*, 2011]

D'autres essais ont été réalisés pour différents états d'endommagement et seule la variation relative de la fréquence de résonance montrait une variation d'endommagement. Le temps de fluage n'a pas été affecté.

Cette méthode non destructive semble, présentement, être la seule à être en mesure de distinguer un endommagement associé à la RAG d'un endommagement mécanique, du moins sur des échantillons de laboratoire. Malgré qu'elle ne puisse quantifier l'endommagement, elle offre une piste fort intéressante dans l'atteinte de l'objectif d'identification de la RAG.

C) Génération d'harmoniques

En génération d'harmoniques, le signal transmis est centré sur une fréquence de travail dite fondamentale de haute amplitude. L'interaction de cette onde avec les défauts du milieu génère différentes harmoniques à différentes amplitudes. Plus le béton est endommagé, plus il a un comportement non linéaire et plus l'onde initiale se convertit en harmoniques. Cette technique est intéressante car elle s'applique bien à un endommagement distribué par microfissuration, comme dans le cas de la RAG, et est plus sensible que les méthodes linéaires par quelques magnitudes d'ordre de grandeur [Stauffer *et al.*, 2005].

Shah et Ribakov [2009-b] ont exploité la sensibilité de l'amplitude d'une onde à la dégradation combinée à l'étude de la fréquence fondamentale et de la génération de la seconde et la troisième harmonique afin d'évaluer l'endommagement d'un béton par microfissuration généralisée dans l'ensemble du matériau. La première partie de leurs essais a permis de conclure que la fréquence centrale du capteur modifie sa sensibilité à la génération d'harmoniques, que le ratio d'amplitude A_3/A_1^3 de la troisième harmonique sur la fondamentale était plus sensible à l'endommagement que le ratio A_2/A_1^2 de la seconde harmonique (Figure 2.12) mais que tous deux sont hautement sensibles à la teneur en eau du béton et que la puissance du signal d'entrée a un effet sur la sensibilité. L'effet de décalage de fréquence a également été remarqué en ce qui a trait à la fréquence fondamentale.

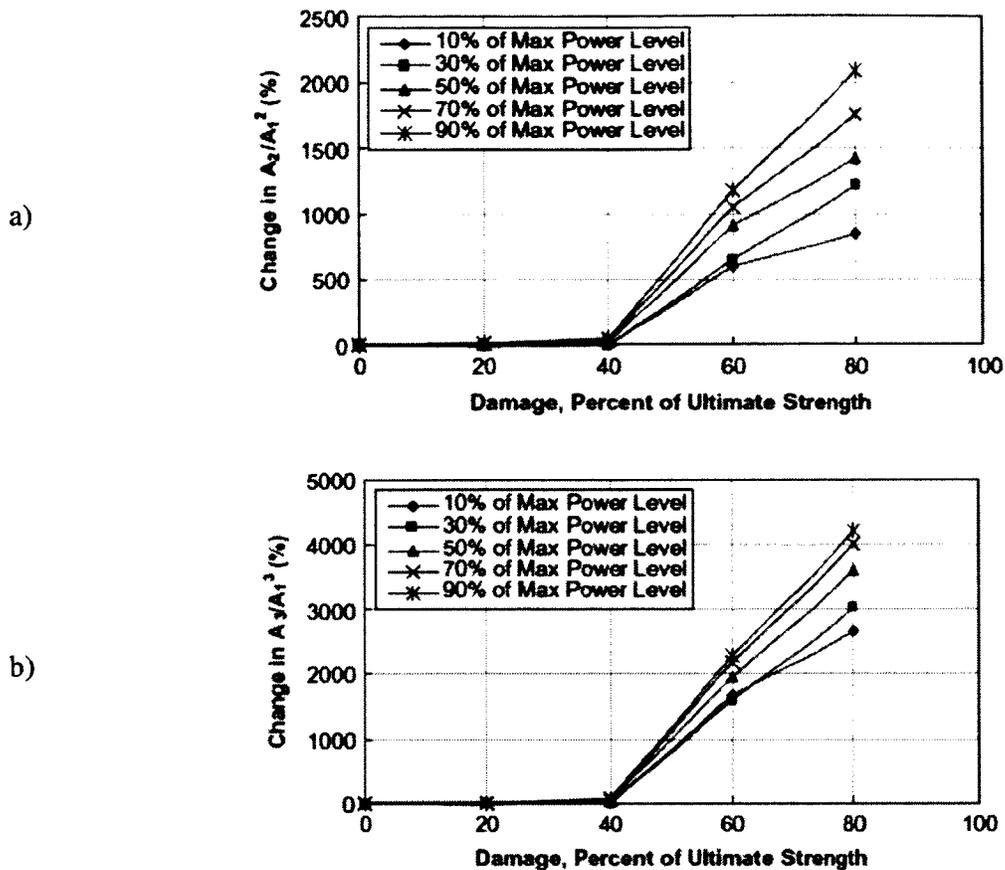


Figure 2.12 : Variation des ratios d'harmoniques a) de second et b) de troisième ordre avec l'endommagement pour différents niveaux de puissance d'entrée [Shah et Ribakov, 2009-b]

Cette approche de l'acoustique non linéaire est très intéressante car, en théorie, elle est praticable sur des structures en service. Contrairement à d'autres méthodes non linéaires, celle-ci ne nécessite pas de mettre en résonance le béton, facilitant la mise en œuvre en chantier. Toutefois, les auteurs notent qu'ils ont surfacé le béton, utilisé un couplant de gel de silicone et appliqué une bonne pression sur les capteurs pour assurer un bon couplage. En effet, afin de pouvoir calculer les ratios des harmoniques, il faut être en mesure d'observer les amplitudes, donc, avoir un couplage parfait d'un essai à l'autre. Ceci ne peut être garanti lors d'évaluation de terrain.

D) Saut temporel

Le saut temporel est une nouvelle technique d'acoustique non linéaire proposée par Pr. F. Cohen Tenoudji [Lacouture, 2002] et développée par S. Kodjo [2008] dans le cadre de travaux de doctorat. Cette technique fait appel à la non-linéarité du béton sous application de contrainte.

La mathématique du saut temporel s'inspire de la technique d'interférométrie d'ondes coda [Snieder, 2004]. Cette technique développée par des géophysiciens avait pour but de détecter les mouvements dans la croûte terrestre. À la base, l'interférométrie était destinée aux ondes scalaires, non sujettes à la diffusion. En interférométrie d'ondes coda, on étend la théorie aux ondes élastiques à diffusion multiple plus complexes [Snieder, 2002]. Le changement de vitesse, le déplacement des capteurs ou l'ouverture et fermeture de pores ou fissures affectent différemment le coefficient de corrélation (t). Le Tableau 2.4 présente l'influence des différents changements sur la moyenne et la variance du coefficient de corrélation.

Tableau 2.4 : Influence du type de changement sur la moyenne et la variance de la perturbation du temps de vol [Snieder *et al.*, 2002]

Type de changement	μ_t	σ_t^2
Changement de vitesse	$\sim t$	0
Mouvement des diffuseurs	0	$\sim t$
Déplacement de la source	0	constant

La technique emploie deux transducteurs émetteurs-récepteurs fixes d'ondes ultrasonores dans la croûte. En utilisant l'inter-corrélation sur des ondes coda hautement répétables, ils étaient en mesure d'observer les changements dans les signaux enregistrés à différents moments dans le temps. Ce changement se caractérise par un délai dans le temps d'arrivée de ces ondes.

Le saut temporel reprend le concept, mais le changement de propriétés du milieu est provoqué, dans ce cas-ci. En utilisant un générateur et des transducteurs piézoélectrique haute fréquence, on envoie des rafales d'ondes sonder le milieu. En même temps, une onde basse fréquence d'haute amplitude générée par un impact appliqué en surface du matériau provoque un changement temporaire et instantané des propriétés du milieu en ouvrant/fermant les microfissures

présentes. Ce changement perturbe la propagation des rafales «d'ondes-sondes» et se traduit par un saut de temps relatif à l'endommagement (Figure 2.13).

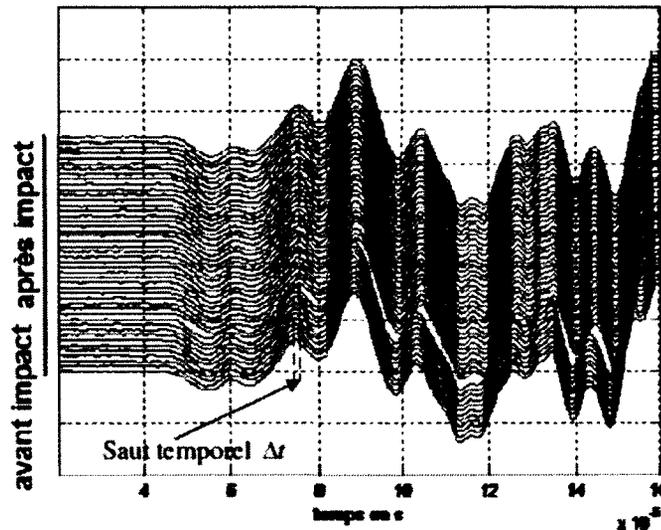


Figure 2.13 : Le saut temporel illustré par le décalage dans le temps des paquets d'onde avant et après impact [Kodjo, 2008]

La technique a l'avantage de ne pas nécessiter un couplage parfait ou la mise en résonance de l'élément investigué. Elle peut ainsi être utilisée sur des structures en service assez facilement. Toutefois, parce qu'il s'agit d'une nouvelle technique, son mécanisme de fonctionnement, les facteurs qui l'influencent et les paramètres d'utilisation sont encore à explorer ou définir.

2.4.4 Conclusion

Le domaine de l'évaluation non destructive par méthodes acoustiques est un vaste domaine intégrant une panoplie de méthodes et de techniques pour des besoins bien spécifiques. Il est en évolution depuis des dizaines d'années. Toutefois, en ce qui concerne l'évaluation non destructive des matériaux non linéaire fortement hétérogènes et de compositions très variables comme le béton, le progrès se fait moins rapidement.

Comme cela peut être constaté dans la pratique, les méthodes linéaires sont très populaires et répandues. Elles allient généralement simplicité et robustesse. Toutefois, leur fiabilité est variable et leur sensibilité à un endommagement distribué au niveau microscopique est très

faible. Pour une application à la RAG, on peut imaginer qu'elles doivent se limiter aux structures dont la réaction est fortement engagée et dont la dégradation est visible.

Pour un matériau hétérogène et variable comme le béton, on a vu que les méthodes non linéaires donnent des résultats intéressants en ce qui a trait à la quantification de l'endommagement. Toutefois, la majorité des techniques développées jusqu'à ce jour demande soit d'être utilisée en laboratoire afin de pouvoir contrôler l'environnement, soit un suivi dans le temps pour détecter le changement sauf dans le cas du saut temporel qui a été conçu pour pouvoir travailler directement sur les structures en service, mais qui est encore en phase exploratoire.

CHAPITRE 3

VOLET TERRAIN : VALIDATION DES TECHNIQUES

Le volet terrain vise à évaluer trois techniques acoustiques sélectionnées sur des structures en service afin d'évaluer :

- La capacité des techniques à s'adapter sur différents types de structures et de géométries;
- La sensibilité des techniques à différents niveaux d'endommagements visuels;
- La répétabilité et la fiabilité des résultats en menant deux campagnes à un an d'intervalle.

3.1 Méthodologie terrain

3.1.1 Équipement

Nous avons utilisé, parmi les techniques existantes, l'impact-écho, l'UPV et le saut temporel car ils pouvaient facilement être déployés sur le terrain, que la prise de mesure prenait un temps raisonnable et qu'ils étaient facilement disponibles pour le groupe de recherche. L'intérêt de ces choix réside également dans le fait que l'impact-écho et l'UPV sont deux techniques connues depuis longtemps et éprouvés dans plusieurs contextes. Elles permettent de comparer des paramètres linéaires à des paramètres non linéaires provenant du saut temporel qui est une technique en développement à l'Université de Sherbrooke.

L'équipement nécessaire pour effectuer ces essais comprend deux ensembles d'appareils. L'Andescope d'Andec (Figure 3.1 : Système Andescope) est un ordinateur comprenant un générateur d'ondes et un système d'acquisition exploité sous le logiciel Andescope, le tout dans un boîtier robuste. Le système peut fonctionner sous trois modes, soit la transmission directe, l'impact-écho et le pulse-écho. Les modes ultrasoniques peuvent générer des ondes jusqu'à 4000 V d'amplitude en pointes, en rafales, en ondes carrées ou en gazouillis. En mode impact-écho, des billes d'acier de différentes grosseurs permettent de générer des ondes mécaniques de différentes fréquences pénétrant plus ou moins profondément dans la dalle. Le logiciel d'analyse permet d'obtenir la fréquence en temps réel, la déconvolution, le filtrage passe-

haut et passe-bas, le moyennage ainsi que la présentation des données en deux ou trois dimensions. Il peut être utilisé avec des transducteurs piézoélectriques centrés sur différentes fréquences (25 ou 50 kHz) ou des accéléromètres sensibles à des fréquences plus basses (5-15 kHz).

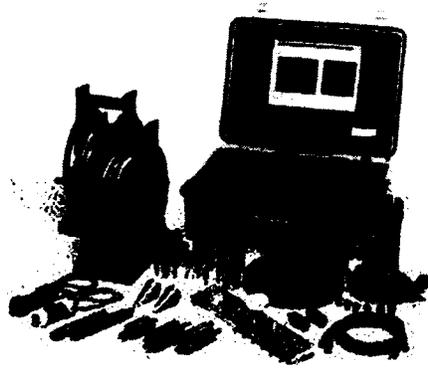


Figure 3.1 : Système Andescope

Dans le cadre de notre travail, seules les fonctions de transmission directe (UPV) et d'impact-écho sont utilisées. Parce que les structures auscultées sont relativement épaisses, les fréquences de résonance sont relativement basses. Un accéléromètre sensible aux fréquences plus basses est donc utilisé dans la plupart des cas pour capter le signal en impact-écho. En transmission, des capteurs piézoélectriques centrés sur 50 kHz sont utilisés.

Le *Boxer*, le deuxième système de génération d'onde, ainsi que le logiciel utilisé pour le saut temporel sont détaillés dans la section 5.1.2.

3.1.2 Configurations de transmission

Il existe trois configurations de transmission des transducteurs pour des essais acoustiques : la transmission directe, indirecte et semi-directe (Figure 3.2). La transmission directe place les transducteurs de part et d'autre d'une structure, ce qui exige d'avoir accès à deux faces. La transmission indirecte place les transducteurs sur la même face de la structure à 90° par rapport à la surface. Les ondes vont se refléter de multiples fois sur les faces opposées et les inclusions ainsi que se propager à la surface avant d'atteindre l'autre transducteur. Les ondes

enregistrées ne seront donc pas uniquement des ondes directes, mais également des ondes secondaires (ondes provenant de réflexions multiples – *late arrival waves*). La configuration semi-directe se fait par le positionnement des transducteurs sur des faces contiguës ou avec des cales à angle sur une face de la structure.

Lors des essais sur les structures autoroutières, les configurations directe et indirecte ont été utilisées.

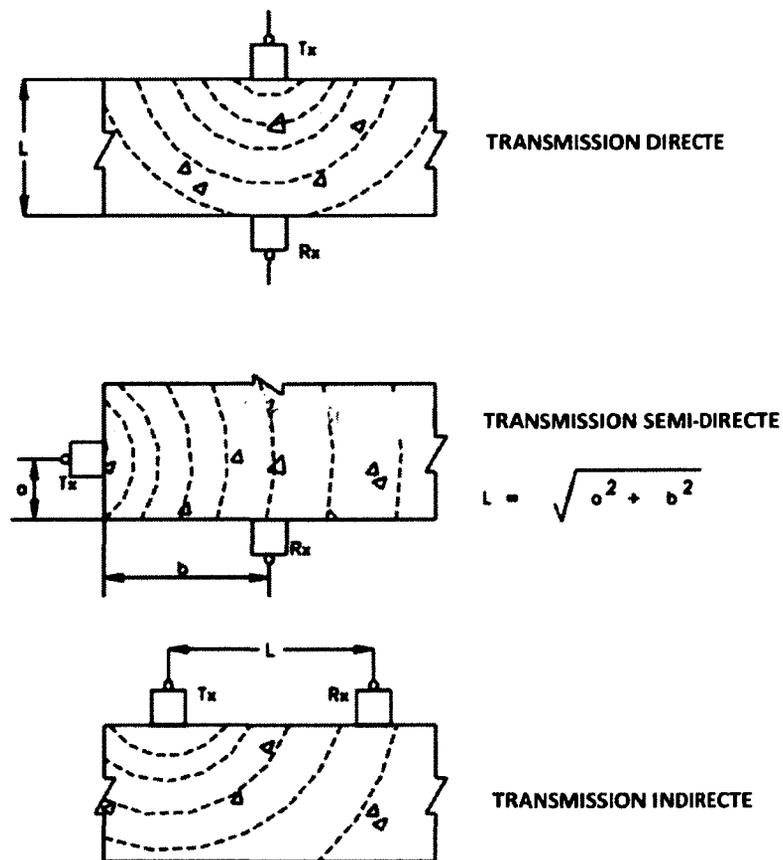


Figure 3.2 : Les configurations de transmissions pour des essais acoustiques [The Constructor, 2011]

3.1.3 Indicateurs d'endommagement évalués

Quatre indicateurs d'endommagement ont été évalués à partir des essais réalisés avec l'Andescope et le *Boxer*. Ces indicateurs sont validés à l'aide d'un indice d'endommagement de surface présenté dans l'article sur les essais terrain du CHAPITRE 4.

A) *Fréquence de résonance et vitesse indirecte*

Avec l'Andescope, des essais d'impact-écho ont été réalisés. L'impact généré à la surface se propage en différents types d'ondes et la vibration engendrée est captée par le transducteur à une fréquence de 20 kHz, transmis à une carte d'acquisition et traité par le logiciel pour obtenir un signal temporel. À partir des signaux temporels en impact-écho, une transformée de Fourier (FFT) permet de visualiser le spectre fréquentiel (Figure 3.3). C'est à partir du spectre fréquentiel qu'on isole la fréquence de résonance correspondant au mode de vibration d'épaisseur de la structure [Sansalone, 1997]. Étant donné que c'est la seule fréquence qui nous intéresse dans l'évaluation de la fissuration distribuée, cette fréquence est convertie en vitesse indirecte avec l'équation 4.1 (section 4.4.1). Ces vitesses peuvent être comparées entre elles et également classées selon le système présenté au Tableau 2.3.

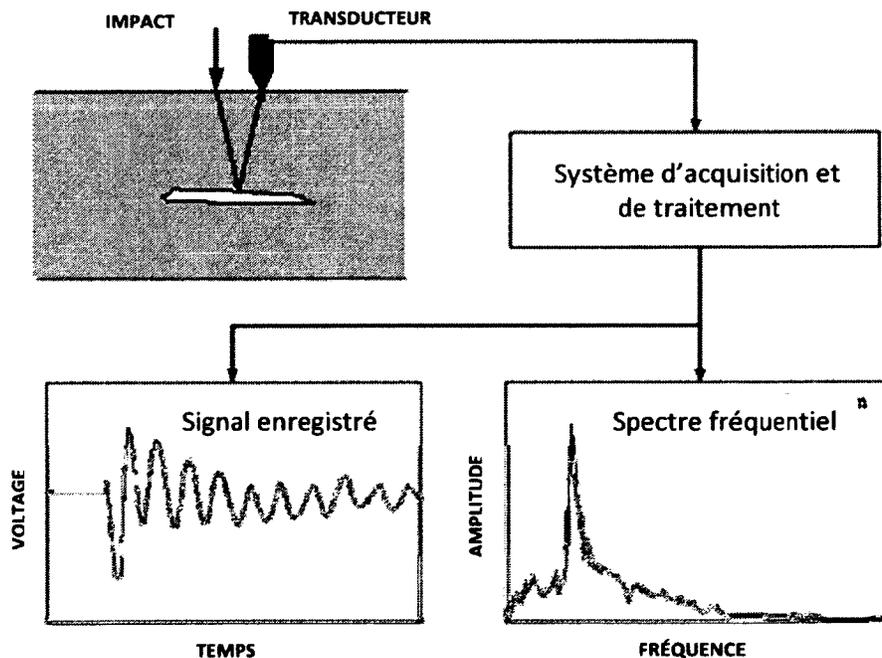


Figure 3.3 : Mode de fonctionnement de l'impact-écho

B) Vitesse d'onde directe

La vitesse d'onde directe est obtenue des essais d'UPV. Lors de ces essais, le signal transmis est enregistré. Sur ce signal, on vient chercher manuellement le temps d'arrivée de l'onde directe (Figure 3.4). Connaissant la distance entre les capteurs et le temps d'arrivée, il est alors possible de calculer la vitesse directe. Ces vitesses indiquent la qualité moyenne du béton suivant la classification présentée au Tableau 2.2.

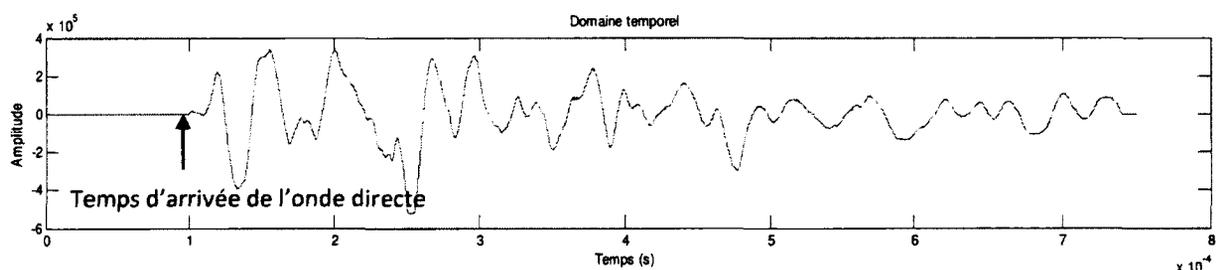


Figure 3.4 : Temps d'arrivée de l'onde directe sur un signal en transmission

Dans le cadre de cette étude, lorsque l'essai est réalisé avec l'Andescope, l'appareil envoie des impulsions d'ondes de 20 ms à 1000 V d'amplitude centrées à une fréquence de 30 kHz. Les capteurs utilisés sont centrés sur 25 ou 50 kHz. Avec le Boxer, les rafales transmises sont centrées à 250 kHz. Le choix de l'instrument ou de la fréquence utilisée n'a pas d'incidence sur les résultats.

C) Fréquence centroïde

Les ultrasons sont sujets au phénomène d'atténuation dans les milieux dispersifs comme le béton. En étudiant le spectre fréquentiel, nous pouvons obtenir de l'information sur le milieu, l'ampleur de la dispersion étant lié aux discontinuités [Vergara *et al.*, 2004]. Ainsi, les fréquences significatives d'un signal en transmission deviennent des indicateurs intéressants pour évaluer le niveau de fissuration. Nous avons évalué deux fréquences provenant des signaux, soit le pic (fréquence dominante) et le centroïde du spectre fréquentiel qui est une forme de fréquence moyenne. La fréquence centroïde se calcule comme suit :

$$f_c = \int f \cdot \frac{A}{\sum A} \quad (3.1)$$

avec f_c étant la fréquence centroïde et f , la fréquence associée à l'amplitude A , toutes tirées du spectre fréquentiel [Peeters, 2004].

Pour ce faire, les signaux enregistrés en transmission avec une fréquence d'échantillonnage de 60 ou 120 kHz pour les essais de saut temporel sont utilisés. Une transformation de Fourier (FFT) est alors appliquée sur le signal dans le temps afin d'obtenir le spectre fréquentiel. Une densité spectrale de puissance (DSP) du même signal est également étudiée afin de voir l'influence du bruit sur les résultats (Figure 3.5). À partir de ces spectres, on trouve le pic de fréquence (qui est le même pour les deux spectres) et les fréquences centroïdes.

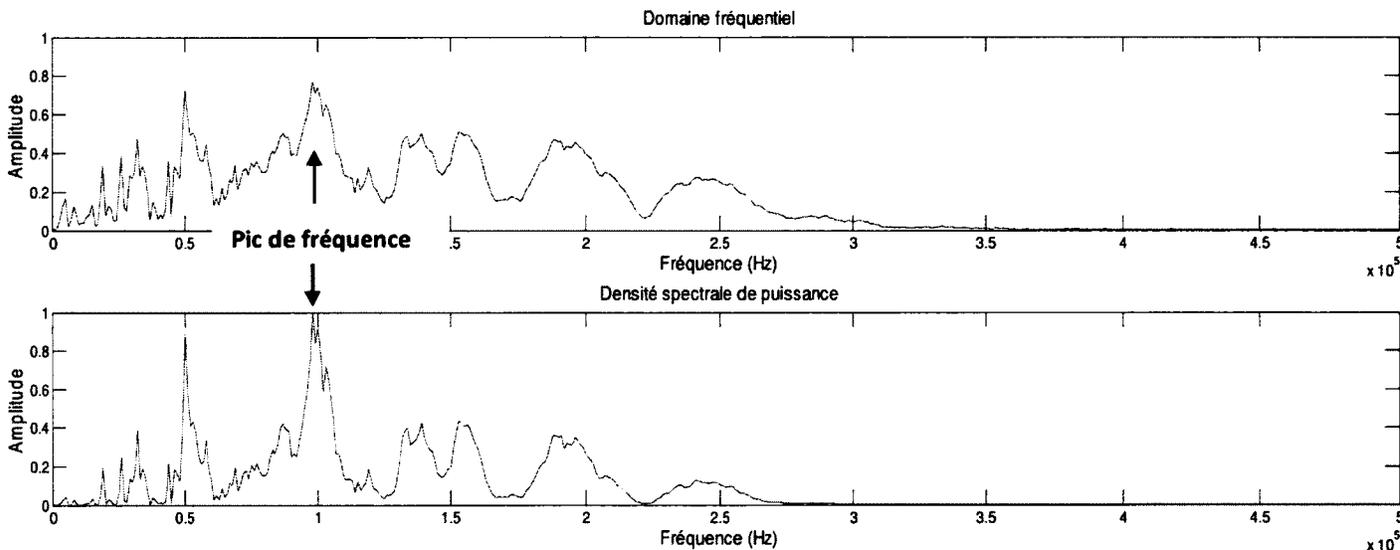


Figure 3.5 : Le spectre fréquentiel et la densité spectrale de puissance d'un signal en transmission indirecte

D) Saut temporel des ondes ultrasonores

Le saut temporel des ondes ultrasonores est l'indicateur obtenu lors d'un essai de *saut temporel*. La corrélation entre le signal avant impact et chaque signal enregistré durant l'essai d'impact sur l'élément testé est calculée. Le saut temporel correspond à la différence entre la corrélation avant et après impact. L'équipement et la méthode d'analyse sont détaillés à la section 5.1.2.

3.1.4 Structures auscultées

Les structures autoroutières faisant partie du programme non destructif du Federal Highway Administration (FHWA), États-Unis, étaient toutes situées dans le nord-est des États-Unis (états du Maine et du Vermont), une région très semblable au sud du Québec en terme de climat et qui connaît sensiblement les mêmes problèmes de dégradation du béton dont le gel-dégel et la RAG. Une chaussée en béton a aussi été investiguée au Delaware.

A) Delaware

Au Delaware, un pavage autoroutier en béton a été investigué. Des carottes ont été prélevées sur certaines sections du pavage et le niveau de RAG détecté allait de faible à moyen. Aucun signe de délamination n'a été détecté de ces carottes. Visuellement, les dalles semblaient en bon état. De fines fissures étaient observables près des joints perpendiculairement aux rainures présentes dans la finition de la surface de roulement. Soulignons que le béton avait été traité au nitrate de lithium par vaporisation de surface l'année précédente.

La campagne a eu lieu en mai 2010. Des essais en impact-écho ont été réalisés sur 10 sections d'environ 8-10 m de longueur qui ont été traitées au nitrate de lithium. Il n'y a pas eu de photographie systématique des points de mesure.

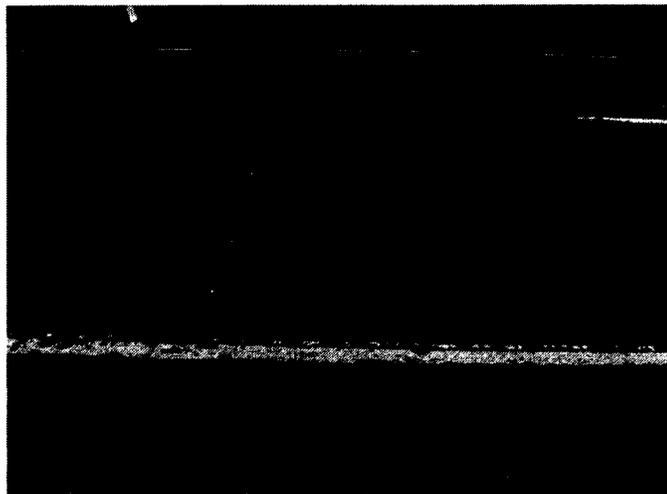


Figure 3.6: Une section traitée du pavage au Delaware

B) Maine

Au Maine, 5 structures autoroutières ont été auscultées dont trois murs de culée, six colonnes supportant un viaduc et deux piles de pont à deux reprises, une fois en mai 2010 et une fois en août 2011.

Des points de mesure ont été pris sur la largeur des structures, mais leur nombre a été limité (4 à 6 points par structure). Tous les points ont été testés en impact-écho et en saut temporel. Dans presque tous les cas, on pouvait remarquer qu'un côté de la structure était plus endommagée que l'autre, fort probablement dû à une différence d'exposition au soleil. Des photos ont été prises de façon systématique, permettant l'utilisation d'un indice d'endommagement de surface.

C) Vermont

Dans le Vermont, 17 barrières (jersey) de pont ont été auscultées. Sur chaque barrière, deux points de mesure en impact-écho et en UPV ont été pris avec leurs indices d'endommagement de surface. Visuellement, les barrières présentaient une fissuration étendue et surtout longitudinale. Certaines fissures présentaient un dépôt/écoulement blanchâtre similaire au gel de silice.

3.2 Résultats partiels

La plupart des résultats ont fait l'objet d'un article présenté au Chapitre 4. Seuls les résultats du pavage ausculté au Delaware n'ont pas été abordés car il y avait trop peu de résultats de saut temporel et les résultats d'impact-écho présentaient des incohérences les rendant peu pertinents pour un article. Ils ont néanmoins permis de constater certains phénomènes et c'est ce qui est détaillé dans cette section.

Les signaux d'impact-écho pour ces pavages étaient plutôt difficiles à analyser. Sur la plupart des signaux, il était possible d'observer de un à trois pics, soit :

- Un pic de basse fréquence situé autour de 900 Hz (Figure 3.7);

- Un pic de haute fréquence situé autour de 8 kHz;
- Un pic de haute fréquence situé au-delà de 11 kHz (Figure 3.8).

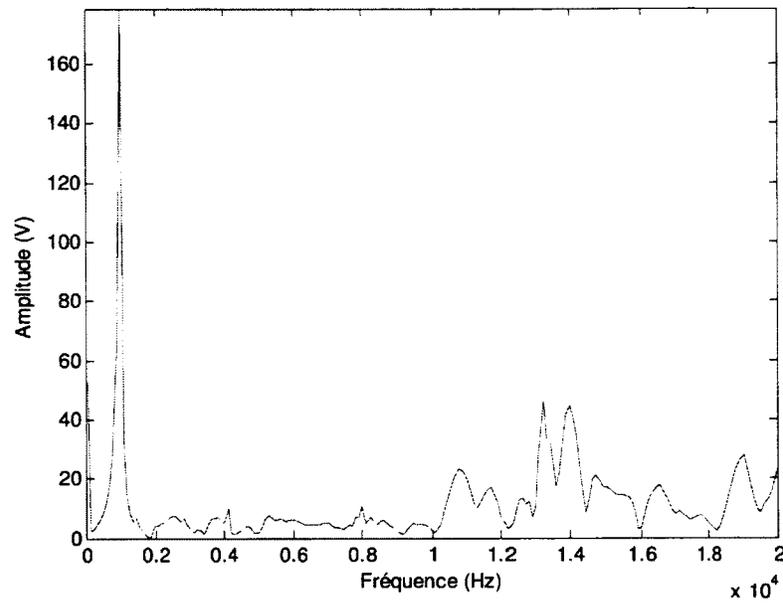


Figure 3.7 : Spectre fréquentiel provenant d'un essai sur pavage présentant un pic de basse fréquence

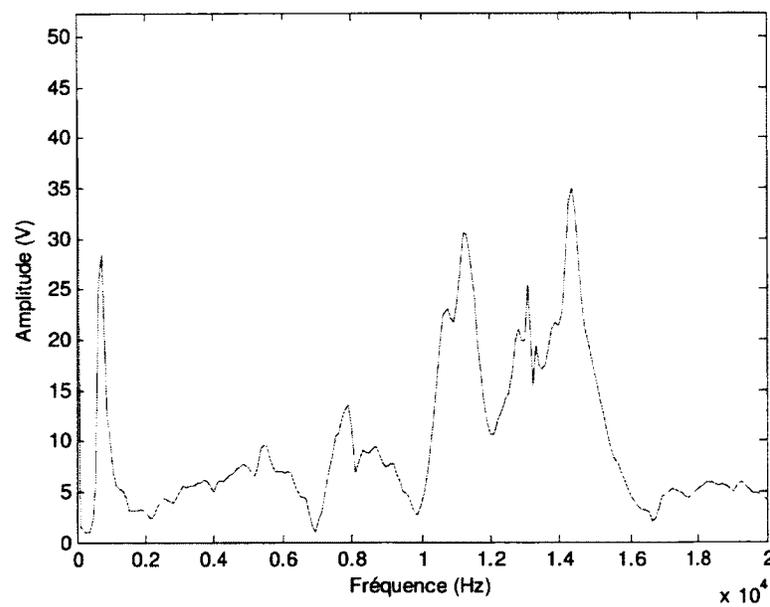


Figure 3.8 : Spectre fréquentiel provenant d'un essai sur pavage présentant plusieurs pics de haute fréquence

La fréquence située autour de 8 kHz correspond à la fréquence de résonance d'une structure d'environ 30 cm d'épaisseur, le cas échéant. Toutefois, deux pics demeurent inexplicables. La première tentative d'explication imputait les pics de 900 Hz et de plus de 11 kHz à une délamination à environ 15 cm de profondeur. Le pic de basse fréquence aurait été associé au mode de vibration en flexion et le pic de haute fréquence au mode de vibration d'épaisseur qui est plus élevé pour une plus petite épaisseur [Sansalone, 1997].

Cependant, étant donné que le carottage n'a indiqué aucune délamination dans le pavage, cette première hypothèse a été écartée. Étant donné que le pic de basse fréquence était constamment présent sur tous les spectres comme étant la fréquence dominante, on a plutôt associé ce pic à la circulation dans la voie adjacente dont l'effet est vraisemblablement dominant dans la plupart des cas. La haute fréquence a finalement été attribuée aux rainures présentes à la surface du béton.

Pour procéder à l'analyse, on s'est concentré sur les pics situés autour de 8 kHz. La vitesse indirecte rapportée par les fréquences identifiées oscillait entre 3500 m/s et 5000 m/s, suggérant un très bon béton. Toutefois, pour certains signaux, il a tout simplement été impossible d'identifier la fréquence de résonance correspondant à l'épaisseur du à la présence de trop nombreux pics ou de l'absence de pics dans la fourchette de fréquences d'intérêt. Changer l'outil d'impact pour une bille d'acier a nettement amélioré le signal.

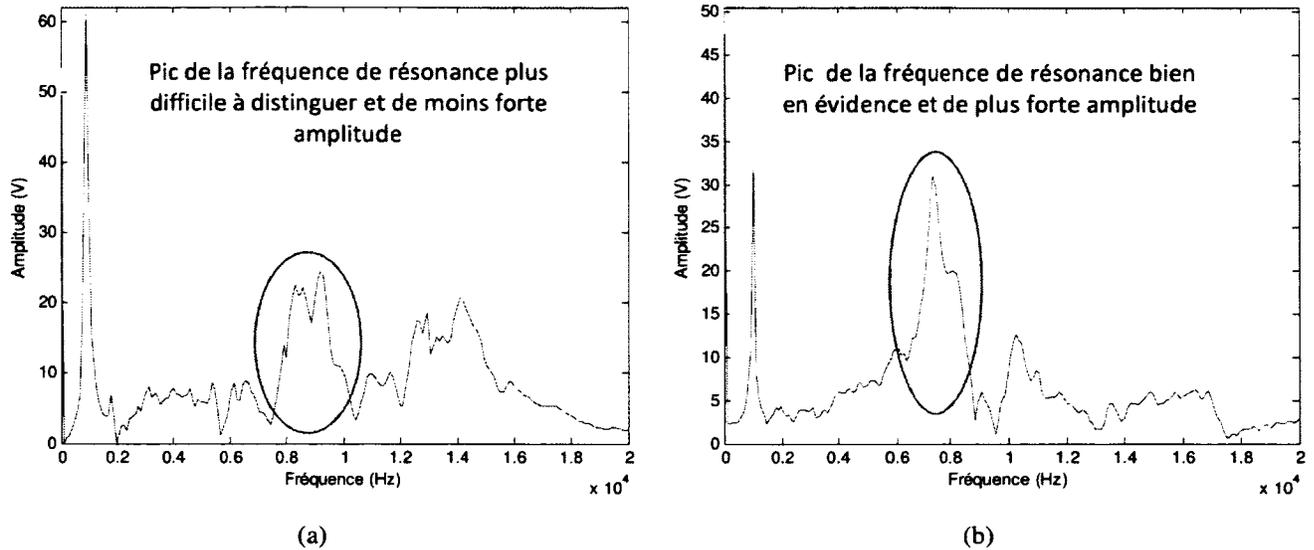


Figure 3.9 : Spectre fréquentiel généré avec (a) un boulon et (b) avec une bille d'acier

La Figure 3.9 permet d'apprécier la différence du spectre fréquentiel lorsque l'impact est généré avec une bille d'un impact généré avec un boulon. On voit que la figure 3.7b permet de bien identifier la fréquence de résonance correspondant au mode de vibration d'épaisseur malgré la présence du pic de basse fréquence. Les fréquences parasites sont presque éliminées. Ce résultat permet de constater que l'outil pour générer l'impact a une grande influence sur les résultats obtenus. La forme de l'outil a une incidence sur la production d'ondes parasites. Il est préférable de s'en tenir aux billes qui permettent plus facilement de mettre en évidence la fréquence de résonance. Par contre, pour certaines structures plus massives, la frappe des petites billes à la main ne produit pas une onde suffisamment puissante pour se réfléchir sur la face opposée et revenir avec une amplitude suffisamment élevée. Dans ces cas, il faut utiliser un outil qui constitue un bon compromis entre la qualité du spectre fréquentiel et la puissance, possiblement une bille d'acier de plus grand diamètre que les dimensions conventionnelles avec un mécanisme de type ressort afin de maximiser la puissance de l'impact.

CHAPITRE 4

PREMIER ARTICLE

4.1 Avant-propos

Titre :

Les techniques non destructives pour l'évaluation des structures de béton atteintes de la réaction alcalis-silice

Auteurs et affiliations:

D. Bui : Étudiante à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil

S. A. Kodjo : Professionnel de recherche, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil

P. Rivard : Professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil

B. Fournier : Professeur, Université Laval, Faculté de génie, Département de géologie et génie géologique

Date de soumission : 18 décembre 2011

Revue: ASCE Journal of Bridge Engineering

Contribution au mémoire :

Cet article porte sur les travaux d'auscultation *in situ* décrit dans le chapitre 3. Il contribue au mémoire en exposant les résultats, analyses découlant des campagnes effectuées sur des structures routières situées au Maine et Vermont. Les conclusions de cet article a permis d'orienter en partie les travaux de laboratoire présenté aux chapitres 5 et 6.

Résumé français:

Malgré que de nombreuses recherches aient été effectuées sur la réaction alcalis-silice (RAS) et que notre compréhension du phénomène est plus juste que jamais, un nombre important de structures touchées et leur niveau d'endommagement demeurent encore inconnus. Il y a donc besoin d'un moyen efficace d'identifier le problème, quantifier l'endommagement et faire le suivi des structures dans le temps afin de déterminer l'efficacité des mesures de mitigation.

La maniabilité et la sensibilité d'une combinaison de techniques acoustiques pour l'auscultation *in situ* ont été mises à l'épreuve sur des structures en service. Différents types de structures autoroutières dans le nord-est des États-Unis ont été évalués en utilisant l'impact-écho, la vitesse d'impulsions ultrasonores et le saut temporel, une nouveauté dans le contrôle non destructif. De ces trois techniques, quatre indicateurs (vitesse provenant de la fréquence de résonance, la vitesse directe, la fréquence centroïde et le saut temporel) ont été étudiés. Les résultats de ce projet de recherche aideront à élaborer un guide méthodologique pour les essais non destructifs sur les structures en service qui pourra être intégré à un protocole d'inspection.

4.2 Introduction

The alkali-silica reaction (ASR) is a damaging process occurring in concrete, causing expansion and extensively distributed cracking on numerous structures worldwide. Because the reaction has been studied thoroughly, new concrete is less prone to this type of damage. Today's great challenges are to identify the structures affected by ASR before the symptoms become uncontrollable, to determine the level of damage and to assess and monitor the efficiency of mitigating measures.

The global aim of the work presented here is the validation and calibration on structures in service of existing non-destructive techniques and techniques developed in the laboratory and validated on full-scale specimens. These structures are composed of pavements, piers, abutment walls and barriers. This paper presents the results from these interventions, discuss the conclusions and present recommendations on the techniques and further investigations possible.

4.3 Alkali-Silica Reaction

When aggregates with amorphous or microcrystalline silica bathe in a high-alkaline environment like concrete, a reaction may occur between the silica and the alkaline hydroxides [Fournier et Bérubé, 2000]. This reaction produces a gel which composition varies within the affected concrete, versus the location within the reactive aggregate particles or in the cement paste, and from a concrete to the other [Poole, 1992]. This gel is deposited in voids and cracks of the reactive aggregate particles and of the cement matrix. The expansion of concrete takes place in two cases: whether by the presence of greater volume of gel than of voids or by the swelling of the gel with water ingress. In both scenarios, the gel produces an internal pressure on the concrete which, in turn, would crack [Kodjo, 2011]. Cracks can be seen at the micro and macro levels and affect the whole of the structure. They are often filled with gel, which is viscous at first and crystallizes after a certain time.

A literature review showed that this type of damage does not affect structural integrity in most cases [Sims, 1992]. Compressive strength does not decrease significantly, neither does flexural strength at the beginning of the reaction. However, modulus of elasticity and tensile strength do change very early in the process [Fournier et Bérubé, 2000] [Rivard et Saint-Pierre, 2009]. Hence, mechanical non-destructive techniques (rebound hammer, pull-out tests, etc.) are quite helpless, most characterizing compressive strength of concrete. Acoustic techniques are, thus, best suited for this type of distributed cracking, waves being greatly influenced by cracks.

4.4 In Situ Testing

4.4.1 Non Destructive Techniques

a) Impact-echo

Because ASR produces a dense cracking network, it modifies the elastic modulus and hinders wave propagation, thus, changing the resonant frequency of the concrete.

The impact-echo technique uses the reflection of acoustic waves at an interface between two materials to determine the resonant frequency. It is normalized under ASTM C 1383. Generation of acoustic waves is done by tapping steel balls on the surface of the structure. The dimension of the ball varies according to the frequency that is to be transmitted into the material. For shallow structures, higher frequencies are best suited; therefore, smaller balls must be used [Cheng et Sansalone, 1993]. The reflected wave is then detected by an accelerometer and recorded onto the computer. Signal spectrum is obtained through a Fast Fourier Transform and helps determine the resonant frequency of the element tested. The resonant frequency (f) depends on the velocity of the P-wave (C_p) in the medium and on the thickness (T) of the element:

$$f = \frac{0.96C_p}{2T} \quad (4.1)$$

The 0.96 factor in front of P-wave velocity is due to the thickness mode of vibration appearing in plate-like elements (“infinite” length for finite thickness) [Carino, 2001]. Because impact-echo is used mostly on elements such as plates, this factor is always to be considered.

Impact-echo has been designed to detect and locate defects such as honeycombs, voids and delaminations by analyzing the different peaks in the frequency spectrum generated by the flexural mode of vibration [Cheng et Sansalone, 1993]. The use of impact-echo to assess distributed cracking depends mainly on the thickness mode of vibration. When thickness is known, velocity is then evaluated as an indirect measure of distributed damage.

B) Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

The UPV technique consists of sending pulses of ultrasonic longitudinal waves in a material and to record these pulses at a set distance. The P-wave velocity is obtained by dividing the time of flight over the distance between the two transducers. This technique has been largely used for decades to determine concrete strength at early age, and is standardized under ASTM C597-02.

Many concrete quality classification based on UPV exist. We have used the classification from Table 4.1. These classifications are much criticized in literature because they do not take into account all the factors influencing velocity other than the damage state of the concrete. This can have important impact on the interpretation of results. The classification proposed in this project aimed at comparing results and do not qualify directly the concrete condition.

Tableau 4.1 : Concrete classification based on ultrasonic pulse velocity [Malhotra, 1976] [Whitehurst, 1951]

Pulse velocity (m/s)	Concrete classification
$V > 4575$	Excellent
$4575 > V > 3660$	Good
$3660 > V > 3050$	Questionable
$3050 > V > 2135$	Poor
$V < 2135$	Very poor

Centroid Frequency

Centroid frequency or spectral centroid is a variation of the frequency of highest amplitude and the mean frequency. It is the “center of mass” of a frequency spectrum $v(x)$

[Peeters, 2004] and is evaluated with following the integral:

$$\mu = \int x \cdot p(x) dx \quad (4.2)$$

x being a frequency and $p(x)$ is the probability to observe x .

It is not a technique per say but should be considered as an indicator of damage. In practice, it is calculated using Fast Fourier Transformer from ultrasonic transmission signals recorded (during an UPV or time-shift test) with the following equation:

$$f_{centroid} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} f_i A_i}{\sum_{i=0}^{N-1} A_i} \quad (4.3)$$

where A_i denotes the spectrum amplitude at the frequency f_i and where N denotes the number of samples of the signal, for a duration T of the signal recorded with a sample rate f_e ,

$$N = f_e T + 1.$$

When a signal is transmitted into a medium, higher frequencies tend to be filtered by physical phenomena such as attenuation and/or diffusion induced by defects and heterogeneities. Hence, the lower the centroid frequency is, the more damaged is the concrete.

Nonlinear Acoustics: Time-shift

In nonlinear acoustics, a wave of great amplitude is used to open-close microcracks. Because concrete is a heterogeneous material, this action modifies its elastic properties and triggers a nonlinear behaviour. The more damaged the concrete is, the more nonlinear is its behaviour.

With the time-shift technique, the nonlinear behaviour is evaluated using a combination of the existing technique of coda wave interferometry [Snieder *et al.*, 2002] using pulses of high frequency probing waves with a strong low frequency wave induced by an impact at the surface of the concrete element to modify its properties instantaneously. With the cross-correlation

function on a signal processing software, the time delay between the signals before and after impact is calculated [Kodjo, 2008].

This delay can be calculated for three types of waves: P-waves, S-waves and coda waves. Coda waves are the result of the superimposition of several secondary waves generated by the incidence of primary waves on heterogeneities in the concrete [Herraiz and Espinosa, 1987]. These waves make it possible to gather information on a greater volume of material and not only from a specific wave path.

4.4.2 Equipment

For all the indicators mentioned above, two sets of equipment were required. The Andescope[®] gathers all the necessary data for impact-echo, UPV and pulse-echo tests. Three types of transducers can be used: accelerometers, 25 kHz transducers or 50 kHz transducers.

The second set of equipment is comprised of a computer containing an ADLINK PCI-9820 acquisition board and a signal generator specially designed for nonlinear acoustics on concrete. It allows sending and recording a series of signals with a central frequency of 250 kHz. It uses two Panametrics V1012 piezoelectric transducers centralized at 250 kHz. Because signals are recorded, they can be viewed and analysed later in time. From these signals, time shift, velocity of direct waves and centroid frequency can be extracted.

Transducers, when used in pairs, can have three different configurations: direct, semi-direct and indirect transmission. When only one side of the structure is reachable by both transducers (e.g. abutment walls), indirect transmission is used. Semi-direct transmission using Plexiglas wedges is under investigation in the laboratory to assess signals properties and sensitivity to damage.

4.4.3 Structures Evaluated

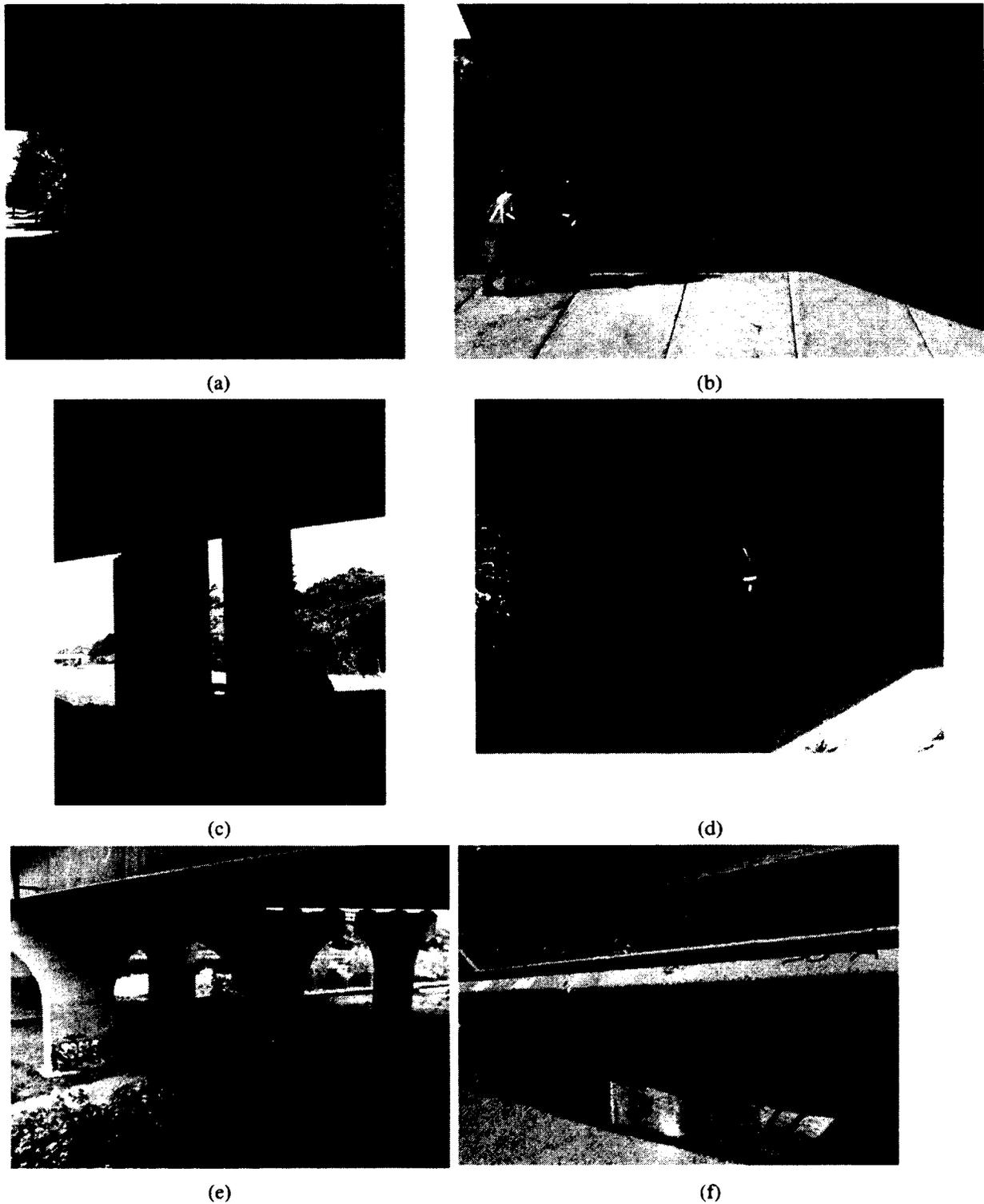


Figure 4.1: Structures investigated: wall 1, 2 and 3 (a,b,d), Columns (c), Piers (e) and Barrier walls (f)

Structures evaluated in the field included three abutment/wing walls, two bridge piers, six columns and bridge barrier walls on two different highways. For the purposes of this article, structures will be called Wall 1, 2 and 3, Piers, Columns and Barriers, respectively (Figure 4.1).

An initial visual inspection found the structures to present similarities: concrete elements more exposed to sun and rain were visibly more damaged than protected elements. A limited number of measuring points were taken to be able to test different techniques and thus get a global picture of each structure. Because of this limitation, results mainly served at orienting investigation work in the laboratory to optimize the techniques and not to draw conclusions on the damage state of the structures.

The first campaign carried out in the summer of 2010, puts the techniques in a field work context over a variety of structures at different damage levels. They helped drawing perspectives and directions for the follow-up work.

The second campaign took place in the summer of 2011. It aimed at gathering more data to confirm and support the conclusions from the first campaign. Fewer structures were tested but more testing points were evaluated on each of them, allowing the observation of more similar data. For UPV and time-shift, new points were evaluated in addition to points from the 2010 campaign. The extra measurements were taken in different directions around the initial points. The data presented focus on Walls 2 and 3 and the Piers.

To easily and quickly correlate non-destructive test results with damages observed on the surface of each measuring point, the Surface Damage Index (SDI) was created by our research team. The index qualifies surfaces upon two criteria: the density of cracking pattern and the average width of cracks. The two criteria are evaluated as no cracks (N), low density/fine cracks (F, roughly < 0.2mm in width), medium density/cracks (M, 0.2mm to 1mm) and high density/important cracks (I, >1mm). Each grade is linked to an index. This allows the grading of each measuring points from 0 to 100, 100 being the worst (Table 4.2).

Tableau 4.1 : Example of Surface Damage Index Rating for different surfaces (approx. scale 1:10)

Width	I++	I+	I	F-	N
Density	I+	I	M-	F	N
Index	95	85	60	15	0

This index is mainly qualitative and very subjective, it is based on a visual observation without counts or mappings and varies from one observer to the other. However, for the purposes of the project, it was a useful tool. Due to the wash-off of alkalis at the surface of concrete structures, expansion within the concrete causes cracking at the surface where ASR is impeded. Thus, larger cracks may indicate greater expansion from ASR.

4.5 Results and Discussion

4.5.1 Indirect Velocity

From the resonant frequencies retrieved in impact-echo, indirect velocities were evaluated with Eq. 4.1, thickness being known. Average velocity was around 3000 m/s (Figure 4.3) when data from the Piers were excluded. According to the classification from Tableau 4.1, the concrete would be qualified as questionable. It is believed that this qualification underestimates the concrete quality and might be due to many factors other than strength. Data from the Piers indicate, however, much higher velocity values averaging 4800 m/s. This result was predictable due to the higher level of reinforcement on this type of structure reducing cracking. Moreover, these structures are better protected from rain and snow. Concrete on the bridge piers showed very fine cracks and little damage was visible on these structures (Figure 4.2).

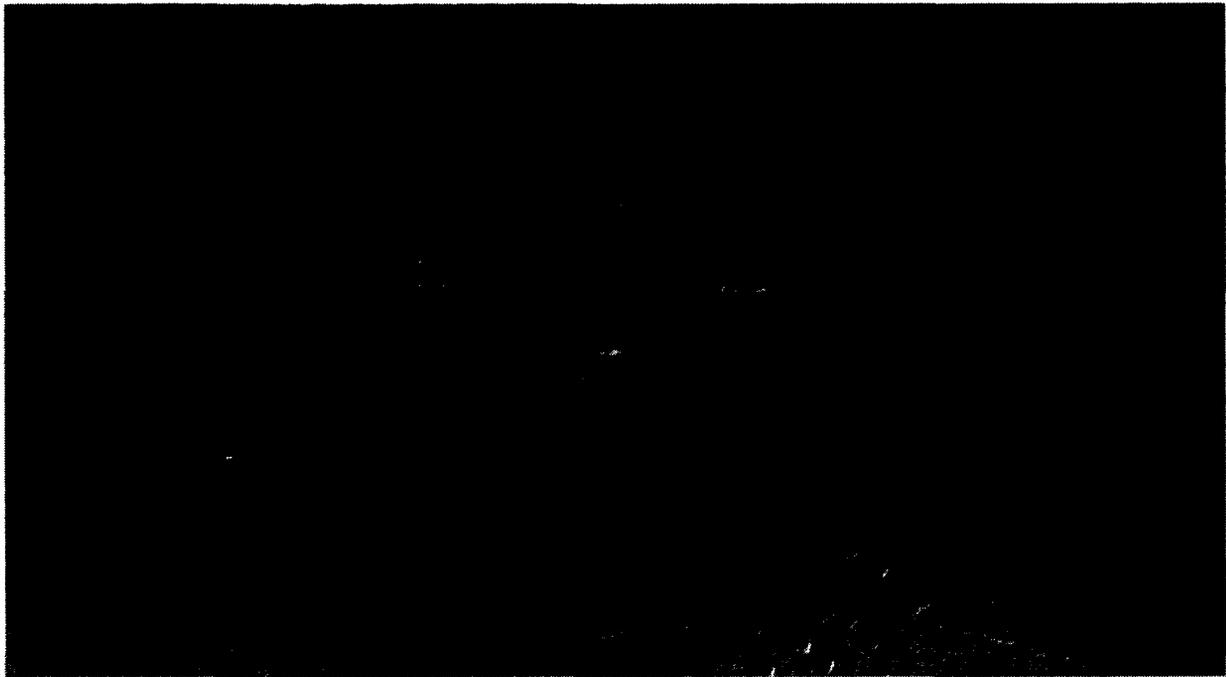
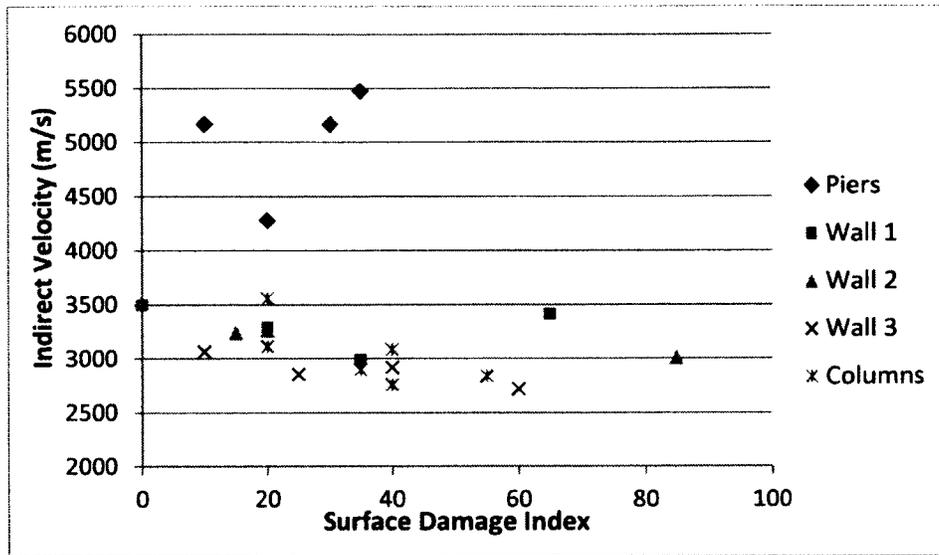
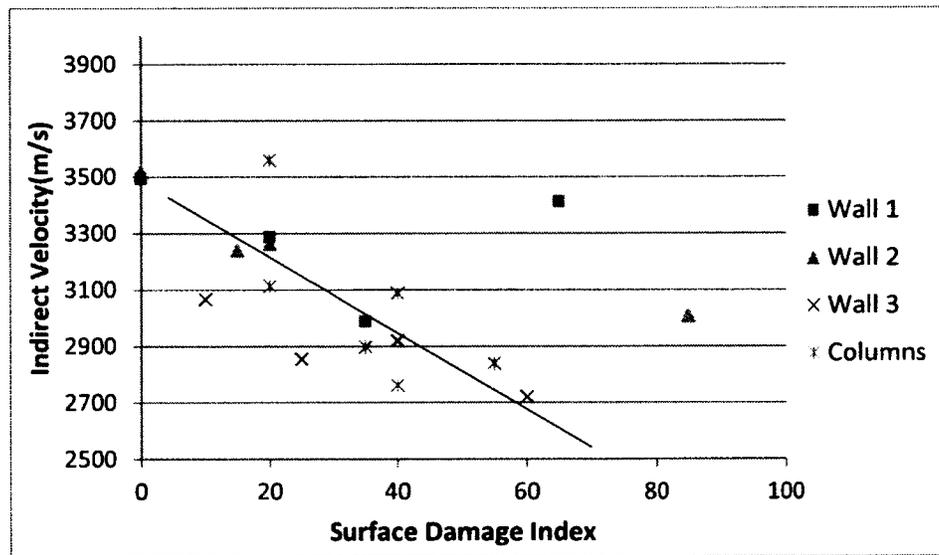


Figure 4.2 : A measuring point on a Pier. The area spans approximately 80 cm by 45 cm.

Correlation of velocity with SDI was also studied. On Figure 4.3.a, there seems to be no variation in the velocity for increasing SDI. However, by discarding the considerably higher Piers data, it became possible to see a more defined variation of the indirect velocity (Figure 4.3.b), but still with a low correlation. Two possible conclusions can be drawn from this result: indirect velocity is not sensitive enough or surface damage and indirect velocity do not take into account the same type/orientation of damage.



(a)



(b)

Figure 4.3: Indirect velocity vs. Surface Damage Index for (a) all the structures and (b) for the overpass structures with a smaller vertical scale

On the other highway, the barriers were found to bear damaged concrete with extensive surface cracking. Their SDI ranged between 20 and 60, which is indicative of moderate surface damage.

The same exercise of correlating indirect velocities with SDI has been done. The resulting graph showed no clear trends (Figure 4.4). For the same rating, velocities indicate poor, average and good concrete.

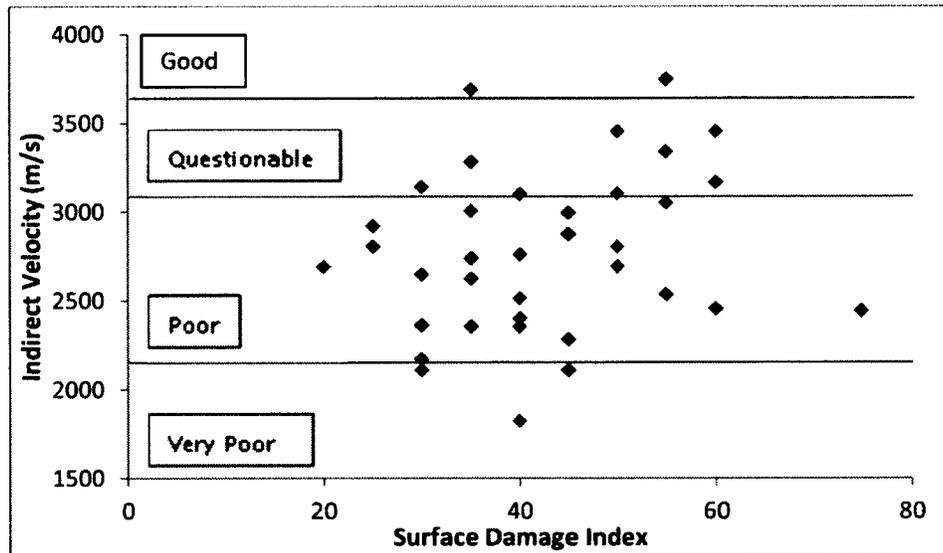


Figure 4.4: Indirect velocity vs. surface damage index for barrier walls

The same two possible conclusions are applicable here: indirect velocity is not sensitive to map-cracking damages or surface damage and indirect velocity do not take into account the same orientation of cracking. Another explanation would be that the damage visible at the surface is likely not representative of the internal damage as is often the case with ASR and that internal damage is quite uniform. In fact, due to differential expansion, macrocracks appears at the surface and penetrate up to a few centimeters [Rivard et St-Pierre, 2009]. Internal damage is mainly microcracking. These conclusions are further explored in the following section on UPV.

In 2011, the structures underwent a systematic impact-echo testing on a loose grid (every 30-50 cm) over different surfaces of the structures and the SDI was left aside since the first campaign showed poor correlation. This grid testing aimed at zoning the more defective areas and also to compare results from most to less damaged surfaces. The walls surfaces were broken down into testing panels, as presented on Figure 4.5, knowing that wing walls and the side

areas of the abutment wall are more subject to surface cracking because of weathering/exposure to moisture, which promotes development of ASR.

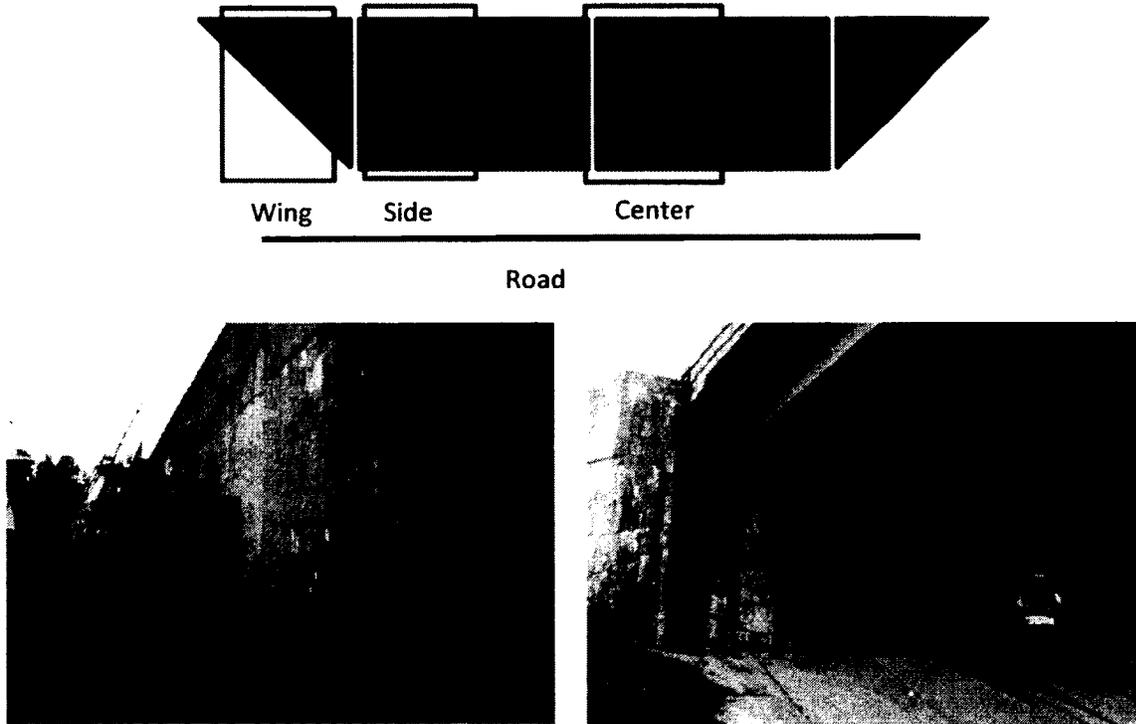


Figure 4.5: Testing panels configuration on abutment walls for Impact-Echo. The *Wing* portion of the structure is directly exposed to moisture, while the *Center* portion is protected from direct exposure to moisture, being under the bridge deck.

The initial results showed very complex frequency spectra with high frequency peaks corresponding to unknown components of the concrete (Figure 4.6a). The thickness mode frequency, which should be somewhere between 1 and 2 kHz, is very hard to identify on such spectra. Dondonné and Toussaint [2002] proposed a signal processing technique to overcome this difficulty: the *wavelets* technique. This technique, developed in the 80's, allows us to highlight the frequencies in a bracket corresponding to the expected thickness mode frequencies (Figure 4.6b).

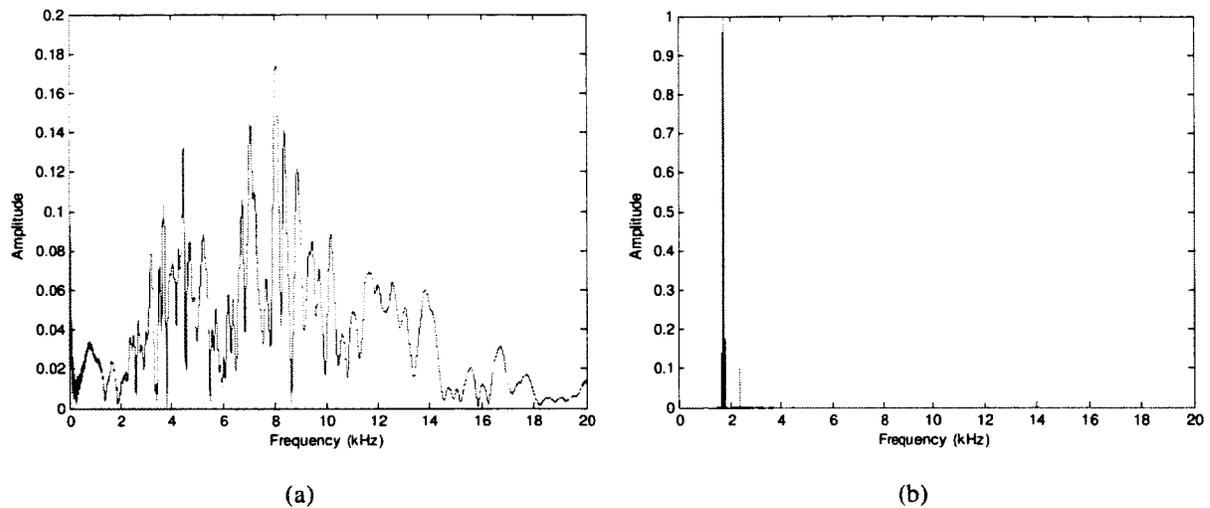


Figure 4.6: Impact-echo test result (a) before and (b) after *wavelets* processing

Following the treatment of all data with the *wavelets* technique, resonant frequencies were retrieved and indirect velocities were calculated. These velocities were distributed following the concrete classification presented in Tableau 4.1. Figure 4.7: Classification of concrete on the three structures according to indirect velocity from impact-echo test presents the recurrence of a concrete quality in the results for each panel of the three structures evaluated based on the recorded indirect velocity. This helps visualizing concrete quality distribution for each concrete element. Overall, indirect velocities seem to be higher on this campaign. Most of the results indicate a questionable or good concrete. Again, the Piers are qualified as good to excellent concrete, exceeding the other structures in velocity, but also exceeding their own results from 2010 campaign, a quarter of the results exceeding 5500 m/s, a velocity close to wave velocity in steel. It might be that these measuring points were taken directly over a rebar, which increased wave's velocity.

On Wall 2, while there is no significant difference in the velocity distribution for the side and the center panels, the wing panel does show a lower quality concrete overall. On Wall 3, the difference between side and center panels seems clearer. This is opposite to 2010 results from

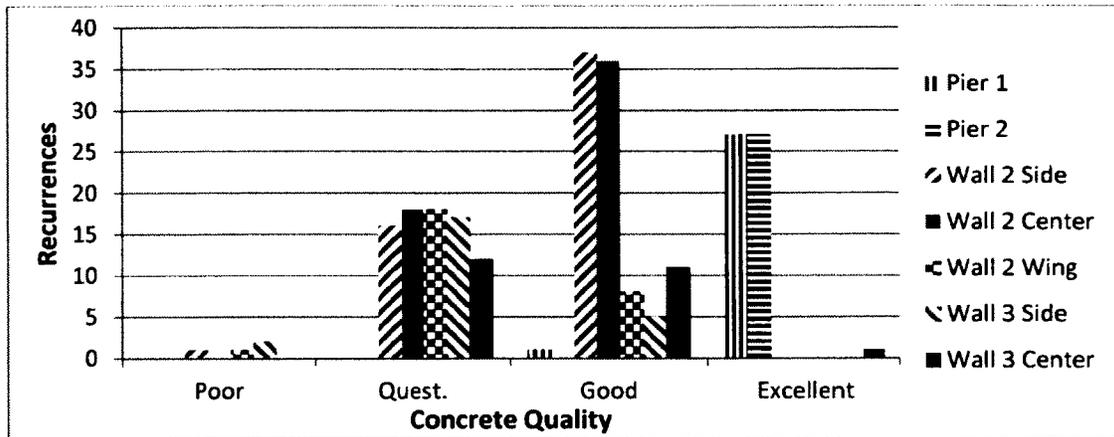
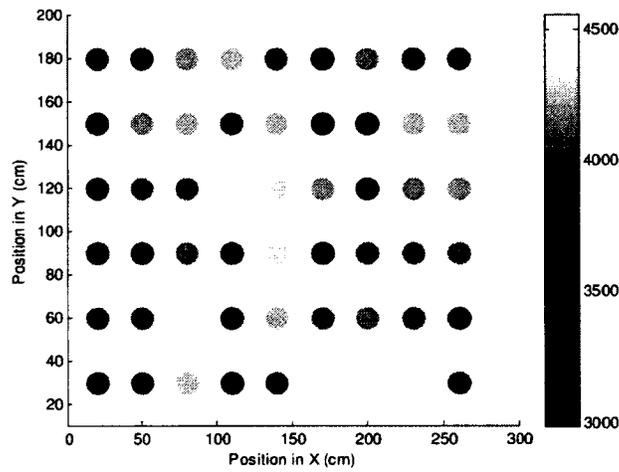
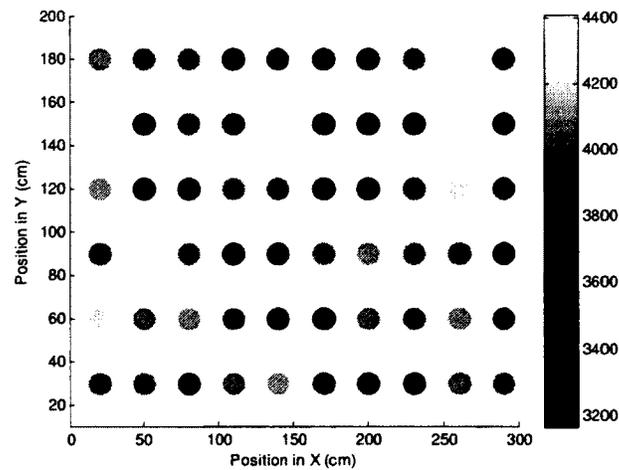


Figure 4.7: Classification of concrete on the three structures according to indirect velocity from impact-echo test



(a)



(b)

Figure 4.8: 2D representation of indirect velocities from impact-echo for Wall 2 (a) side panel (exposed to weather) and (b) center panel (protected from weather)

single measuring points on each panel: contrast on Wall 2 was greater than contrast on Wall 3. Thus, regarding testing with impact-echo, it is likely better to evaluate a surface than punctual measurements to reduce errors in the interpretation. Testing on a grid also allows a 2D representation of the data (Figure 4.8) and the possible location of weaker concrete areas.

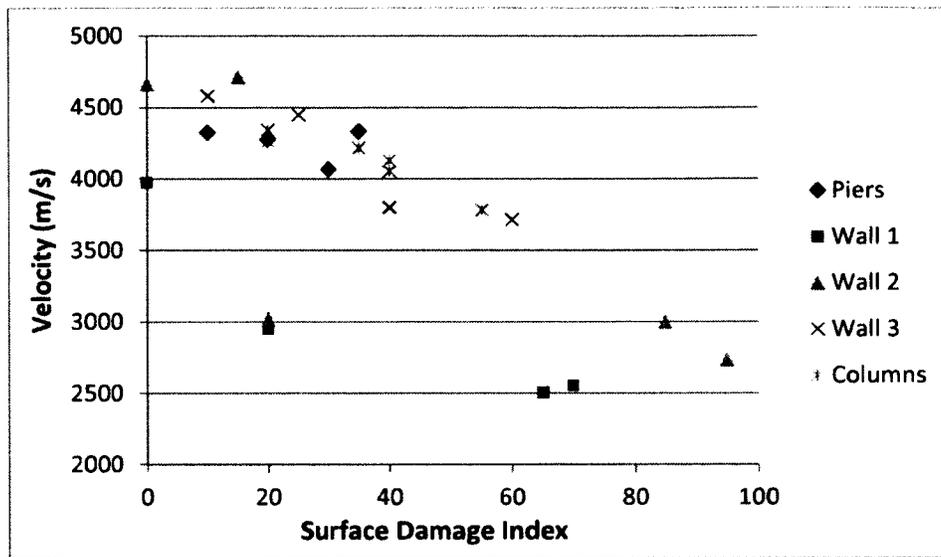
Impact-echo has the advantages of a simple technique to employ on-site and the equipment is compact and sturdy. The recorded data allow an overview of the condition of concrete using indirect velocity. However, frequency spectrum can be complex in the presence of reinforcement, peculiar geometries and with high frequency sensitivity transducers. A good knowledge of signal treatment or an experienced operator is required to perform a good analysis. Results are also very sensitive to the force of impact, the pressure on the sensor and to irregularities at the surface. However, sensitivity of the technique to distributed damage is yet to be proven with other means since surface damage does not correlate well with resonant frequency or indirect velocity. Certain discrepancies can also appear in the results from various sources. Thus, it is a technique to be used with a well-developed critical sense.

4.5.2 Direct Velocities

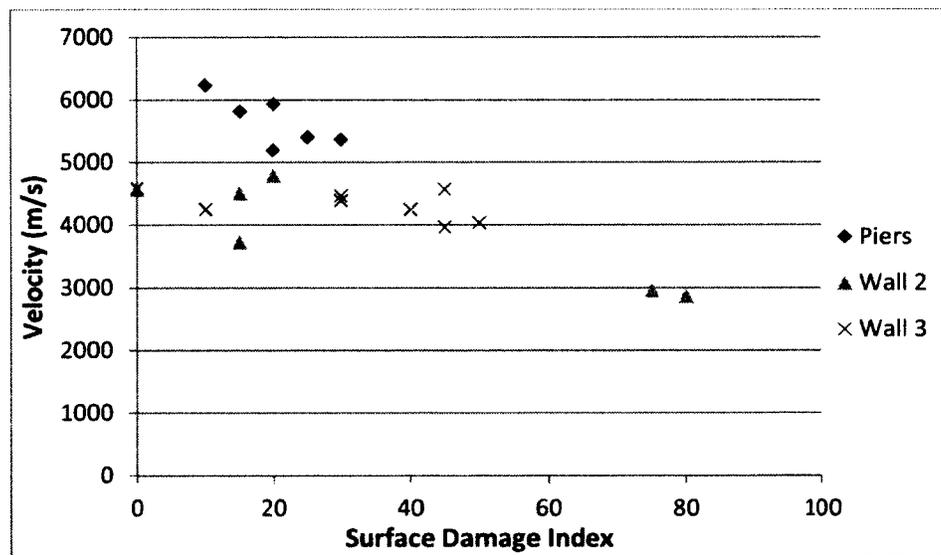
For the walls, columns and piers, direct velocities were calculated from the arrival time of direct P-waves on signals recorded in indirect transmission. For the barrier walls, it was calculated from the arrival time of P-wave in through-transmission.

For 2010 results on the walls, columns and piers, direct velocities indicated a good concrete condition in most cases and poorer concrete for certain areas on Walls 1 and 2, which, in many cases, seemed visually more damaged (Figure 4.9a). Their side spans presented large cracks and abundant exudation. Notwithstanding results from Wall 1, which are quite isolated from the main trend, a strong linear correlation relates direct velocities with the SDI. This result offers the perspective of a master curve independent of the nature of the concrete, supporting the theory of linear agreement between velocity of direct waves and damage. It appeared that the SDI, despite its subjectivity, can be relevant.

In 2011, results still showed a linear correlation with SDI (Figure 4.9b) when Piers data are taken into account, but results from the Piers are abnormally high (velocities > 5000 m/s). Testing configuration is discarded as an explanation, because it did not affect results from the other structures. As with indirect velocities, the additional measuring points might have been taken directly over rebars, accelerating the wave's propagation. Part of the problem also lied in the unclear beginning of the signal recorded on the piers, causing difficulty to pick the arrival time of direct waves. If Piers data are discarded, the linear trend is a much lower variation of velocity with increasing SDI.



(a)



(b)

Figure 4.9: Velocity in indirect transmission vs. Damage Index on walls, columns and piers in (a) 2010 and (b) 2011

On the opposite, results for through transmission on the barrier walls were disappointing. The signals were noisier than expected and defining the starting point of the signals was uneasy. As was observed with indirect velocity, results here are scattered, but they indicate mainly a poor quality concrete (Figure 4.10), which was worse than what was visually observed. Most results are clustered around 2500 m/s and 3500 m/s values. The higher values are found to be

at one end of the bridge. Again, the seemingly trend that goes upwards is contrary to the initial assumptions.

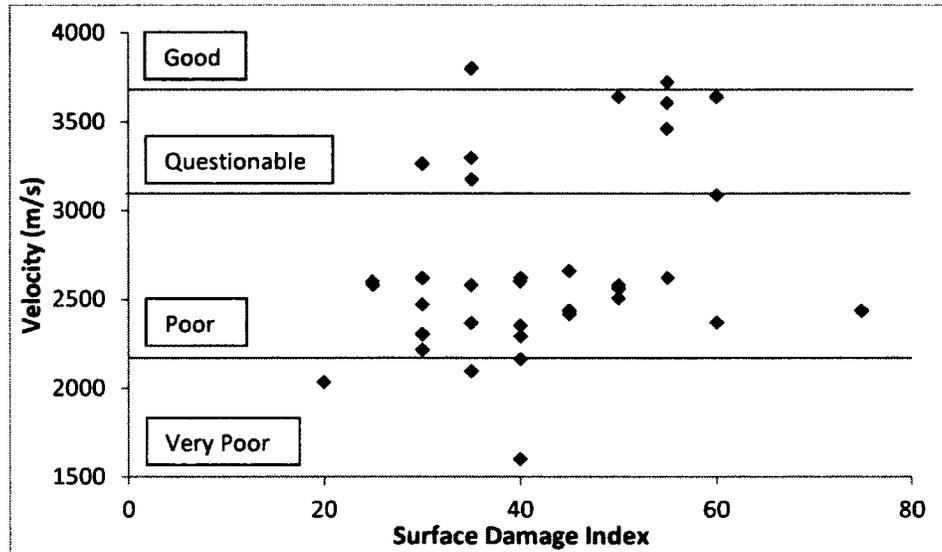


Figure 4.10: Velocity in through transmission vs. Damage Index on the barrier walls in Vermont

Because results from indirect transmission were good and results from through transmission were not, the hypothesis was formulated that what influences most wave propagation is the encounter of perpendicular cracks. In indirect transmission, waves propagate perpendicularly to visible cracks at the surface, thus crossing most of them. Velocity is measured with the arrival of a direct P-wave taking the shortest path, which is the surface. This is why correlation with the SDI is much better.

On the barrier walls, with through transmission, waves propagated parallel with the visible surface cracks, thus the nonexistent correlation with the SDI. Moreover, expansion is restrained in certain directions by the geometry and reinforcement. Longitudinal restraints make vertical cracks less likely and horizontal cracks more visible. But the cracks observed in through transmission cannot be assessed visually and are occurring in the direction with the least restraints.

To evaluate the validity of the hypothesis, comparison with data taken in the same orientation was to be performed. Because in impact-echo mode, waves also propagate parallel to visible cracks, indirect velocities from impact-echo were used (Figure 4.11). The correlation is not perfect - the coefficient of correlation being equal to 0.85 - but quite defined for direct velocities above 3000 m/s. This is a significant correlation: if results derived from two different techniques correlate, it gives great confidence in the results themselves.

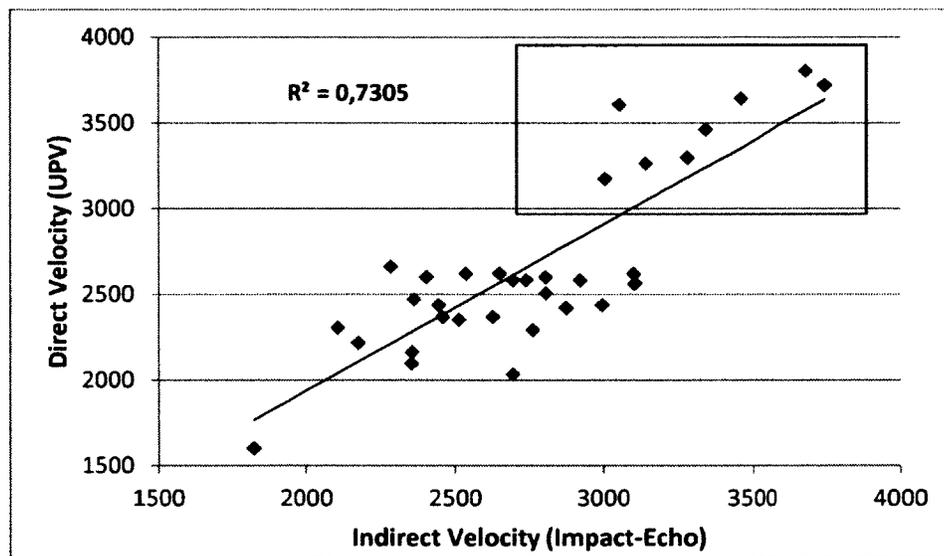


Figure 4.11: Direct Velocity (UPV in through transmission) vs. Indirect Velocity (Impact-Echo) from barrier walls

Thus, the problem is not in the operation of the equipment or the indicator being insensitive. It comes from the fact that the SDI and UPV in through-transmission do not take into account the same damage (orientation of cracks). This also applies to impact-echo results and explains the low correlation observed. Confidence in impact-echo's results is paramount in evaluating distributed cracking in the body – which is the first indication of ASR – because it is frequent that access to a second side of the structure for through-transmission is not available or renders feeble signals because of the thickness of the concrete.

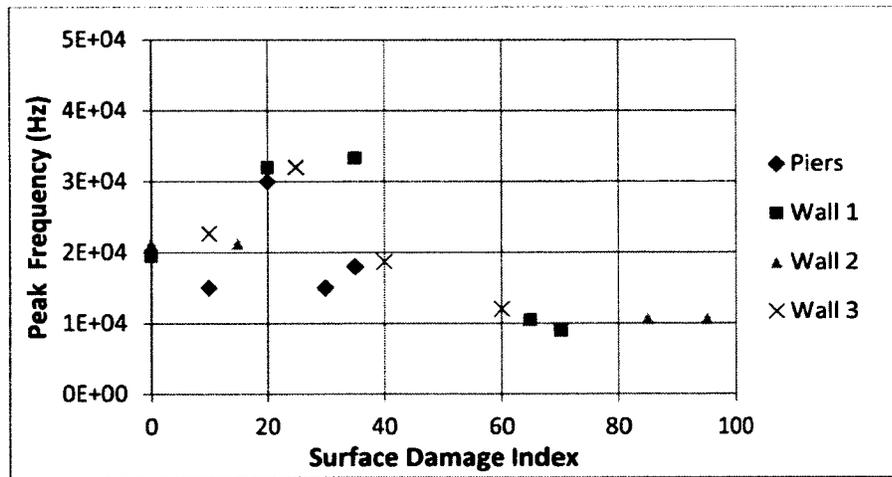
4.5.3 Peak frequency and Centroid Frequency

Three types of frequencies were evaluated from the signals recorded with the time-shift equipment in indirect transmission: peak frequency and centroid frequencies calculated from the signal amplitude spectrum (FS) and power spectral density (PSD) to account for noise.

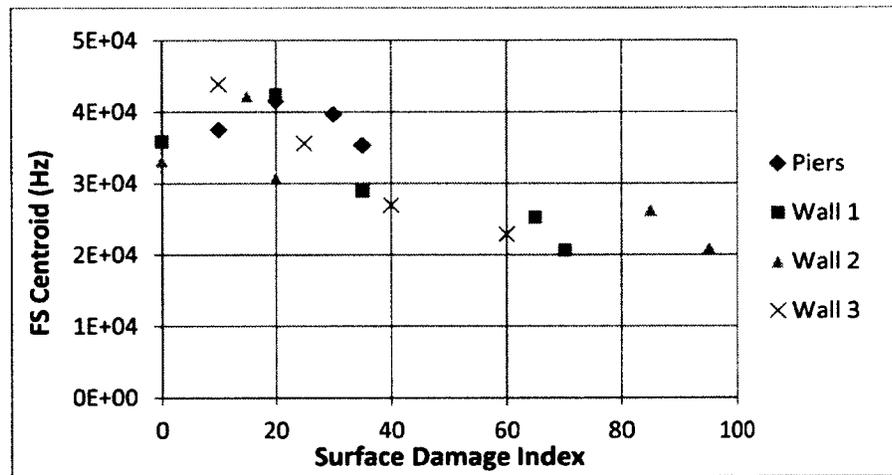
It was expected that any type of frequency would decrease with damage because of the signal staggering when it encounters defects in the medium. Thus, centroid frequencies, from both the frequency spectrum and PSD, and the peak frequency versus the SDI data, were plotted (Figure 4.12). Data from the Columns were removed because the propagation distance was much greater for these structures and that good coupling was harder to get because of the round geometry of the columns, rendering the data incomparable with the others. Piers data were also recorded over a slightly longer distance. The results are still presented on the graphs for information sake, but correlations are calculated without.

Globally, all three data sets support the hypothesis that centroid frequency decreases with a high SDI. Starting at an index of 60, there seems to be a plateau. This might indicate that centroid frequency becomes less sensitive when a certain level of damage is reached. The trend line follows an exponential function.

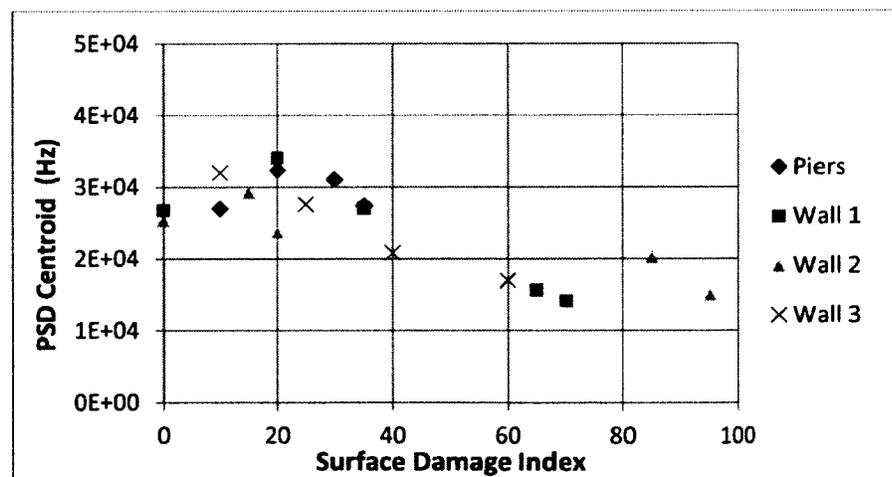
The peak frequency graph (Figure 4.12a) is very scattered and correlation is low. FS and PSD graphs follow the similar trend and similar coefficient of correlation (0.84 vs. 0.83), but FS presents a greater variation to damage. Thus, spectrum centroid was used for subsequent analysis.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.12: (a) Peak frequency, (b) Centroid Frequency from signal's spectrum and (c) Centroid frequency from PSD vs. Surface Damage Index (2010 measurements)

In the 2011 campaign, centroid frequency renders a lower coefficient of correlation: 0.76. It seems that data under a SDI of 20 are slightly more scattered (Figure 4.13). Also, much higher frequencies were observed on this second campaign and this applies to all sets of data. Among the factors affecting centroid frequency other than the presence of cracks and heterogeneities, there is coupling. Whereas petroleum jelly was used on the first campaign, honey was used on this one to have a better capture of the signal. To identify the impact of such a change, a laboratory test was performed on a concrete sample using the same equipment with both coupling agent. A 28% increase of the centroid frequency was recorded for the test using honey over the test using petroleum jelly, which is similar to what has been observed from *in situ* results. By subtracting 28% of the 2011 results, we end up approximately with the same results as in 2010.

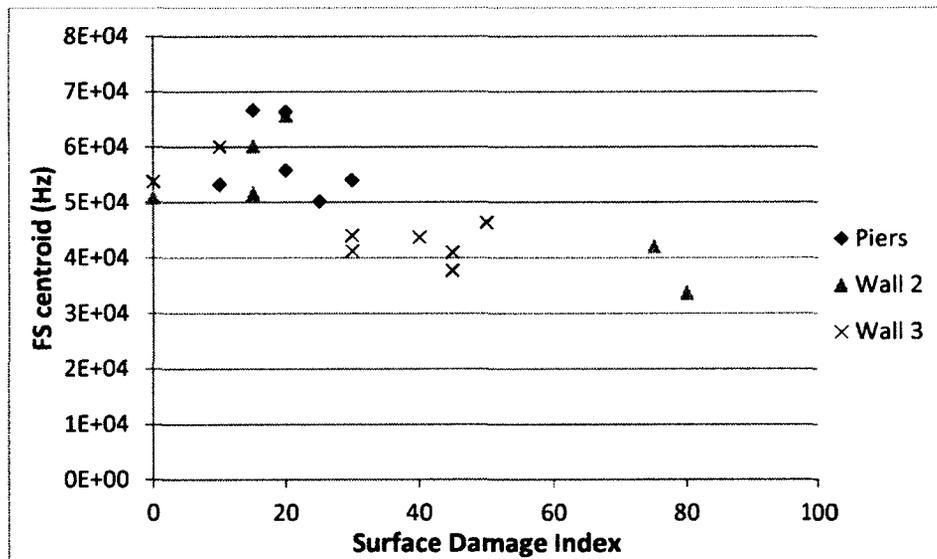


Figure 4.13: Centroid Frequency from signal's spectrum vs. Surface Damage Index (2011 measurements)

Centroid frequency comes from the analysis of a signal that propagated in a volume of concrete close to the surface but of unknown size. The SDI, as its name indicates, only takes into account surface damage whereas centroid frequency accounts for a volume of concrete. Centroid frequency is not only influenced by cracks but any type of heterogeneities. It is still unclear as to what affects it most. These reasons might explain the weaker correlation. More in-

investigation should be done to better understand how this indicator works and how to make it more efficient for indication of damage.

4.5.4 Time Shift

Figure 4.14 illustrates time shift in indirect transmission for each measuring points according to its SDI. One datum from Wall 2 was exceptionally high (5.25E-6s), probably due to its highly damaged state. It has been dropped because it was very far from the cluster and modified the scale uninterestingly. Although the trend shown in this graph is as expected, the data seemed a little too scattered to establish a good correlation. However, when Wall 1 data are discarded, the coefficient of correlation went from very weak to 0.89 for a linear regression.

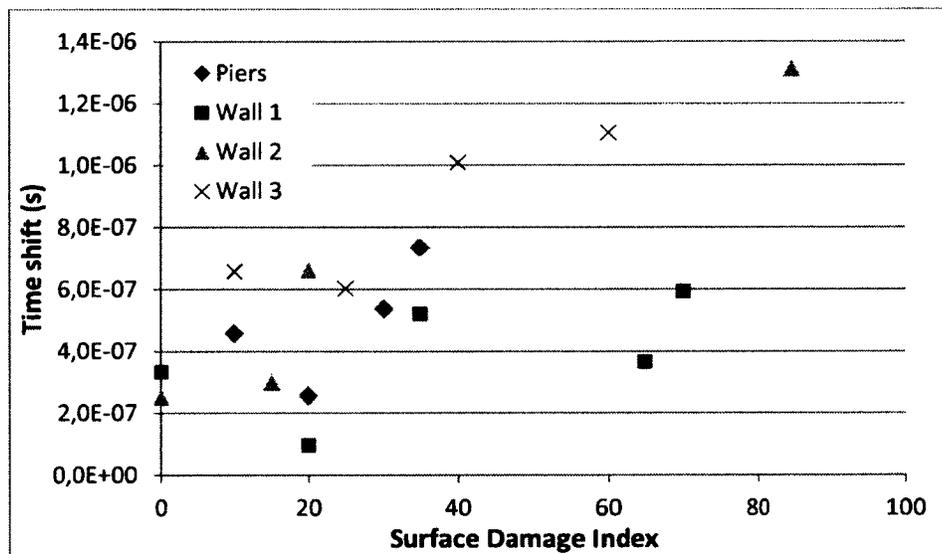


Figure 4.14: Time shift vs. surface damage index for 4 structures (2010 measurements)

Wall 1 data have affected analyses recurrently, from direct velocity to time-shift, hindering good correlations. Many tentative explanations were brought up, but none solved the issue. Since these two indicators are retrieved from the same test with the same equipment, it is possible that the problem occurred during acquisition.

Figure 4.15 presents the time-shift data from the 2011 campaign. A stronger correlation than during the first campaign can be observed for data up to a surface SDI of about 40 (when data

from Wall 1 are not included). Then, they start spreading in a more chaotic way. When the time shift result of 2.19×10^{-6} s is discarded, the coefficient of correlation indicated 0.74 but when data with a SDI over 45 (3 measurements) were discarded, the coefficient indicated 0.88 for an exponential regression line, (Figure 4.16). The change in the type of regression function, going from linear to exponential, from the first to the second campaign is attributed to the increasing number of data allowing a better correlation.

The same exponential regression was also applied on the 2010 data to assess the interest of this type of regression for time-shift. When data from Wall 1 were included, the coefficient of correlation was very low; when discarded, the coefficient hiked up to 0.80. Because exponential regression gives interesting correlation for both sets of data, we assumed that it might be most appropriate for time-shift measurements.

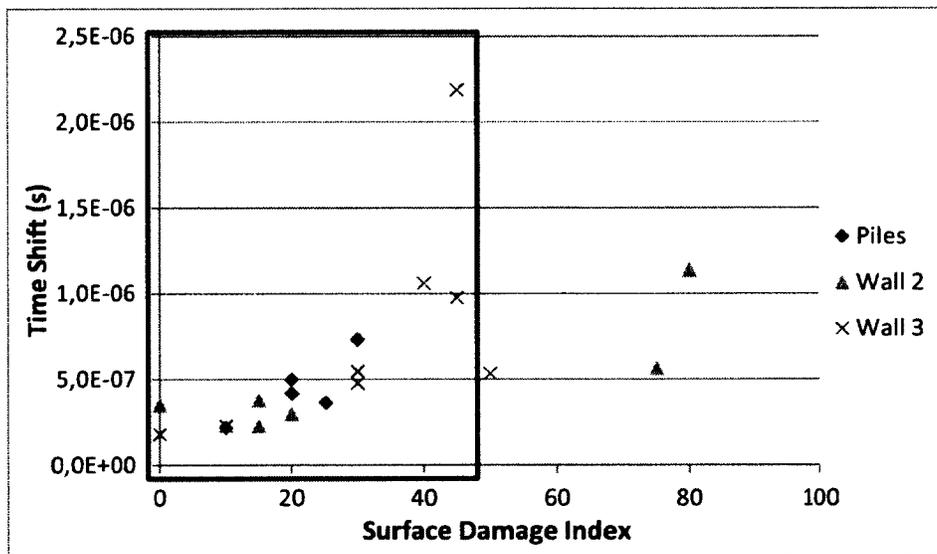


Figure 4.15: Time Shift vs. Surface Damage Index (2011 measurements)

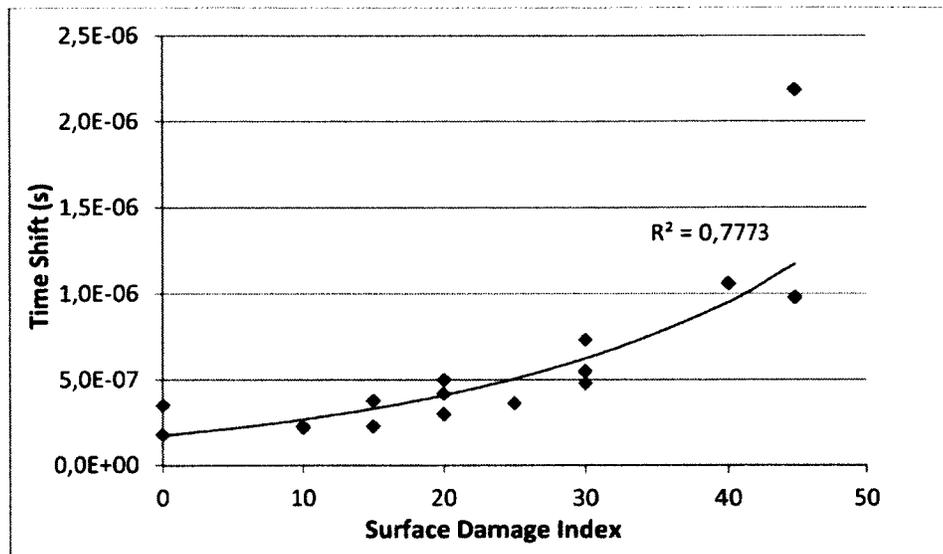


Figure 4.16: Time Shift vs. Surface Damage Index regression line for indexes up to 45

It is interesting to see how time shifts present a good correlation for lower SDI values, indicating that the technique is likely more efficient when cracks remain fine enough. This phenomenon was not well observed during the first campaign because of fewer data but was expected with the time-shift technique. In fact, the way the technique works makes it more sensitive to the density of cracks rather than the width of cracks. When the crack reaches a certain width, the opening/closing of the cracks becomes less effective.

4.6 Conclusion

The above sections presented results from field campaigns conducted within 1- year interval on different elements of ASR-affected bridge structures. Using two sets of equipment and three techniques (impact-echo, UPV and time-shift), we were able to study four potential non-destructive damage indicators: indirect velocity evaluated from resonant frequency, direct velocity, centroid frequency and time shift. To compare results, we used an index assessing damage (the Surface Damage Index - SDI) by evaluating roughly and visually the density and width of cracks at the surface.

Indicators from impact-echo (resonant frequency and indirect velocity) appeared not to correlate adequately with surface damage. Barrier walls data from impact-echo and UPV in through

transmission permitted to highlight the effect of crack orientation and how this caused indirect velocity to correlate less with the SDI. For this reason, on the second campaign, tests were performed systematically following a grid over the visually worst and best surfaces of the structures to assess impact-echo sensitivity. Results showed that although impact-echo can give a rough idea of concrete quality, it might not be appropriate for all types of structures. Parasite frequencies were often observed, potentially due to the presence of steel reinforcement and of complex geometries or very thick structures. A good knowledge of signal processing can become necessary to treat recordings. However, it has the advantage of assessing cracks parallel to the surface, an orientation of damage harder to capture with the other techniques when only one side of the structure is available for testing.

Using UPV, we ended up with interesting correlations between direct velocities and SDI values when indirect transmission is used. However, care has to be exercised as to the location of the measuring point as the presence of rebars can affect the results. In direct transmission, SDI can no longer validate the results and coring might be necessary. Although UPV is often associated with compressive strength, it should be limited to indicating the level of damage, as the presence of cracks does not directly reduce compressive strength.

Centroid frequency did not show as good correlation as direct velocity. However, a trend decreasing with damage is clearly visible and the information covers not only surface damage, but also internal damage, which is what is most interesting when working on ASR. Laboratory investigation should be carried to understand fully the mechanism of diffusion affecting centroid frequency and to correlate its decrease with an indicator other than surface damage.

Finally, the recently developed time-shift technique has been tested *in-situ* and led to very promising results. In fact, correlation with surface damage was very good up to an index of about 45 for the 2011 campaign. This technique is thought to be much more sensitive for low levels of damage and can be very interesting in detecting early stages of ASR where cracking is not yet visible [Boukari *et al.*, 2011]. Because of its novelty, more work has to be done to understand the implication of using such a technique for distributed damage.

Overall, this research project showed that non-destructive techniques can be employed for in-situ investigations of concrete structures subject to distributed cracking with promising results without being intrusive or more time-consuming than traditional techniques. A combination of the different techniques enables the operator to cover different levels and orientation of damage within one campaign. However, because of the imprecision of SDI, conclusions should be taken as tentative and not absolute.

CHAPITRE 5

VOLET LABORATOIRE : ÉTUDE DU SAUT TEMPOREL

Le volet laboratoire du projet visait à étudier la technique du saut temporel sur deux aspects, soit l'influence de l'homogénéité du béton et de la configuration de transmission. Des échantillons allant du coulis au mortier avec inclusions de granulats ont été préparés pour être évalués avec la technique de saut temporel selon différentes configurations des transducteurs.

Nous avons tenté de reproduire un endommagement semblable à l'endommagement généré par la RAG, soit une fissuration distribuée par gel-dégel. Ce choix a été fait pour deux raisons, soit de limiter les paramètres à étudier (restreint à la fissuration) et afin d'observer plusieurs états de fissuration dans un temps limité (moins d'un an). Les résultats de cette étude pourront servir de base pour une étude plus complète du saut temporel sur un élément de béton sujet à la RAG.

5.1 Méthodologie

5.1.1 Préparation des échantillons

Des échantillons de coulis et de mortier avec inclusions de gros granulat ont été coulés pour étudier l'effet des hétérogénéités sur le saut temporel. Le format « dalle d'écaillage » de $250\text{ mm} \times 280\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ a été utilisé afin d'avoir une surface suffisamment grande pour la pose de transducteurs et suffisamment petite pour minimiser l'atténuation et faciliter la manipulation des échantillons.

A) Coulis

Les coulis ont été formulés avec de l'eau et du ciment Portland à usage général pour obtenir un rapport eau/ciment (E/C) massique de 0,25. Trois échantillons ont été coulés et soumis à une cure humide pendant 28 jours. Deux des échantillons ont ensuite été séchés à 100°C pendant 24 heures alors que le troisième échantillon a été séché à 60°C . Le traitement à 100°C a causé de la fissuration visible sur les deux échantillons de coulis. Les essais mécaniques effectués sur

des cylindres témoins ont donné une résistance à la compression moyenne de 59,7 MPa et un module d'élasticité de 16,5 GPa à 28 jours.

B) Mortier

Dix échantillons de mortier avec différentes teneurs d'inclusions de granulats ont été coulés suivant la distribution présentée au Tableau 5.1. Le mortier formulé a un rapport E/C de 0,48 et un rapport sable/ciment de 3,44 pour une densité finale de 2300 kg/m³. Les particules de granulats proviennent d'un calcaire non réactif de Saint-Dominique et ont un diamètre variant entre 3 et 5 cm et une épaisseur d'approximativement de 1 cm.

Tableau 5.1 : Présence de particules de granulats dans les trois types d'échantillons.

Type d'échantillon	Nombre d'échantillons	Nombre de couches de granulats	Nombre de granulats par couche
MA0	2	0	0
MA1	4	1	9
MA2	4	2	6

Le traitement des échantillons de mortier est similaire au traitement des coulis : cure humide de 28 jours et séchage à deux températures différentes, un échantillon MA0 et deux échantillons MA2 à 100°C et les autres à 60°C. Ces traitements n'ont produit aucune fissuration visible. La résistance moyenne à la compression du mortier est de 62,7 MPa avec un module d'élasticité de 27,9 GPa.

C) Processus d'endommagement

Pour endommager les échantillons avec une fissuration distribuée et graduelle, les échantillons de mortier ont été soumis à des cycles de gel-dégel dans des chambres d'écaillage à raison d'un cycle par jour. Afin d'assurer une fissuration lors des conditionnements, les échantillons ont été plongés dans l'eau 24 à 48 heures avant chaque session afin de les saturer. En tout, les échantillons ont subi quatre sessions de conditionnement de 13 cycles de gel-dégel pour la première session et de 7 cycles pour les sessions subséquentes. Pour conserver une valeur de référence, un échantillon de chaque type est mis à l'écart du processus d'endommagement. Le

Tableau 5.2 et la Figure 5.1 : Fissuration à la surface de 4 échantillons après 34 cycles de gel-dégel présentent les observations visuelles de fissuration relevées sur les échantillons après chaque série de gel-dégel.

Tableau 5.2: Fissuration observables sur les échantillons suite à l'endommagement par gel-dégel.

Échantillon	Séchage	13 cycles	20 cycles	27 cycles	34 cycles
MA0G01	100°C	Fines	Fines	Moyennes	Moyennes
MA1G11	60°C	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
MA1G12	60°C	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
MA1G13	60°C	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
MA2G11	100°C	Fines	Fines	Moyennes	Moyennes
MA2G12	60°C	Aucune	Aucune	Très fines	Fines
MA2G13	60°C	Aucune	Aucune	Très fines	Fines

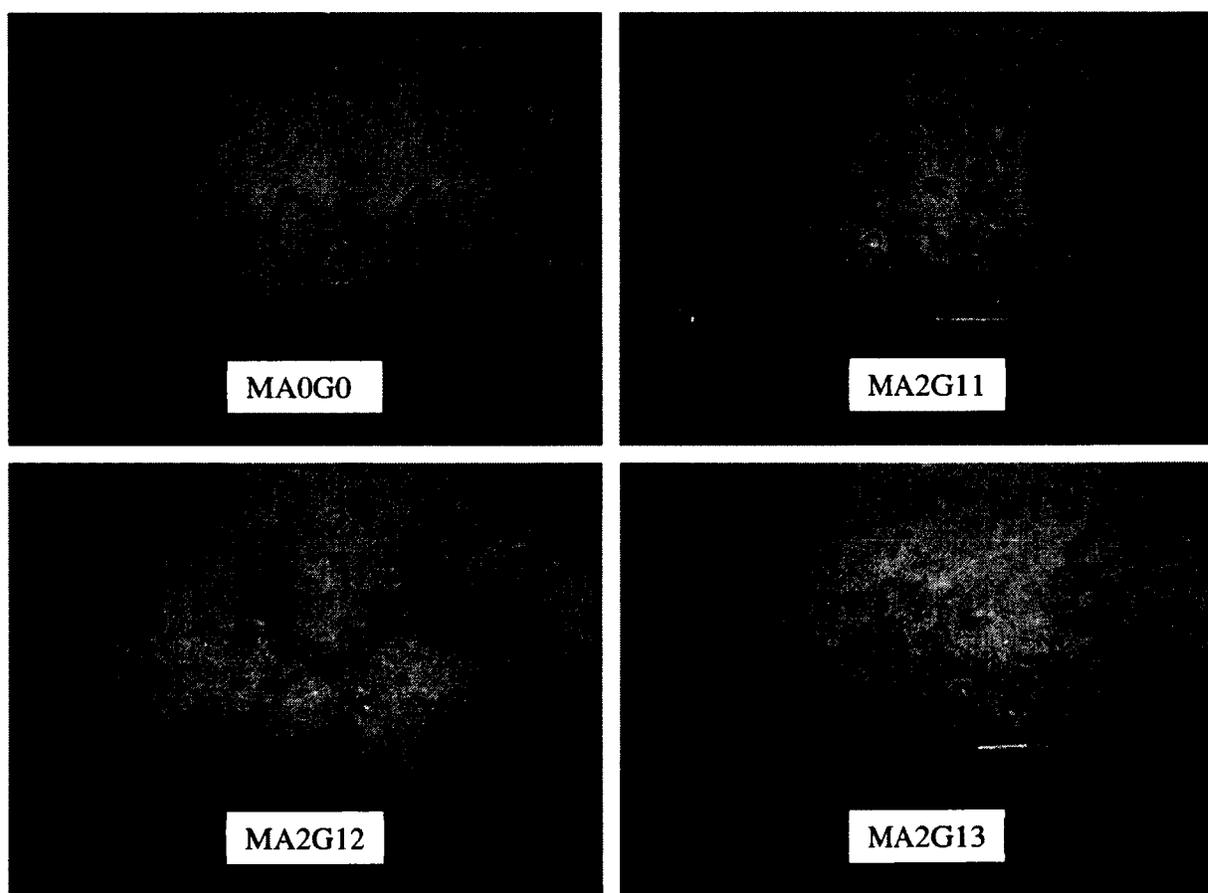


Figure 5.1 : Fissuration à la surface de 4 échantillons après 34 cycles de gel-dégel

Après 13 cycles de gel-dégel, des cylindres de mortiers préparés en même temps que les dalles ont été soumis à des essais de résistance à la compression pour vérifier l'endommagement. Deux cylindres avaient subi un traitement de séchage à 100°C et trois à 60°C : les résistances sont respectivement de 33,7 MPa et 54,2 MPa avec des écarts-type respectifs de 4,42 et de 11,2. Donc, malgré qu'il y ait effectivement endommagement, il demeure qu'il peut être très variable d'un échantillon à l'autre. On remarque également que le séchage à 100°C, même sans fissuration visible, augmente la vulnérabilité des échantillons à l'endommagement au gel-dégel.

5.1.2 La technique du saut temporel

A) Équipement

Pour réaliser l'essai de saut temporel, un générateur de signal avec amplificateur intégré envoie une rafale d'impulsion de fréquence centrée sur 250 kHz. Ces impulsions excitent un transducteur piézoélectrique de type Panametrics V1012 de fréquence centrale 250 kHz. Le générateur est équipé d'une voie de réception sur laquelle est connecté le transducteur récepteur. Le signal reçu est ensuite envoyé après amplification sur une carte d'acquisitions ADLINK PCI-9820 installée dans un ordinateur pour la numérisation des signaux. Le système d'acquisition développé par le professeur Cohen Tenoudji et son équipe [Lacouture, 2002] permet de faire l'acquisition de 1000 signaux en 1s. Ces signaux sont stockés en mémoire vive avant d'être enregistrés sur le disque dur à la fin de chaque série de rafale. Cette manière de procéder permet d'optimiser la fréquence d'acquisition qui correspond à la fréquence sondage du milieu.

Pendant que les rafales de pulses ultrasoniques sondent le milieu, un impact est appliqué à la surface de l'échantillon. L'impact est produit par un pendule en laiton de 500 g soulevé à 90° de la position vertical (Figure 5.2). Le pendule est rattrapé à chaque impact afin d'éviter des rebonds sur le spécimen. Le spécimen est fixé par des serres sur un bâti fixe afin d'éviter tout mouvement de ce dernier au moment de l'impact. Les transducteurs sont également fixés par des serres afin d'éviter leur déplacement. L'efficacité de la fixation des transducteurs a été validée en vérifiant la corrélation entre le signal obtenu avant impact et le signal obtenu après

24 h de repos. Ce test a aussi permis de valider que la force d'impact appliquée n'endommage pas les échantillons.

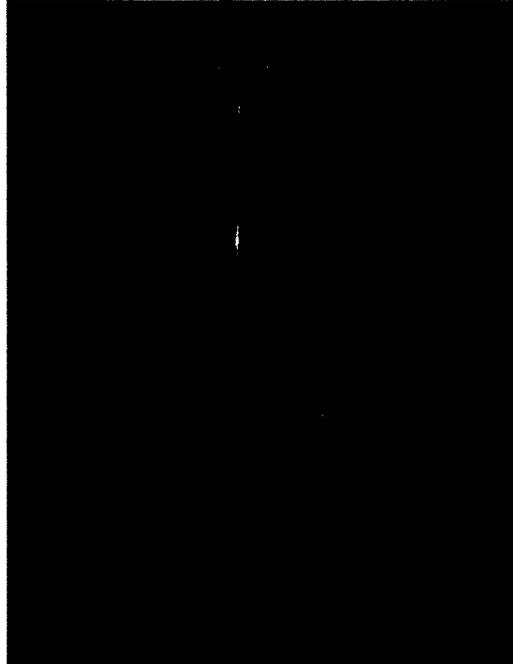


Figure 5.2: Dispositif pour impacter les échantillons.

B) Configurations de transmission

La configuration directe a été utilisée pour déterminer la vitesse de propagation des ondes P dans les échantillons. Les configurations indirecte et semi-directe ont été mises à l'essai pour déterminer la configuration optimale pour la technique du saut temporel sur des structures existantes car la géométrie et la dimension des structures limitent habituellement le nombre de faces accessibles pour un essai acoustique. La Figure 5.3 présente les différentes configurations des capteurs sur les échantillons de laboratoire.

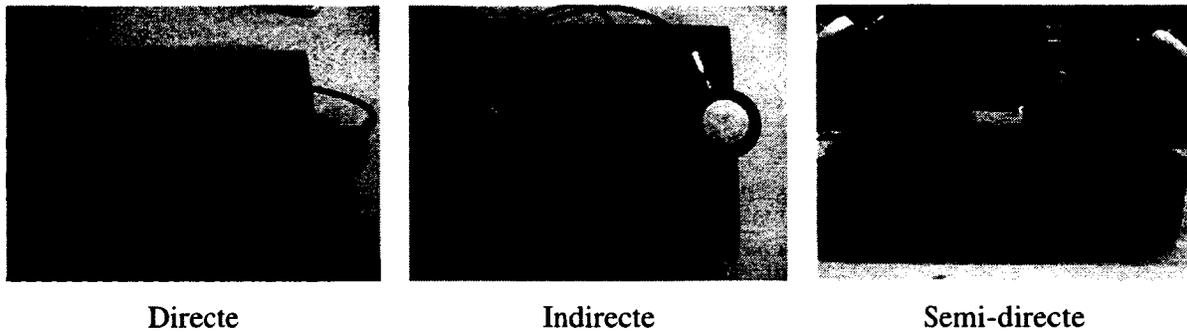


Figure 5.3 : Configurations de transmission des transducteurs sur les échantillons en laboratoire

C) L'Essai

Lorsque le montage complet est fixé, on configure le logiciel *Boxer* pour l'envoi de rafales d'impulsions et l'acquisition des signaux. Il est possible de choisir la vitesse de rafale et le nombre des signaux enregistrés. Ces deux paramètres détermineront la durée de l'acquisition qui se chiffre en secondes. Il suffit ensuite de déclencher une acquisition sur le logiciel et de lâcher le pendule. Chaque essai est répété trois fois afin d'étudier la répétabilité, mais également pour minimiser les variations associées aux erreurs de manipulation.

D) Analyse des résultats

À partir des signaux enregistrés durant l'essai, on analyse les vitesses d'ondes directes, les fréquences centroïdes et les sauts temporels. Vitesses et fréquences sont évaluées à l'aide du logiciel Matlab.

L'analyse des sauts s'effectue avec un logiciel de traitement créé sous Labview (Figure 5.4). Le logiciel permet de calculer la fonction d'inter-corrélation entre un intervalle du signal de référence et le même intervalle sur les signaux de rafales. Le maximum de la fonction est alors indexé. La différence entre cet index et l'index de l'auto-corrélation du signal de référence donne le délai entre les deux signaux. En principe, avant l'impact, ce délai est de 0. En réalité, cette valeur est proche de zéro, mais varie toujours un peu en raison du bruit. Ce délai est enregistré pour chaque signal et permet de voir le changement au moment de l'impact ainsi que le retour vers l'équilibre de l'échantillon. Le saut est l'écart entre les délais avant et après impact (Figure 5.5). Ce calcul peut également être effectué avec un programme Matlab®.

Ce logiciel permet de modifier plusieurs paramètres de calcul telles que:

- la longueur du signal à analyser;
- le nombre de signaux à analyser;
- les filtres passe-haut et passe-bas;
- la forme du filtre;
- le nombre de points de délai à moyenner.

En plus d'évaluer la sensibilité de la technique, les essais ont également permis d'étudier l'influence de chaque paramètre de calcul.

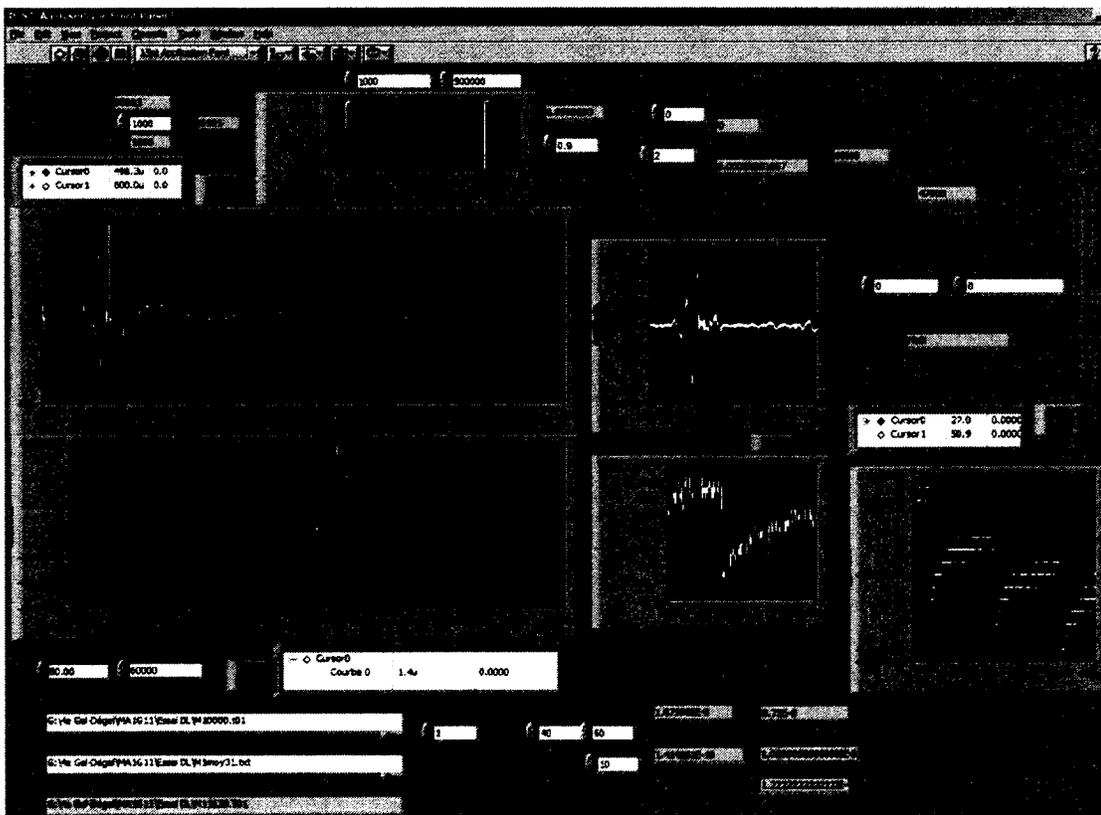


Figure 5.4 : L'interface du logiciel d'analyse ST Analyser

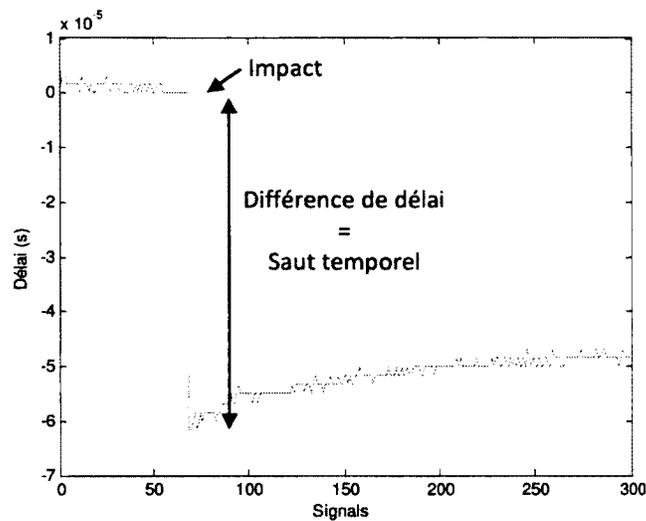


Figure 5.5 : Le saut temporel schématisé

5.1.3 Programme d'essais

À l'état initial, avant le processus d'endommagement, les échantillons ont été testés une première fois en UPV dans les trois configurations. Cela a permis d'avoir des vitesses de référence dans toutes les configurations.

A) Étude du signal en transmission semi-directe

Avant de procéder aux essais de saut temporel, nous avons d'abord étudié le signal en transmission semi-directe sur les échantillons les plus homogènes, soit les coulis et les mortiers sans granulats grossiers. L'étude portait sur l'identification des ondes de premières arrivées. En deuxième partie de l'étude, nous avons étudié le signal sur un matériau plus complexe : des échantillons de béton sans caractéristiques particulières. Une première transmission s'est fait sur l'échantillon intact et la deuxième transmission s'est fait avec le même échantillon sur lequel nous avons retiré une bande de 10 cm de large sur environ 2 cm de profondeur, comme illustré à la Figure 5.6.

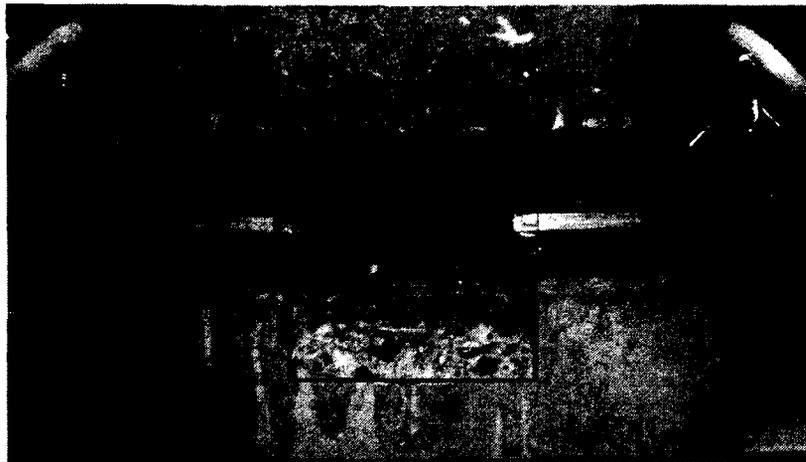


Figure 5.6 : Échantillon de béton avec un vide de 10 cm en surface.

B) Étude du saut temporel sur différents types d'ondes

Des essais de saut temporel ont été réalisés en transmission semi-directe sur des signaux de $333,33 \mu\text{s}$ sur tous les échantillons avant et après chaque séance de gel-dégel. Le saut a été analysé en isolant chaque type d'onde identifié afin d'évaluer la sensibilité de chaque type d'onde à l'endommagement par fissuration distribuée.

C) Étude du saut temporel avec deux configurations de transmission

Suite à chaque session de gel-dégel, les sept échantillons qui sortent de la chambre d'écaillage sont de nouveau testés avec la technique du saut temporel, selon les deux configurations de transmission. Parce que les premières analyses ont démontré l'importance des ondes d'arrivée tardive (ondes coda), les essais ont été réalisés sur des signaux de $1000 \mu\text{s}$. L'analyse s'est fait avec une fenêtre de $100 \mu\text{s}$ balayant le signal sans chevauchement. Pour chaque échantillon et à chaque niveau d'endommagement, il y a donc 10 valeurs de saut calculées correspondant à chaque fenêtre. Ainsi, lorsqu'on lit les graphes, les sauts identifiés 1 correspondent aux premières $100 \mu\text{s}$ du signal et ainsi de suite.

Afin de comparer la sensibilité selon la configuration de transmission, les dix sauts sont cumulés et présentés comme étant un saut lié à un échantillon à un certain niveau

d'endommagement. On peut donc comparer l'évolution du saut avec l'endommagement selon le type de configurations ainsi que selon le type d'échantillon testé.

D) Étude du saut temporel versus des indicateurs linéaires

En plus des essais de saut temporel, la vitesse d'onde directe ainsi que la fréquence centroïde ont également été récupérées avec les signaux dans chaque configuration de transmission. Ces analyses ont permis de comparer l'indicateur non-linéaire du saut temporel avec les vitesses et les fréquences centroïdes qui sont des indicateurs linéaires. Du même coup, il était possible d'observer l'influence des configurations de transmission sur ces indicateurs.

5.2 Résultats partiels

Les résultats présentés dans cette section complètent les résultats présentés dans l'article du CHAPITRE 5 concernant les travaux réalisés en laboratoire.

5.2.1 Paramètres optimaux d'essai et d'analyse

Les paramètres d'essai optimaux dépendent du type d'analyse (ondes distinctes ou portion de signal) qu'on veut faire et dépendent également du niveau d'endommagement atteint par l'élément ausculté. Dans le cadre de ce projet, les paramètres ont été déterminés suite à plusieurs séries d'essais et analyses de résultats.

Il a été constaté que pour des endommagements non visibles (fissuration interne), c'est l'onde coda qui détient la plus grande proportion de la variation. Il est donc important d'enregistrer un signal d'une longueur adéquate pour pouvoir analyser le plus d'onde coda possible. Une longueur standard pour une analyse intéressante, indépendamment du degré d'endommagement, est de 1 ms. Un balayage par fenêtres de 100 μ s constitue un bon équilibre pour ne pas omettre de variation importante et pour limiter le temps d'analyse. La première fenêtre doit balayer le début du signal. Pour rendre les résultats des analyses comparables, les résultats du balayage peuvent être moyennés ou cumulés. Il est important toutefois de cumuler ou moyenné sur le même nombre de fenêtres pour tous les essais.

Il a été observé que lorsqu'on modifiait la bande passante du filtre utilisé, le saut variait pour un même segment de signal. Cette modification du filtre affectait en fait la fréquence centrale du signal. Nous avons donc utilisé une bande passante large pour éviter d'éliminer des fréquences importantes et réduire la précision dans le calcul de d'inter-corrélation. Nous avons conservé le même type de filtre avec les mêmes paramètres pour l'ensemble des résultats à analyser afin d'obtenir des valeurs comparables.

5.2.2 Essais UPV initiaux

Les premiers essais en transmission ont permis de comparer les vitesses ultrasonores suivant différentes configurations, mais également entre des échantillons séchés à 60°C et à 100°C (surlignés en gris). Le

Tableau 5.3 permet de constater que le séchage à haute température a comme conséquence d'endommager les échantillons et de réduire considérablement leurs vitesses, à la fois pour les coulis et les mortiers.

En ce qui concerne les modes de transmission, on remarque que la transmission indirecte est la configuration enregistrant généralement les vitesses les plus faibles. Les configurations directes et semi-directes ne créent pas des écarts aussi importants.

On remarque également que les vitesses d'onde S ne semblent pas être affectées par les conditions de séchage des échantillons. Les vitesses n'indiquent pas de différences en ce sens.

Finalement, comme attendu, les vitesses semblent sensibles à la nature des échantillons, les coulis enregistrant les plus faibles vitesses et les mortiers avec granulats, dont le module d'élasticité est plus élevé, les plus hautes vitesses. Il ne semble toutefois pas y avoir de différences de vitesse notables entre les échantillons avec une ou deux couches de granulats.

Tableau 5.3 : Vitesses d'onde P et S avec différentes configurations avant gel-dégel (en italique, les échantillons ont été séchés à 100°C).

		Vp (m/s)				Vs (m/s)
		Gel-dégel	Direct	Indirect	Semi-direct	Direct
Coulis	<i>C1</i>		<i>3218</i>	<i>3038</i>	<i>3519</i>	<i>2133</i>
	<i>C2</i>		<i>3193</i>	<i>3137</i>	<i>3220</i>	<i>2204</i>
	<i>C3</i>		<i>3559</i>	<i>4035</i>	<i>3931</i>	<i>2133</i>
Mor- tier	<i>MA0 - R</i>		<i>4308</i>	<i>4792</i>	<i>4318</i>	<i>2424</i>
	<i>MA0G01</i>	✓	<i>4000</i>	<i>3885</i>	<i>4158</i>	<i>2474</i>
	<i>MA1 - R</i>		<i>4516</i>	<i>4423</i>	<i>4561</i>	
	<i>MA1G11</i>	✓	<i>4719</i>	<i>4205</i>	<i>4524</i>	
	<i>MA1G12</i>	✓	<i>4590</i>	<i>4646</i>	<i>4492</i>	
	<i>MA1G13</i>	✓	<i>4641</i>	<i>4510</i>	<i>4668</i>	
	<i>MA2 - R</i>		<i>4275</i>	<i>4129</i>	<i>4318</i>	
	<i>MA2G11</i>	✓	<i>4242</i>	<i>4315</i>	<i>4130</i>	
	<i>MA2G12</i>	✓	<i>4466</i>	<i>4398</i>	<i>4600</i>	
	<i>MA2G13</i>	✓	<i>4538</i>	<i>4315</i>	<i>4492</i>	

5.2.3 Étude du signal semi-direct : essais sur échantillons en béton

Une étude préliminaire du signal en transmission semi-directe a permis de constater qu'il était possible de détecter distinctement l'arrivée de quatre types d'ondes : les ondes directes P_d et S_d se propageant à la surface et les ondes de corps P_b et S_b se propageant dans le volume de l'échantillon.

En effet, en tenant compte de la vitesse des ondes P et S en transmission directe, les temps d'arrivée des différents types d'ondes suivant des trajectoires définies par hypothèse (Figure 6.1) ont été calculés. L'observation des signaux en transmission semi-directe a permis de constater que les temps d'arrivée observés correspondaient aux temps calculés. L'exercice a été repris sur des échantillons de béton intact pour arriver au même résultat (Tableau 5.4). On remarquera l'absence de l'onde de volume P. Comme il sera vu au Chapitre 5 (dans l'article), la transmission semi-directe cause la réfraction de l'onde P pénétrant le béton. Selon l'angle d'incidence et les vitesses respectives des matériaux de part et d'autres de l'interface, l'angle de réfraction peut atteindre 90°, soit une propagation vers la surface en onde évanescence, con-

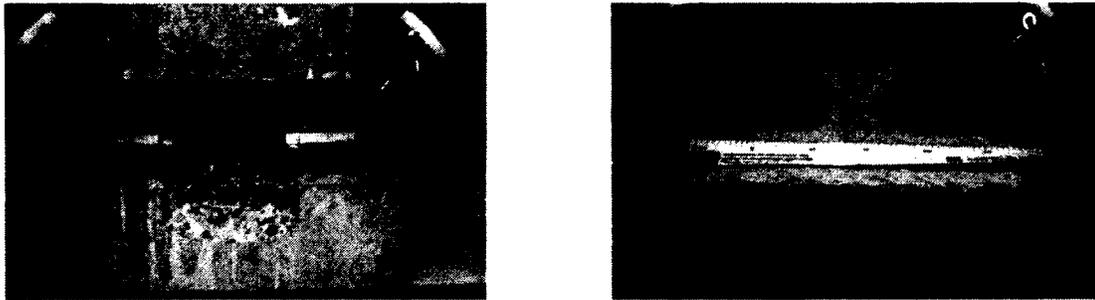
formément à la loi de Snell-Descartes. Avec du Plexiglas comme cale, le béton doit avoir une vitesse inférieure à 3790 m/s pour ne pas engendrer une onde P évanescence.

Étant donné que les techniques évaluées sont destinées à l'utilisation sur des structures en service endommagées, les vitesses d'onde P dans ces structures sont souvent plus faibles, n'occasionnant pas le problème de réfraction. Il sera donc possible d'observer et d'évaluer l'onde P sur ces structures avec cette configuration semi-directe. Il est également possible de changer l'angle de la cale. Dans cette étude, l'angle de la cale a été conservé car nous nous limitons à comparer la sensibilité entre les ondes P, S et coda, le fait de pouvoir distinguer l'onde de surface de l'onde de corps étant déjà observé sur les coulis.

Tableau 5.4 : Comparaison des temps d'arrivée calculés et observés pour les ondes P et S directes et l'onde S de volume.

Échantillons	Vitesses		Temps d'arrivée calculés (μ s)			Temps d'arrivée observés (μ s)		
	V_p	V_s	T_{pd}	T_{sd}	T_{sb}	T_{pd}	T_{sd}	T_{sb}
420-04	4978	3388	68,2	86,1	103,3	67,5	92,8	111,7
420-05	4823	3218	69,4	89,0	107,2	67,9	94,2	104,0
804-09	4690	3333	70,5	87,0	104,5	68,5	92,3	104,7

Une seconde étude a été réalisée avec l'échantillon de béton usiné présenté à la section 5.1.3 (Figure 5.6) afin de confirmer les hypothèses sur la propagation des ondes en transmission semi-directe. Deux essais de transmission semi-directe, vide vers le haut et vide vers le bas, ont été réalisés afin d'observer l'effet sur les arrivées d'ondes (Figure 5.7).



(a)

(b)

Figure 5.7. Essais en transmission semi-directe sur un échantillon avec vide en surface (a) vide vers le haut, (b) vide vers le bas.

La Figure 5.8 présente les signaux en transmission semi-directe pour les différents essais avec l'échantillon intact, l'échantillon avec un vide orienté vers le haut et l'échantillon avec le vide orienté vers le bas. Avec un échantillon de béton intact, on voit bien les trois arrivées d'onde. Lorsqu'on crée un vide à la surface, le début du signal disparaît et on trouve une arrivée d'onde approximativement au même temps que le temps d'arrivée de l'onde SB sur un échantillon intact. Finalement, lorsque le vide est orienté vers le bas, on retrouve les ondes directes avec un léger retard et puis plus rien de particulier par la suite. Le léger retard des temps d'arrivée est imputable à la surface rugueuse de l'échantillon où sont posés les transducteurs.

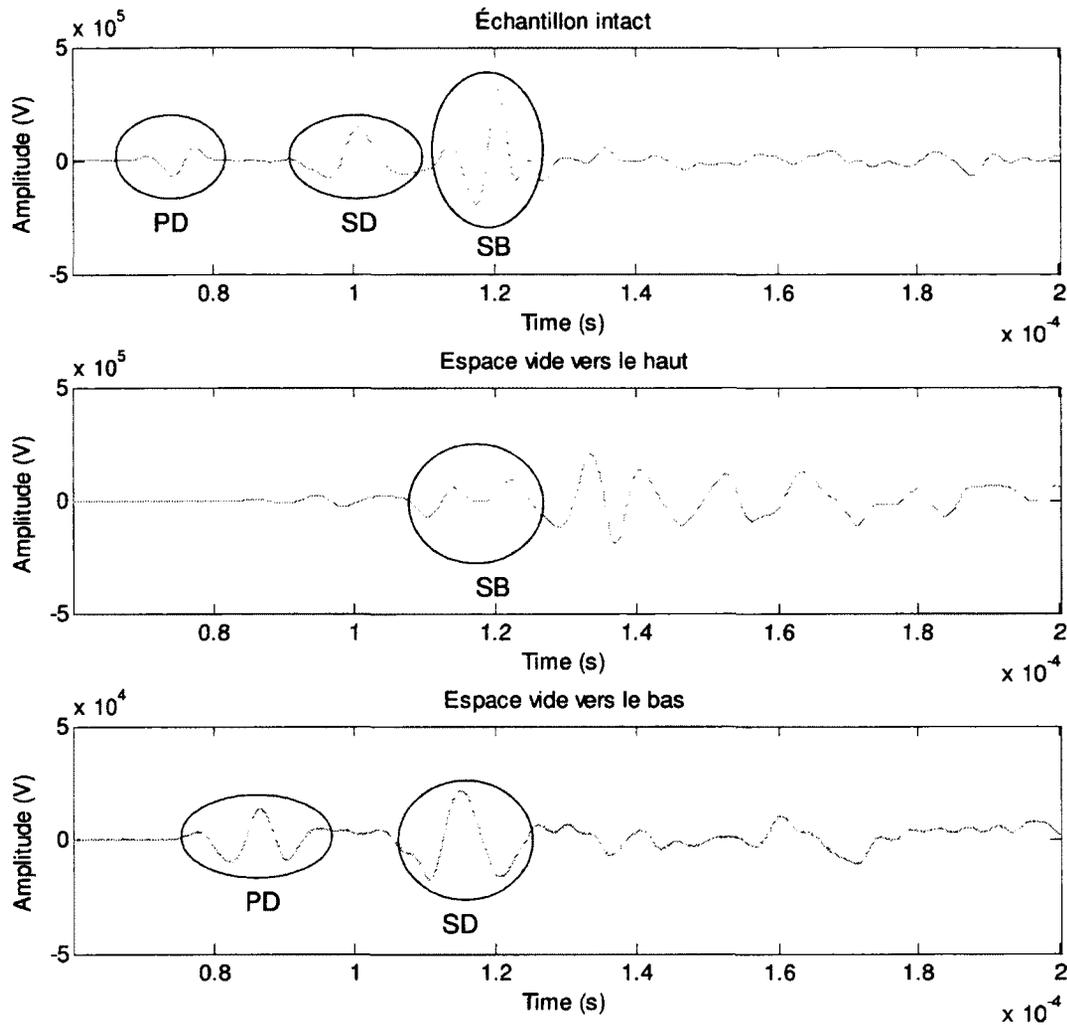


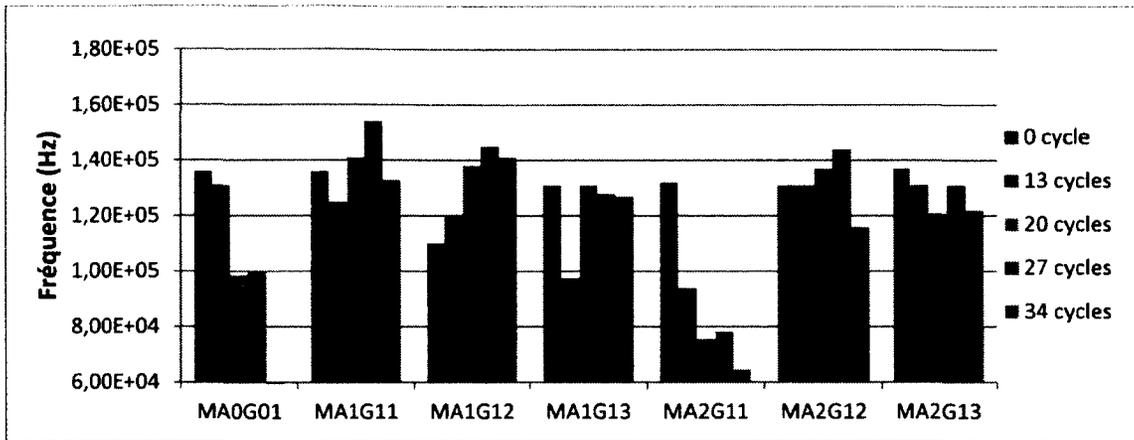
Figure 5.8 : Signal en transmission semi-directe pour l'échantillon intact, avec un vide orienté vers le haut et avec un vide orienté vers le bas.

Ainsi, on confirme l'hypothèse sur la trajectoire des ondes de premières arrivées, les ondes directes disparaissant lorsqu'un vide est créé à la surface et les ondes de volume devenant inexistantes lorsque le vide gêne leur passage dans le corps du matériau. Il est donc possible, avec une transmission semi-directe du signal, de distinguer des ondes se propageant à la surface des ondes se propageant dans le volume et de les analyser distinctement.

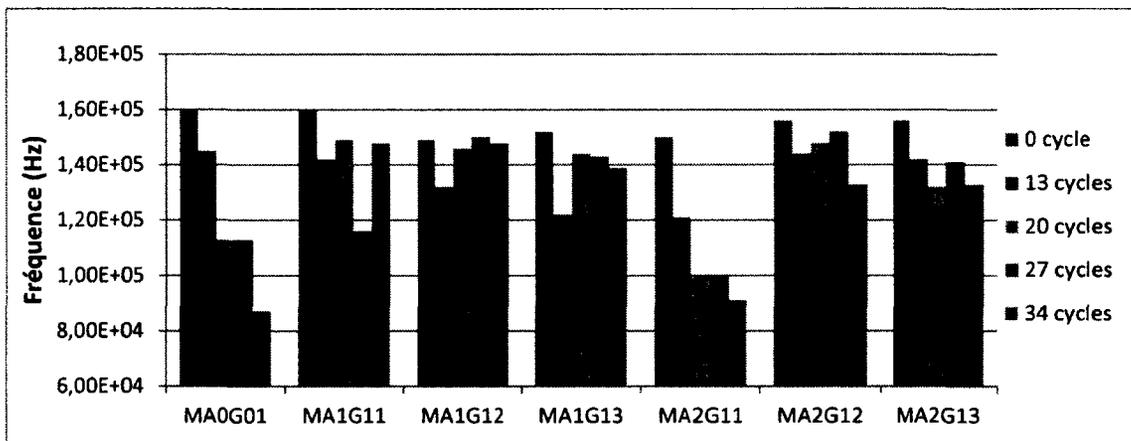
5.2.4 La fréquence centroïde, indicateur d'endommagement

La fréquence centroïde décrite à la section 0 a été calculée pour le spectre fréquentiel et la densité spectrale de puissance (DSP) à partir des signaux temporels de 333,33 μ s provenant des deux configurations de transmission.

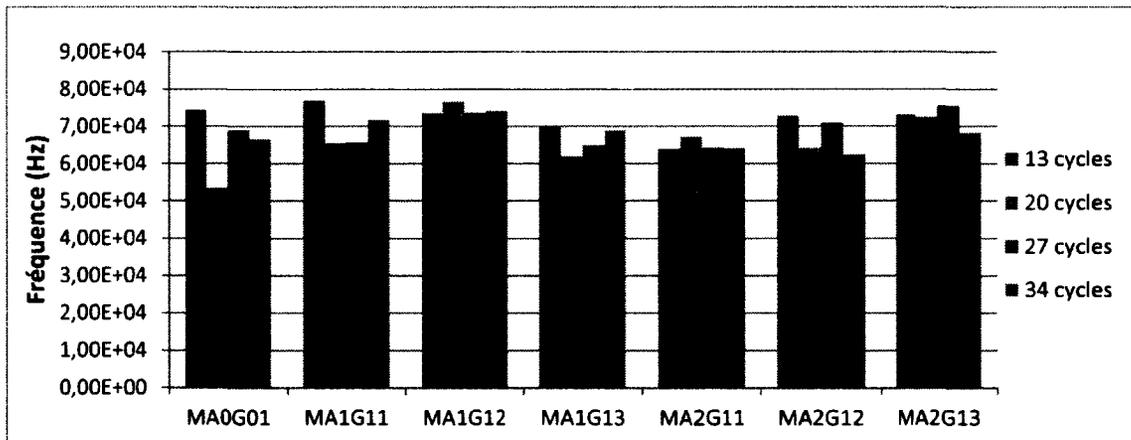
La fréquence centroïde obtenue de la DSP est habituellement plus basse que celle obtenue du spectre fréquentiel. C'est ce qui peut être observé sur la Figure 5.9 en comparant les graphes a) et b). La tendance souhaitée est une décroissance de la fréquence avec l'augmentation du nombre de cycles de gel-dégel. Cette tendance n'a été rencontrée qu'avec deux des sept échantillons ayant subi des gel-dégels, soit l'échantillon MA0G01 et MA2G11 qui présentaient initialement des vitesses de transmission plus faibles que les autres échantillons du même type du au traitement thermique de séchage sévère. Autrement, la variation des fréquences se fait de façon plutôt aléatoire, surtout pour les centroïdes des DSP (Figure 5.9a et b). De fait, alors que la Figure 5.9b présente des variations de la fréquence selon le nombre de cycles de gel-dégel presque négligeables, la Figure 5.9a présente des variations plus importantes qui ne peuvent être attribuées à des erreurs de manipulation ou des effets aléatoires.



(a) Densité spectrale de puissance – transmission semi-directe



(b) Spectre fréquentiel – transmission semi-directe



(c) Spectre fréquentiel – transmission indirecte

Figure 5.9 : Les fréquences centroïde de chaque échantillon à différents niveaux d'endommagement calculées à partir a) de la DSP et b) du spectre fréquentiel d'un signal en transmission semi-direct et c) du spectre fréquentiel d'un signal en transmission indirecte

Quant à la comparaison entre la fréquence centroïde provenant d'une transmission semi-directe et d'une transmission indirecte, la transmission indirecte résulte en des fréquences beaucoup plus basses dues à la plus grande teneur en onde coda du signal. Mais, plus important encore, c'est l'incapacité de la fréquence centroïde en transmission indirecte à déceler l'augmentation de la fissuration, même pour les échantillons visiblement plus endommagés. Cette insensibilité peut être reliée à la plus grande teneur en onde coda des signaux en transmission indirecte. Les ondes coda ayant parcouru un plus grand volume du matériau, il est possible que la dispersion et la diffusion deviennent des effets prédominants au lieu d'être des effets reliés à l'endommagement. Il faudrait donc une fissuration beaucoup plus importante (fissurations sur les structures en service) pour que la fréquence centroïde en transmission indirecte devienne intéressante. C'est ici que la transmission semi-directe pourrait devenir avantageuse avec un contenu en ondes directes plus élevé.

Il a donc été observé que la fréquence centroïde a le potentiel d'indiquer une augmentation de l'endommagement, mais seulement quand la fissuration est bien amorcée (le cas des échantillons MA0G01 et MA2G11). Dans le cas de nos échantillons sur lesquels la fréquence centroïde était en mesure de détecter l'endommagement, la fissuration était bien visible en surface depuis la première série de gel-dégel. Ceci est vrai seulement en transmission semi-directe pour les niveaux d'endommagement obtenus avec 34 cycles de gel-dégel. Il est également recommandé de s'en tenir aux centroïdes du spectre fréquentiel pour les essais futurs car les centroïdes de la DSP affichent des variations inexplicables qui peuvent porter à confusion.

CHAPITRE 6

DEUXIÈME ARTICLE

6.1 Avant-propos

Titre :

Étude de la technique du saut temporel en transmission indirecte et semi-directe pour l'évaluation des structures de béton sujettes à la fissuration distribuée

Auteurs et affiliations:

D. Bui : Étudiante à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil

S. A. Kodjo : Professionnel de recherche, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil

P. Rivard : Professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil

B. Fournier : Professeur, Université Laval, Faculté de génie, Département de géologie et génie géologique

Date de soumission : 27 octobre 2011

Revue: Journal of Nondestructive Evaluation

Contribution au mémoire :

L'article présenté dans ce chapitre permet d'exposer les résultats les plus intéressants du volet laboratoire de notre programme expérimental. Les travaux réalisés ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de l'essai de saut temporel et d'identifier les paramètres influençant les résultats. Les résultats obtenus permettent de confirmer la sensibilité de la technique à l'étude, d'évaluer les possibilités pour la détection de la RAG en plus de proposer des pistes pour des études futures.

Résumé français:

Il a été démontré que les techniques basées sur l'acoustique non linéaire sont sensibles aux micro-défauts dans les matériaux hétérogènes comme le béton. Cependant, leur utilisation *in situ* est difficile. Contrairement à ces techniques non linéaires, le saut temporel, une technique

où des rafales ultrasonores de haute fréquence balaient le matériau pendant qu'une onde élastique de basse fréquence perturbe le matériau et cause un délai, peut être utilisé efficacement sur les structures en service. La technique permet également d'évaluer des paramètres linéaires telle que la vitesse d'impulsions ultrasonores en plus du paramètre non linéaire. L'étude présentée porte sur l'applicabilité de la technique à différents niveaux d'endommagement afin d'identifier les avantages et les limites de la technique ainsi que pour optimiser son utilisation. Du aux dimensions, aux géométries et à l'accès limité aux différentes faces des structures existantes, les transducteurs sont souvent positionnés sur la même face. Deux configurations de transmission, indirecte (incidence des ondes à 90°) et semi-directe (incidence des ondes à 45°), ont été testées sur des échantillons de mortiers à différents niveaux d'endommagement généré par gel-dégel. Jusqu'à présent, les résultats ont démontré que le saut temporel est plus sensible lorsqu'utilisé en configuration de transmission indirecte, mais également beaucoup plus sensible que les indicateurs linéaires à l'initiation de l'endommagement. Sa sensibilité et sa versatilité (différents indicateurs pour différents niveaux d'endommagement) sont d'un grand intérêt pour l'évaluation rapide des structures.

6.2 Introduction

Many non-destructive techniques have been developed to assess concrete damage due to cracking. Ultrasonic pulse velocity (UPV), resonant frequency and attenuation are traditional linear acoustic techniques carried out in the laboratory to assess concrete damages. However, it has been observed that non-linear acoustic techniques were more sensitive to small defects and low-damage levels [Shah et Ribakov, 2009-a]. Concrete is a heterogeneous material that contains a system of joints composed of aggregates, cement paste, voids and micro cracks. Such a system confers a nonlinear elasticity to concrete where, when stress is applied, elastic and viscoelastic properties are modified momentarily [Bentahar *et al.*, 2008]. Micro damages in concrete accentuate this nonlinear behaviour. Nonlinear acoustic techniques use high amplitude acoustic waves to apply stress to the concrete in order to open/close the micro cracks and to observe the change in properties [Ostrovsky et Johnson, 2001]. Many techniques have been derived from this phenomenon (nonlinear resonance test, quasi static test, etc.). Nonlinear phenomena, such as harmonic generation, have shown a very high sensitivity to early damages [Shah et Ribakov, 2009-a]. Although very sensitive, most nonlinear techniques lack the robustness and the adaptability to be used on-site.

To respond to this problem, the time-shift technique, a non-linear acoustic technique for the assessment of micro damages in existing concrete structures, has been developed. This technique takes its roots in the coda wave interferometry technique developed by geophysicists to study discontinuities/changes in the earth crust and combines it with the study of nonlinear parameters in concrete in a methodological way that allows field work. Its novelty makes it a technique to be explored, understood and optimized for future use on existing concrete structures, which is what this project was aimed at.

Because of the dimension of field structures, there is often only one workable surface. This restriction often discards the use of direct transmission configuration. Indirect transmission with incident waves at 90° and semi-direct transmission with incident waves at 45° and have been tested on laboratory samples as possible alternatives. Specific observation of semi-direct

transmission signals has been done to understand the propagation mode in this configuration. The data recorded on samples at different levels of damage have also been studied to evaluate sensitivity of time-shift in both configurations.

6.3 Theoretical background

6.3.1 Wave Propagation at Interfaces with an Indirect and a Semi-direct Configuration

We define the *indirect transmission* by the configuration where both transducers are positioned on the same face of the investigated cement-base sample at an incident angle of 0° . Transmitted with P-wave transducers, longitudinal waves propagate and diffuse into the medium, encountering aggregates and geometrical boundaries. The receiving transducer detects, in addition to the direct wave, the backscattering waves coming from the aggregates or the specimen's boundaries.

In the *semi-direct transmission configuration*, both transducers are placed on the same face of the cement base sample but the ultrasonic wave incident angle is set oblique between 0° and 90° using a wedge. With this configuration, the Snell-Descartes law mathematically predicts the refraction phenomenon occurring with an oblique incidence wave:

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} \quad (6.1)$$

θ_w being the incident angle of the longitudinal wave in the wedge and θ_2 represents the refracted angle in the sample (both angles related to the normal of the surface of the sample). V_{LW} and V_2 are respectively wave velocities in the wedge and the sample. The refraction of a P-wave generates both a P-wave and an S-wave traveling at distinct angles and velocities.

According to the Snell-Descartes law (Eq. 6.1), the P-wave emitted by the transducer that reaches the surface with an incidence angle refracts and generates either P-waves and S-waves –propagating into the body of the specimen – or an evanescent P and/or S wave (wave refracted at 90° and propagating only on the surface depending upon the waves velocity in the sample). Indeed, at the critical incidence angle, much of the ultrasonic wave refracted with the

greatest angle travels along the interface and decays exponentially with depth from the surface. This wave is referred to as an evanescent wave. At this critical angle, the mixture of the

refracted P-wave and S-wave is assumed to be a Rayleigh wave with a velocity $V_R = \frac{V_{LW}}{\sin \theta_w}$; this method is used to generate Rayleigh wave for non-destructive evaluation [David and Cheeke, 2002].

At non-critical incident angles, while S and P-waves propagate into the body, we assume that the receiving transducer detects in the surface their wave front, in addition to their reflection coming from the back wall of the sample. Therefore, our hypothesis considered four events: the arrivals of a direct P-wave (PD), a body P-wave (PB), a direct S-wave (SD) and a body S-wave (SB) respectively (Figure 6.1 and Figure 6.4).

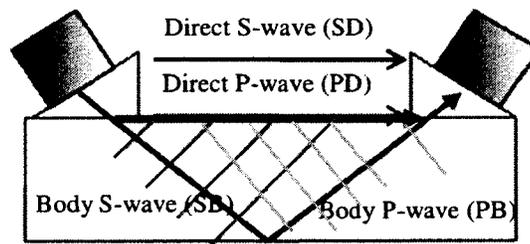


Figure 6.1 : Semi-direct configuration with transducers placed on a Plexiglas wedge

Tests have already shown that transmission configurations have an impact on the recorded data. Turgut and Kucuk [2006] have demonstrated that ultrasonic pulse velocity measurements vary with the type of configuration from 4% to 9%, part of it being because of the direction of measurement crossing casting interfaces, but another part still unexplained. Hence, it is possible that the configuration could also affect time-shift results.

The premises of a preference for the semi-direct configuration are as follows:

- A shear wave can be induced, which provides more parameters to study;
- The recorded signal is going to be clearer/sharper, allowing the identification of distinct waves, and the evaluation of their velocities (knowing their paths).

To confirm the hypothesis and these premises, laboratory tests were carried.

6.3.2 Coda Wave Interferometry and Time Shift Technique

Based on the nonlinear behaviour of concrete materials, Kodjo has developed a non-destructive technique referred to as time shift technique [Kodjo, 2008], aiming at quantifying the level of damage caused by alkali-silica reaction (ASR). The technique uses high frequency ultrasonic longitudinal wave to probe the medium, while a low-frequency high-amplitude wave is generated by an impact (typically a hammer) applied on the surface of the medium. The impact disturbs the medium locally, and temporarily modifies its elastic properties. The technique profits from the nonlinear elastic behaviour of concrete when subjected to stress. The relative variation of the propagation time of the longitudinal wave was used to extract a nonlinear parameter that quantifies the damage of the material. This nonlinear parameter, defined as $\beta_t = -\frac{\Delta t}{t_0} = -\frac{\tau}{t_0}$ could be extracted using the relative variation of the longitudinal

wave arrival time caused by the impact (t_0 being the arrival time before impact). Assuming that the impact does not change the path and the dimension of the specimens, the nonlinear parameter can be rewritten as: $\beta_t = \frac{\Delta V_p}{V_{p0}}$, where V_{p0} is the velocity of the longitudinal ultra-

sonic wave before impact [Kodjo, 2008]. It has been demonstrated with this technique that β_t is higher for concrete materials damaged by ASR compared with sound concrete.

Apart the use of an impact, this technique is similar to the acoustoelasticity technique [Hughes and Kelly, 1953] [Pao *et al.*, 1984] [Rasolofasoan, 1997] [Lillamand, 2010], where relative change of the ultrasonic wave velocity through a material under a static load is measured. This velocity variation is associated with the elastic properties changes of the material. The static pressure deforms most of the compliant parts of the pore space such as microcracks and loose grain contacts [Snieder *et al.*, 2002]. Snieder shows that coda wave interferometry is much more sensitive to the small changes in the material than P-wave [Snieder *et al.*, 2002]. Indeed, interferometry is a technique developed by geophysicists working with seismic data to assess changes in the earth crust that might indicate seismic activities. It is based on the operating principle of interferometers, which use the interference between two (or more) waves to meas-

ure small changes such as length [Snieder, 2004]. The technique uses the mathematical process of cross-correlation between two signals recorded at a certain interval of time, s_0 and s_i . When changes in the medium occur, a delay in the arrival of the waves in s_i is observed. The time delay is processed from the correlation between both signals under a time window $2t_w$ centered at t' .

$$C_{s_0s_i}(\tau) = \int_{t_1}^{t_2} s_0(t)s_i(t - \tau)dt \quad (6.2)$$

The time delay is equal to the value of τ which maximizes $C_{s_0s_i}$.

The interest of using coda waves for this type of work lies in the fact that complex heterogeneous mediums such as earth materials tend to scatter transient waves [Snieder, 2004]. The late arriving portion of the wave, the so-called *coda wave*, is the superposition of waves generated by scattering on heterogeneities and is highly repeatable when no change occurs in the medium [Snieder, 2004]. Therefore, the combination of interferometry with coda waves allows geophysicists to use the multiple-scattered waves generated from the emission of a transient wave into the medium under study in order to detect changes in that medium.

In a project aimed at determining the third order elastic constants of concrete, where elastic nonlinearity is extremely high, Payan *et al.* [2009] used coda wave interferometry (CWI). The authors observed the variation of the concrete's velocity as the pressure applied is being incremented. Because of intrinsic dissipation being very high in concrete, they analyzed the coda portion of the signal to make use of multiple scattering occurring in the material. From the velocity variation, using Murnaghan's theory of finite deformation [Murnaghan, 1951], the authors reversed to the acoustoelastic constants. Although third order elastic constants are very hard to determine for complex material, Payan's work showed that CWI has this capacity, which makes it a good tool to study nonlinearity in concrete. Tremblay *et al.* [Tremblay *et al.*, 2010] used coda waves to monitor the slow dynamic of multicomposite material. As Kodjo, the authors used an impact instead of a static charge to disturb the medium. Then, they followed the logarithmic evolution of the relative variation of the velocity after impact during the relaxation time of the material. From sound and damaged concrete, it was shown that the relative parameter associated with the relative velocity changed right after the impact (parame-

ter identical to β_i , presented above) and the parameter related to the relaxation time of the material are both sensitive to the damage.

6.4 Test Samples

6.4.1 Sample Formulation and Curing

The tests were carried out on a series of mortar samples (mini-slabs), 25cm x 28 cm x 8cm in size. The dimensions were selected to allow both mobility of the samples and adequate surface for indirect and semi-direct transmission testing.

The composition is given in Tableau 6.1 for a density of 2300 kg/m³. All samples went through a 28-day moist curing period.

Tableau 6.1 : Mortar Composition

Component	Mass (kg)
Water	18.87
Cement	39.24
Sand	91.42

Mortar samples with different number of limestone aggregate inclusions (Tableau 6.2 and Figure 6.2) were used to gradually increase a number of ultrasonic scattered waves in order to evaluate the contribution of coda waves on time-shift. The aggregate particles sizes were between 3 and 5 cm in diameter and approximately 1-2 cm thick. To reproduce identical samples for each type of sample the particles are not randomly positioned in the samples. To do so, concrete was cast in the molds by layers of specific thickness and the particles were placed between each layer at specific position.

Tableau 6.2 : Aggregates arrangement in the samples

Type	Number of samples	Layers of aggregates	Aggregates per Layer
MA0	2	0	0
MA1	4	1	9
MA2	4	2	6

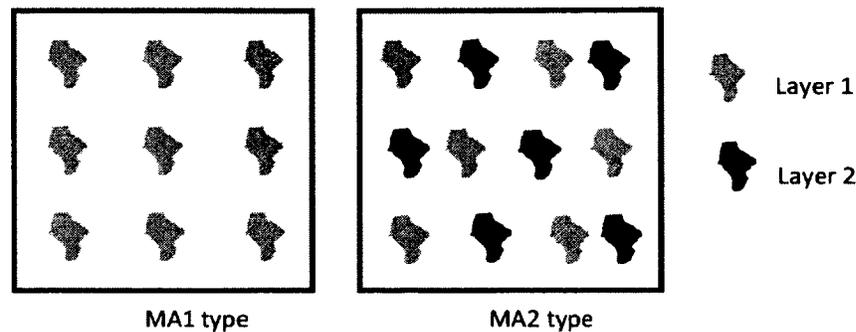


Figure 6.2: Aggregate particles configuration in MA1 and MA2 samples

All specimens were placed to dry at two different temperatures. The drying aimed at bringing all specimens to the lowest level of water content possible to discard the influence of humidity. Despite the fact that existing structures usually display a certain level of humidity, our study did not aim at recreating field conditions. The goal was rather to better understand the technique and its limits. Three samples were dried at 100°C and the seven others at 60°C for a 24h period. Although the different temperatures didn't have a particular purpose initially, it helped creating a wider range of damage. The treatment has not produced any visible cracking on the surface.

In addition to the mortar samples, a set of cement paste samples (w/c of 0.25) were also cast with the same molds. This allowed the study of the signal in semi-direct transmission with samples at varying degrees of homogeneity and the evaluation of the hypothesis emitted in section 6.4.1.

6.4.2 Damaging Process

In an attempt to gradually damage samples with distributed internal cracking, the mini-slabs were subjected to daily freeze-thaw cycles in a scaling chamber. The samples were immersed in water for 24 to 48 hours prior to freezing-thawing to maximize the damaging process. Overall, the samples underwent four conditioning series of 13, 7, 7 and 7 freeze-thaw cycles. After each series of freeze-thaw, a minimum of a 24-hour resting period was given to the samples to reach room temperature and humidity. To keep a reference value, one sample of each type was not subjected to the damaging process.

Initially the mortar tested an average compressive strength of 62.7 MPa. After being drought and put under 13 freeze-thaw cycles, compressive strength of mortar cylinders dried at 60°C was down to 54.2 MPa and to 33.7 MPa for cylinders dried at 100°C. Cracks were already visible on all samples dried at 100°C. Very fine cracks appeared on all MA2-type samples after the third freeze-thaw series (Tableau 6.3). These observations confirm the efficiency of the damaging process in initiating gradual distributed cracking of the samples.

Tableau 6.3: Observed width of cracks on samples put to freeze-thaw treatment. The samples mark by * were drought at 100°C

Samples	13 cycles	20 cycles	27 cycles	34 cycles
<i>MA0G01*</i>	<i>Fine*</i>	<i>Fine*</i>	<i>Average*</i>	<i>Average*</i>
MA1G11	None	None	None	None
MA1G12	None	None	None	None
MA1G13	None	None	None	None
<i>MA2G11*</i>	<i>Fine*</i>	<i>Fine*</i>	<i>Average*</i>	<i>Average*</i>
MA2G12	None	None	Very fine	Fine
MA2G13	None	None	Very fine	Fine

6.5 Testing Procedures

6.5.1 Experimental Set-up

For time-shift testing, a signal generator with and integrated amplifier transmits bursts of ultrasonic pulses centered on a 250 kHz frequency. These pulses excite a Panametrics V1012 piezoelectric transducer also centered at a 250 kHz frequency. The receiving transducer is connected through a receiving channel to the generator where the signal is amplified before being sent onto an ADLINK PCI-9820 data acquisition board on the computer for digitization. The data acquisition system developed by Prof. Cohen Tenoudji and his team [Lacouture, 2002] is able to acquire up to 125 signals, 1ms in length, per second. These signals are stocked on the random access memory (RAM) and then recorded onto the hard drive after each series of bursts. This acquisition method optimizes the acquisition rate which corresponds to the probing frequency.

While the ultrasonic pulses bursts probe the medium, an impact is applied on the surface of the sample. The impact is produced by a 500 g brass pendulum raised at a 90° from its vertical

equilibrium position with an impact speed of 2.9 m/s. To avoid rebounds, the pendulum is caught after the first impact. Displacement of the sample and the transducers during impact is prevented by gripping the transducers to the sample and the sample to the pendulum frame (Figure 6.4).

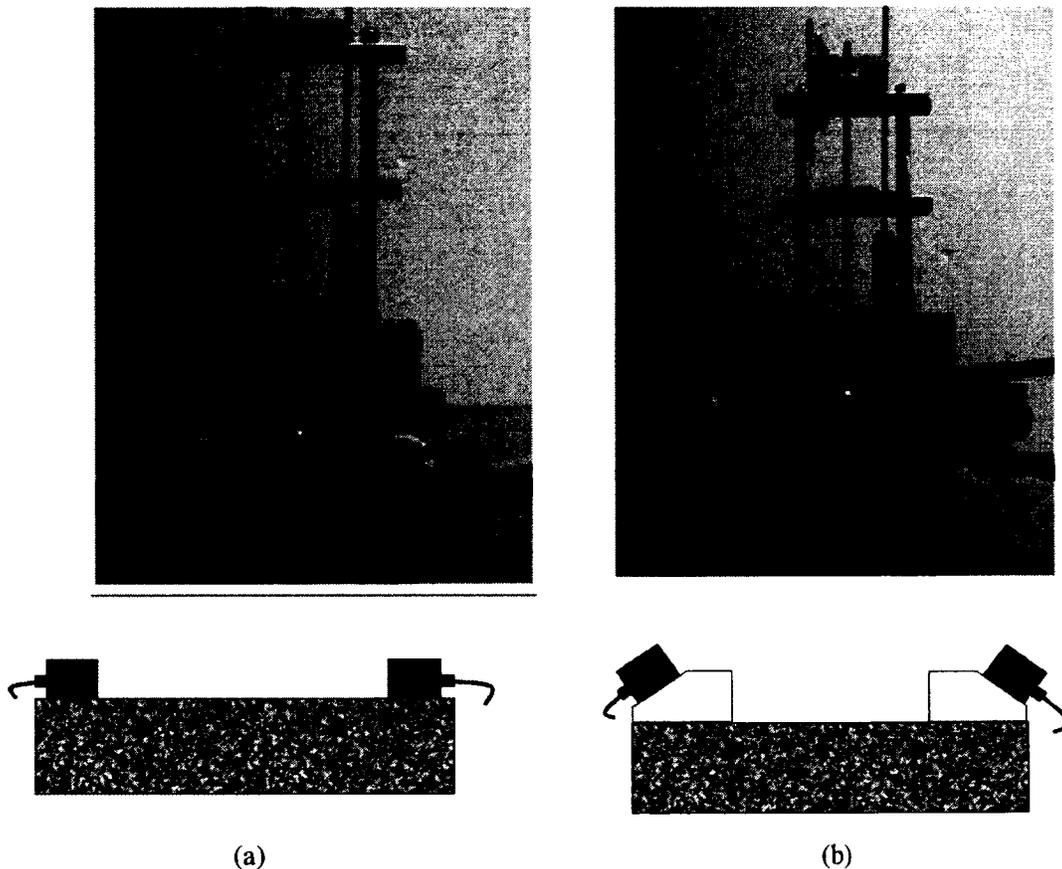


Figure 6.3: Experimental setup with indirect (a) and semi-Direct (b) configuration

For semi-direct transmission, transducers are mounted on a wedge made of Plexiglas to set the incident wave at an angle (Figure 6.4b). The waves are thus transmitted through the Plexiglas wedge before entering the medium to be probed at a given angle. Plexiglas was chosen for its low impedance, which maximizes transmission over reflection. Arbitrarily for our study, the angle of the wedges was set at 45° . According to equation 5.2, when used on a concrete block with P-wave velocity superior to 3790 m/s, a P-wave coming at an incident angle of 45° would be redirected at 90° , thus, at the surface as an evanescent wave.

Coupling of the transducers was realized using petroleum gel when only P-waves are being transmitted and honey when a shear component was created at an interface. Thus, in indirect transmission, petroleum jelly was used at the transducers-concrete interface. In semi-direct transmission, petroleum jelly was used at the transducers- Plexiglas interface and honey was used at the Plexiglas-concrete interface.

6.5.2 Data Acquisition and Processing

With a signal sampling rate of 60 MHz, the smallest value of Δt that was processed by the cross correlation function is about 10^{-8} s. As presented in Section 2.2, the relative change

$$\beta_i = -\frac{\Delta t}{t_0} = -\frac{\tau}{t_0}$$

of the wave arrival times has been demonstrated by several authors as a useful indicator of the damage level of material. However, the variation Δt leading to this parameter is so small (order of magnitude 10^{-6}), that for the damage evolution monitoring, β_i could be biased by the uncertainty of the reproduction of t_0 mostly due to the repositioning of transducers at each new test. Results often show non-correlation between damage evolution and β_i parameter evolution during degradation evolution monitoring. Thus, it was decided not to take t_0 into account and consider Δt as a parameter in itself. Keeping the same configuration of transducers, it was assumed that the waves will travel the same path for each test; therefore a change of Δt is to be attributed to material degradation.

To compare the sensitivity of semi-direct and the indirect configurations, the whole signal was analyzed. To do so, the signal was scanned with consecutive time windows of width 100 ms which is assumed large enough to take into account enough signal to improve correlation accuracy. For each step i of scan, Δt_i was processed. For the configuration comparison, in order to take into account the first arrival waves as well as scattered waves, we calculated the cumulus of all the Δt_i obtained over the whole waveform. Thus, the *sum* Δt compared in the re-

sults are calculated as follow: $sum_ \Delta t = \sum_i^N \Delta t_i$, N being the number of windows. The windows width and number are kept identical during all the study.

6.6 Results and Discussion

6.6.1 Study of the Signal from a Semi-Direct Transmission Configuration

The results presented in this section try to seize the events occurring in the concrete sample when a signal is sent in semi-direct transmission using an angled wedge.

Estimated arrival time for each wave type was calculated assuming the proposed wave path (Figure 6.1) for six mini-slabs before freeze-thaw (three cement paste, two MA0-type mortars and one MA1-type sample). P-wave and S-wave velocities were then determined in each sample using compression and shear wave transducers in through transmission. Comparison of the calculated arrival times with the arrival times observed on the signal (Figure 6.4 and Tableau 6.4) showed our calculations to be accurate up to a few microseconds.

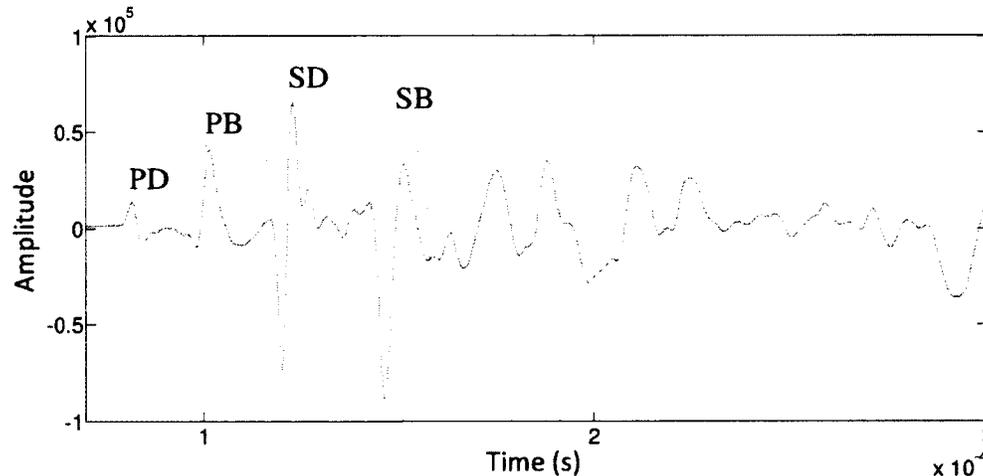


Figure 6.4 : Signal of a semi-direct transmission on cement paste slab showing the four wave arrivals

Tableau 6.4: Calculated and observed velocities and arrival times for the identified PD, SD, PB and SB waves

Type	Name	Velocity (m/s)		Time of flight (µs)							
		P	S	Calculated				Observed (% of calculated)			
				PD	SD	PB	SB	PD	SD	PB	SB
Cement Paste	C1	3218	2133	89.0	119.1	107.2	146.4	95	104	98	103
	C2	3193	2204	89.5	116.2	107.8	142.7	96	107	98	95
	C3	3559	2133	83.4	119.1	99.8	146.4	94	98	96	97
Mortar	MA0G01*	4000	2474	77.5	106.8	92.1	130.4	99	100	99	95
	MA0G11	4308	2424	74.1	108.4	87.7	132.5	99	94	99	90
	MA1G01	4516	2582	72.1	103.6	85.0	126.2	100	98	104	96

*Dried at 100°C

For specimen MA1G01, it was uneasy to clearly identify the body waves, mainly the PB-wave. This can be explained by the diameter (D) of the aggregates (3 to 5 cm), which is larger

than the wavelength λ in the sample (1.3 to 1.8 cm). It corresponds to a ratio $\frac{D}{\lambda} \approx 2$ to 2.5 which indicates a scattering phenomenon by the aggregates that can disrupt the SB and PB wave detection.

Although this impediment hinders the evaluation of the sensitivity for the different wave types, this should not be a problem when working on existing structures. Because of weathering, in situ concrete usually displays lower P-wave velocity. Moreover, aggregates are usually of smaller size to fit in between reinforcement bars. Thus, refraction or scattering become less of a problem in the propagation of a PB-waves.

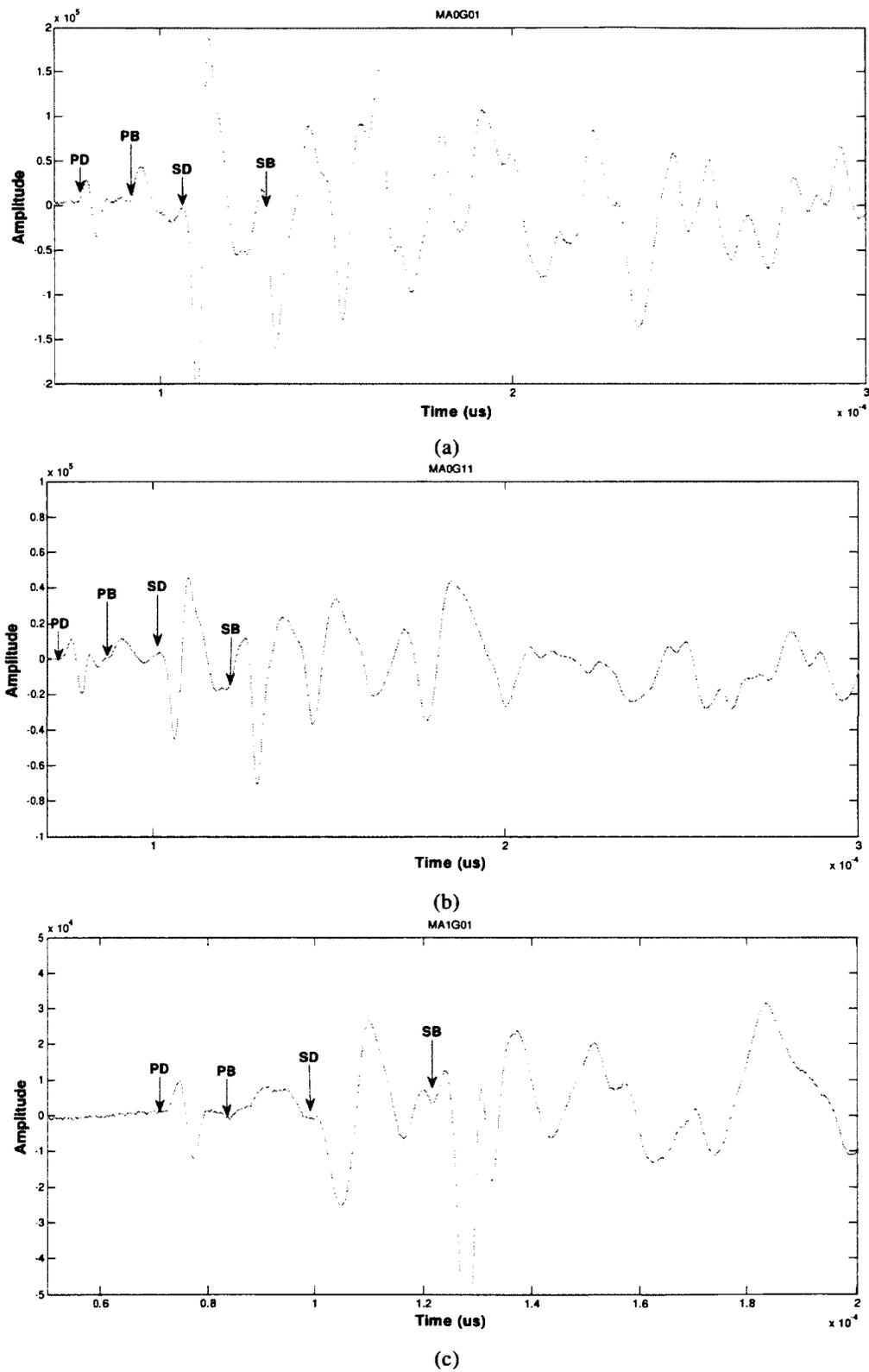


Figure 6.5 : Signals in semi-direct transmission from (a) the MA0G01, (b) the MA0G11 and (c) the MA1G01 samples showing PD, PB, SD and SB-wave arrivals

Results in Figure 6.6 present the average shift for each wave type on all 7 samples submitted to freeze-thaw. The coda in this case is the remaining of the 335 μs where no specific wave type was identified. No PB-waves were recorded for the aforementioned reasons.

On the basis that S-wave is more energetic [Schubert and Kohler, 2008], it was inferred that it would also be more sensitive to defects in the material. The results (Figure 6.6a) show that coda waves have the highest shifts at all levels of freeze-thaw. The variation of shift from 13 to 34 cycles is also very high with coda. Therefore, the coda wave is definitely most sensitive to damage. The explanation would come from the path taken by this type of wave: being a superimposition of secondary/multiple scattered waves, the volume of material covered by the coda wave is higher, as well as the amount of damage encountered.

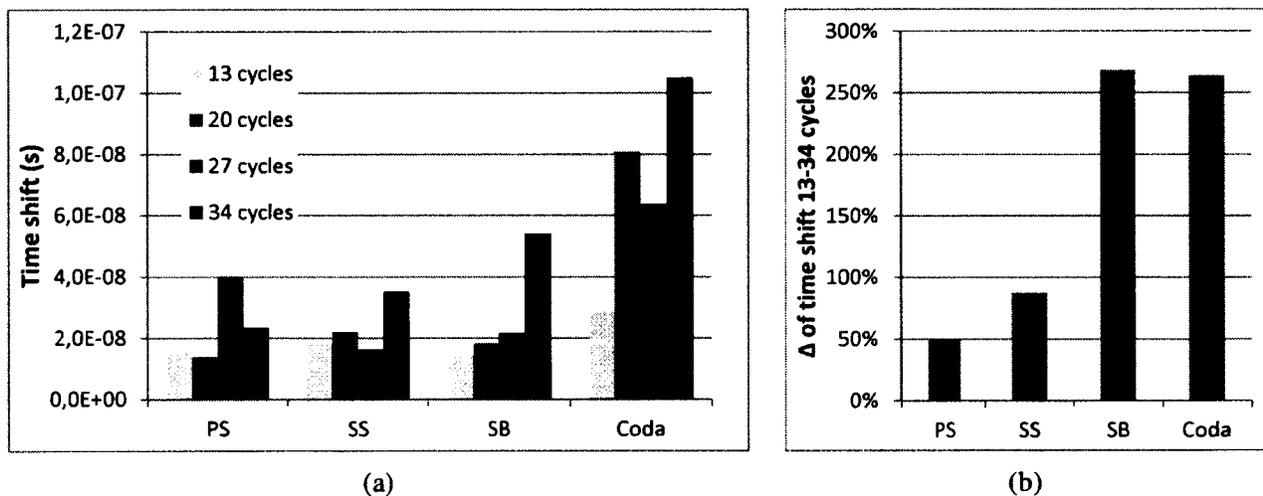


Figure 6.6: (a) Time shifts of identified waves from 13 to 34 freeze-thaw cycles (b) Variation of time shifts from 13 to 34 freeze-thaw cycles for identified waves averaged from all 7 freeze-thaw samples

The other interesting result is the continual increase of time shift occurring for SB-wave. Overall, S-waves do show higher shifts than P-waves, thus, sustaining our initial hypothesis concerning their energy and sensitivity. In addition, S-waves never become evanescent in concrete with a 45° incident angle because of their much lower velocity. Thus, SD and SB-wave have the potential of assessing surface and body damage separately when semi-direct transmission can be used.

6.6.2 Repeatability

Repeatability was evaluated by comparing similarities from the results of three time-shift tests performed at 24 hours interval on an MA1 sample without modifying the test setting. The graph from Figure 6.7 shows that the shift patterns are almost identical from one test to another. This verification permitted to conclude that the test is repeatable and that the impact does not damage the sample since the shifts show no increase.

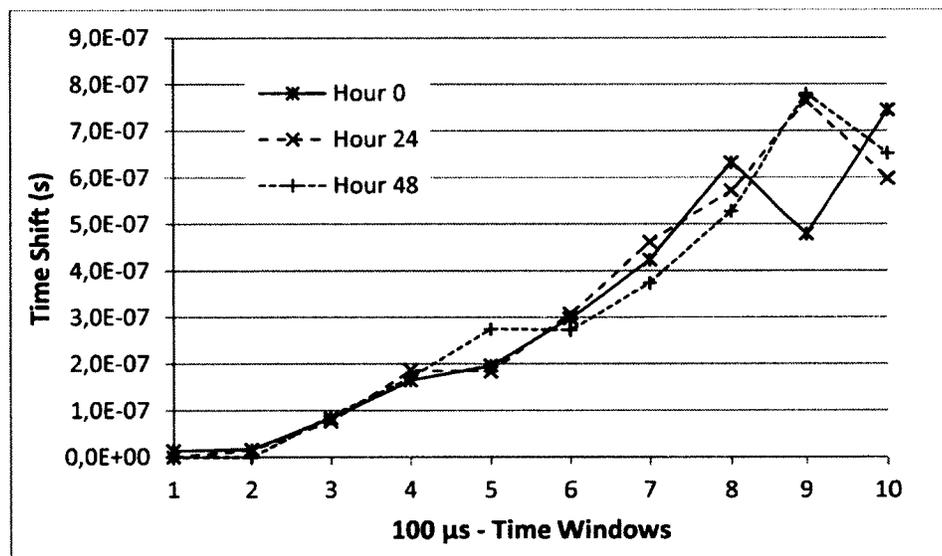


Figure 6.7 : Repeatability of time-shift when an MA1 is tested at 24 hours intervals in semi-direct transmission

When the three tests are performed with very short intervals (a few seconds to a few minutes), shifts were found to be higher on the first trial and decreased on the second and third trials, indicating that the material takes a certain time before returning to its initial state (Figure 6.8). This behaviour is dependent on the relaxation time given to the sample before the next trial and only appears above a certain level of damage.

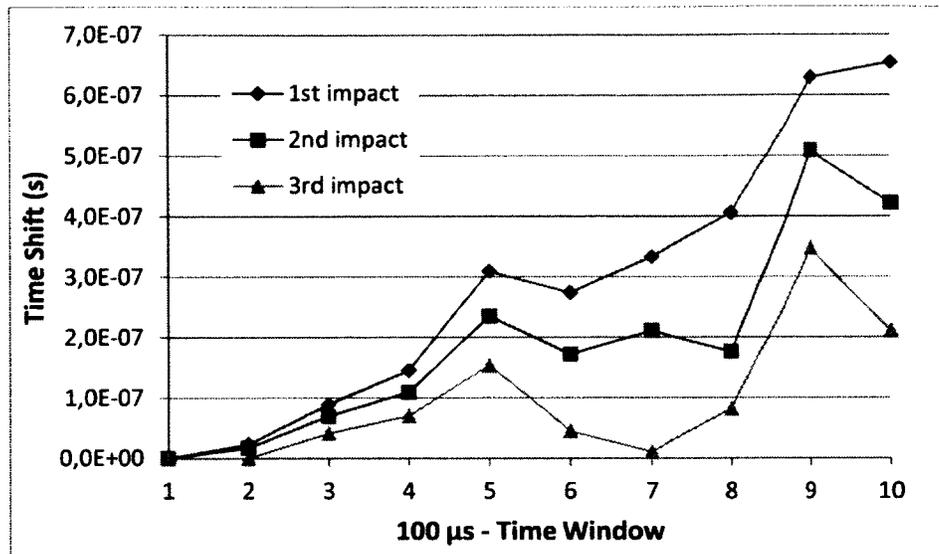


Figure 6.8: Time shifts of an MA2-type of mortar after 13 cycles of freeze-thaw for 10 time-windows over the signal using semi-direct transmission with intervals of approximately 1 minute

This behaviour is the consequence of slow dynamic phenomenon with a logarithmic relaxation time delay studied by Tremblay *et al.* [2010] using a similar technique. To push our understanding further, repeated impacts were produced. One thousand 1ms-signals were recorded, thus amounting to 8 seconds of recording, while a series of 3 impacts struck the sample (Figure 6.9).

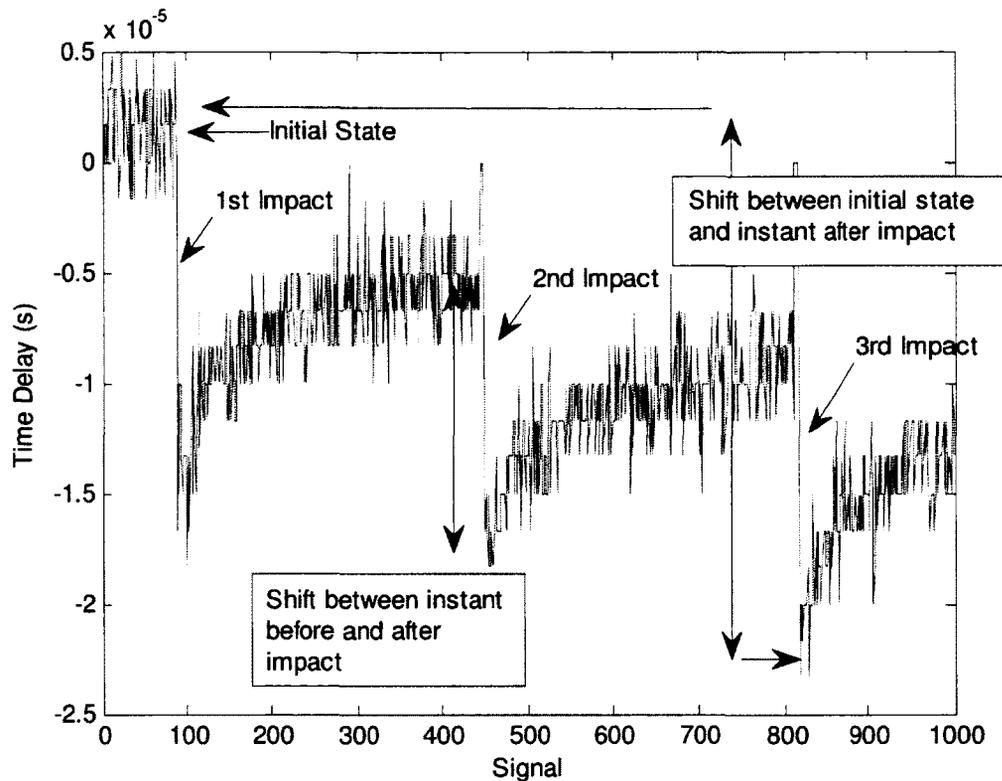


Figure 6.9: The effect on time delay of a series of impacts striking a sample repeatedly

Two analyses were performed on the recordings. First, time shifts were evaluated as if each impact was recorded individually (Figure 6.10a). This means that the initial state for each impact is the state right before the impact or the state of recovery from the previous impact. On the second analysis, shifts were evaluated as the time delay difference between the real initial state and the instant right after the impact (Figure 6.10b).

When evaluated as individual recordings (Figure 6.10a), the graph is similar to the graphs from Figure 6.8, where the sample went through 3 trials with a certain interval of time in between, T1 recording higher shifts than T2 or T3. However, on Figure 6.10b, it can be seen that T3 shows slightly higher shifts than T2 and T1. These results demonstrate how the cracks behave under the repeated impacts: each impact opens the cracks a little more and takes the sample a little farther from its equilibrium state [Ostrovsky et Johnson, 2001]. This is similar to the conditioning phase of a dynamic test. Using repeated impacts in time-shift, it might be possible to observe the dynamic response of samples to continued solicitation and to identify

elastic or viscoelastic behaviour of cracks [Kodjo *et al.*, 2011]. The slow dynamics present in this technique, although hindering repeatability of the tests, gives a new perspective concerning the identification of the type of damage.

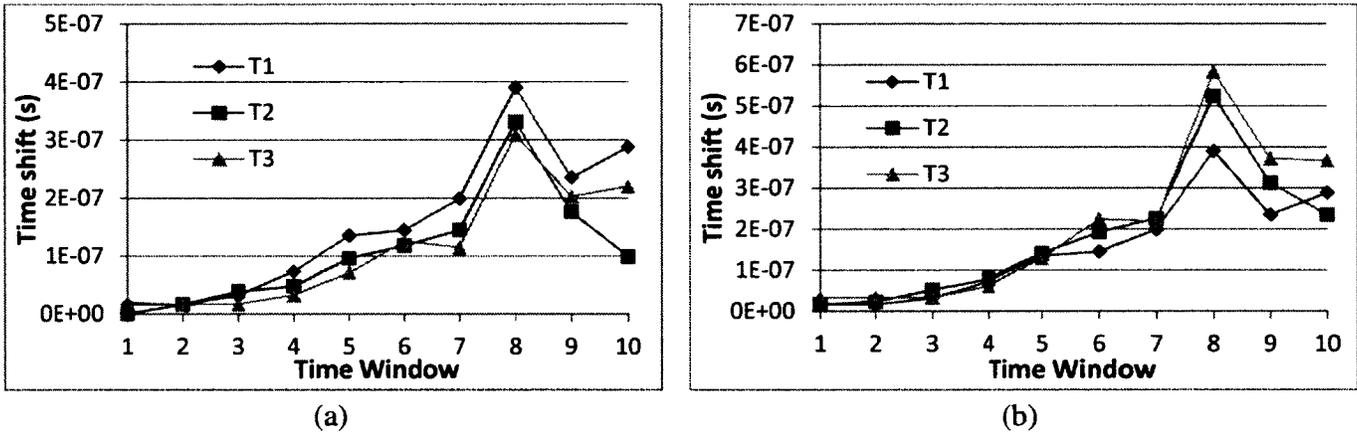


Figure 6.10: Time shifts evaluated as the difference of time delay between (a) the instants before and after the impact and (b) the difference between the initial state and the instant after each impact for 3 consecutive impacts (T1, T2 and T3).

When working on field structure, time is very limited and it is often impossible to conduct several tests on the same measuring point without slow dynamics interfering with the results. There is a need for a way to reduce the impact of slow dynamics to the minimum for shifts analyses.

6.6.3 Reproducibility

When shifts from the same type of samples are compared (sample with the same amount of aggregate particles), a very similar pattern of shifts is observed over the samples for both configuration (Figure 6.11). This confirms that waves travel in approximately the same paths when the medium is similar, which means the technique is reproducible.

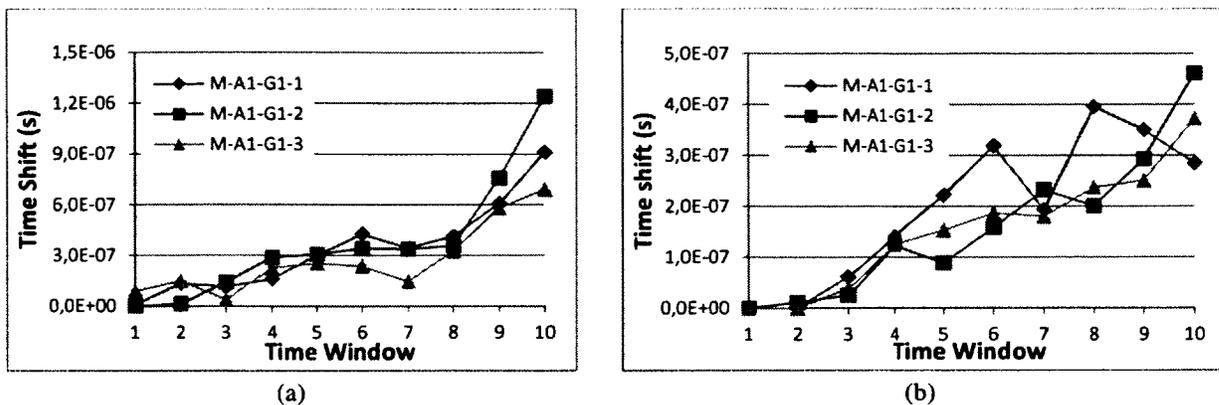


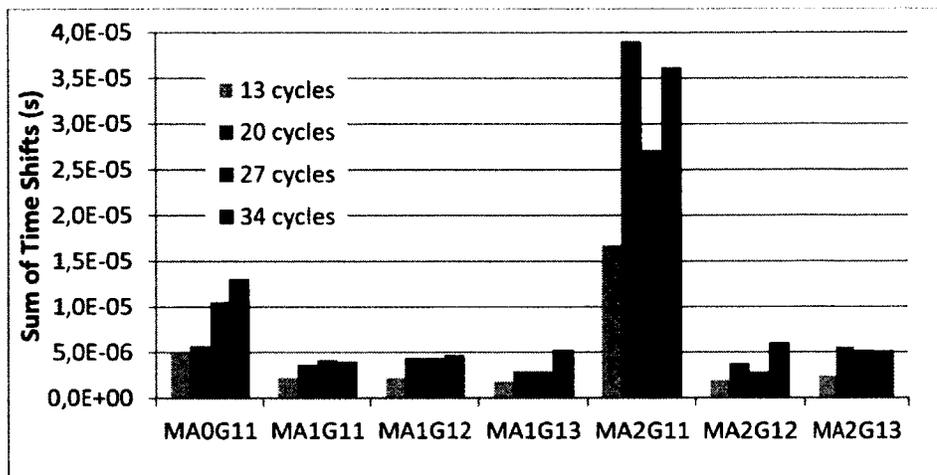
Figure 6.11: Time shifts for the three MA2-type samples after 13 freeze-thaw cycles (a) in indirect transmission and (b) in semi-direct transmission

6.6.4 Semi-Direct versus Indirect Transmission for Time-shift

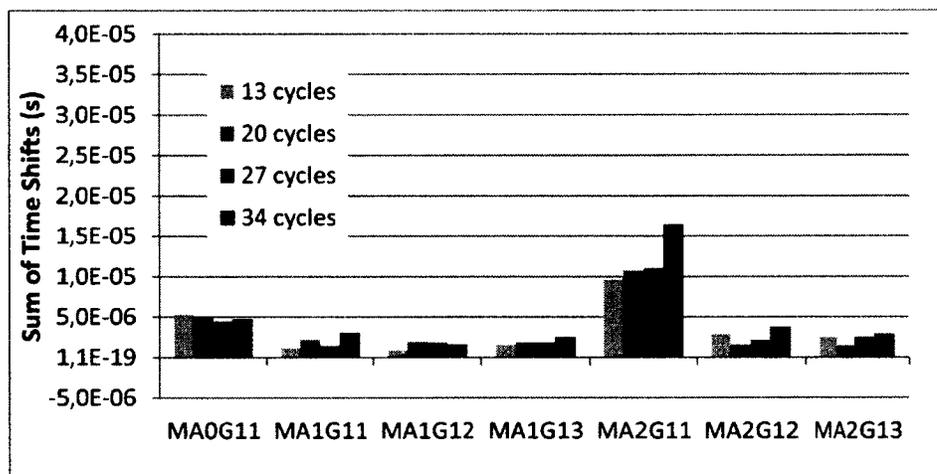
Sensitivity would be how time shifts vary for a variation of the cracking in the medium. Therefore, to determine the more sensitive of the two transmissions, a comparison between time shifts at several levels of freeze-thaw was performed.

Disregarding certain discrepancies, indirect transmission (Figure 6.12a) allows recording of much higher shifts than semi-direct transmission (Figure 6.12b). Moreover, trends along the different levels of freeze-thaw indicate that indirect transmission time shifts generally follow our hypothesis of higher shifts for higher level of damage. Semi-direct transmission time shifts are more erratic. The variation from the first level to the last level of damage is also greater with indirect transmission (Tableau 6.5).

Regarding the discrepancies observed over the different levels of damage, it might be due to changes occurring in the microstructure of the concrete. The avenue has not been explored. Redundancy - using more than one measuring point - might help even out the erratic behaviour a little.



(a)



(b)

Figure 6.12 : Sum of time shifts over 10 time-windows for each sample at 4 levels of freeze thaw in (a) indirect transmission and (b) semi-direct transmission

Tableau 6.5 : Variation of time shifts from 13 to 34 freeze-thaw cycles

	Variation from 13-34 cycles	
	ID	SD
MA0G11	164%	-9%
MA1G11	76%	160%
MA1G12	109%	68%
MA1G13	193%	60%
MA2G11	116%	70%
MA2G12	207%	32%
MA2G13	111%	14%
Average	140%	57%

For samples on which cracking was visible at the surface from the beginning (MA0G11 and MA2G11), shifts were several times higher than on sound samples. These cracks allowed easy water ingress and were much more sensitive to freeze-thaw. They were the samples where it was easiest to detect shifts.

From the description of indirect transmission in section 6.3.1, it was assumed that the recorded signal is mainly a coda wave superposing more secondary waves with time. In section 6.6.1, it has been seen that coda wave is highly sensitive to changes in the medium. Coda waves, because of multiple reflections, have traveled a great length in the material, collecting delays from cracks. Semi-direct transmission does not generate as many reflections, hence, witnesses less cracks. This explains the higher scale of shifts with indirect transmission in opposition to semi-direct transmission. It can also explain the more random variation of shifts in semi-direct transmission over the different levels of freeze-thaw: the low level of damage attained by the samples makes delays harder to quantify and more variable for early arrival waves.

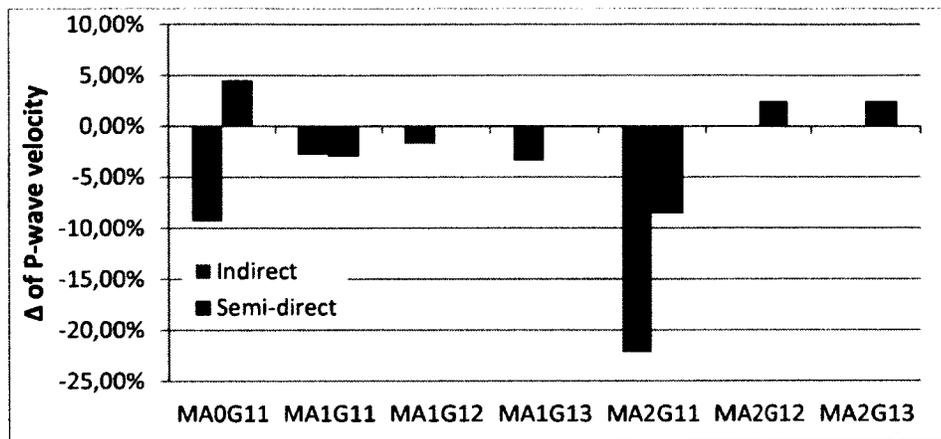
If coda wave is more sensitive, it should be expected that specimen having more scatterers will exhibit higher time shifts. According to results obtained from MA1 and MA2, this hypothesis could not be confirmed. Similarity between results from the two types of samples may be attributed to multiple reflections on the boundaries of the specimen overpowering the scattering effect of the aggregates. If any difference can be noticed between results from MA1 and MA2

samples, it might come from the different levels of damage since surface cracking was visible on MA2 samples whereas MA1 samples showed no sign of damage.

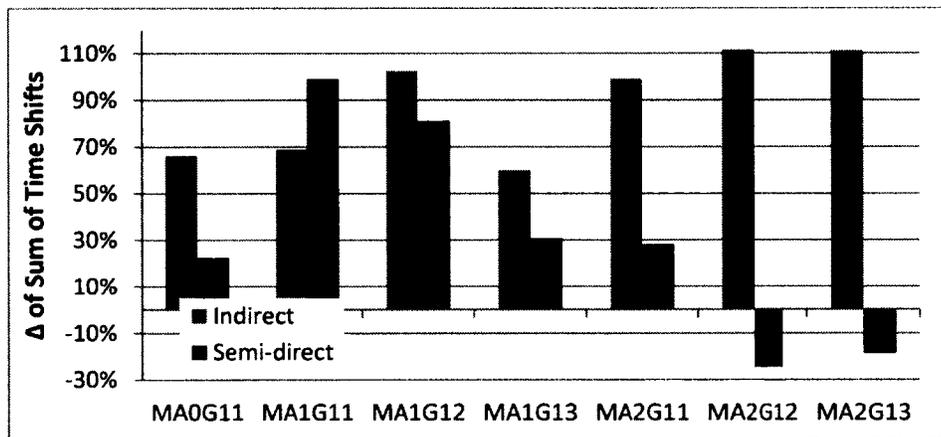
6.6.5 Ultrasonic Pulse Velocity versus Time-shift Technique

Arrival time has been recorded for all samples after each series of freeze-thaw cycles. The first observation is on the difficulty to determining the exact arrival time of the transmitted signal when using indirect transmission. In fact, our premise supposing a clearer signal with semi-direct transmission happens to be very true.

The second observation concerns the sensitivity of UPV. Sensitivity of time-shift has been compared with sensitivity of UPV through their variation over 2 levels of damage (Figure 6.13). Looking at the graphs scales, it is very clear that time-shift demonstrates a much greater variation than UPV. Velocities remained virtually unchanged through 20 freeze-thaw cycles, for most samples. When change was noticed in the velocity, cracking was visible at the surface of the samples. When tracking the change of velocity along the other levels of freeze-thaw, it was concluded that its sensitivity to damage is very low for the change occurred very slowly in comparison to time-shift. Thus, although it is widely used for in-situ testing, UPV is quite limited and time-shift is a better trade-off.



(a)



(b)

Figure 6.13: Variation of (a) UPV and (b) time shift between 0 and 20 freeze-thaw cycles in indirect and semi-direct transmission

6.7 Conclusions

This paper presented the main results from a study on the time-shift technique in both an indirect and a semi-direct transmission configuration.

The first part captured the features of the semi-direct transmission, which are sharper signals and the possibility of identifying and isolating specific waves for analysis. Because these waves travel through different paths, they offered the possibility of assessing damage at the surface independently from the body damage in a single test. Tests concluded that, although coda waves are most sensitive to damage, S-waves are most fitted to assess differential damage on the surface and in the body of the structure evaluated.

Repeatability of the technique has been tested and it was definitely very strong. However, the presence of slow dynamics effect made the analysis of long signals (1ms) less repeatable. It is suggested to use only the first few time-windows to counter the effects of slow dynamics and to allow repeated testing on the same measuring point during field trials.

Slow dynamics effects have also been studied. From the results of different tests, the phenomenon occurring during time-shift tests is better understood. We also realized of the possibility of identifying the type of cracks – elastic or viscoelastic – and relate to the cause of cracking as has been done by Kodjo [2008] [Kodjo *et al.*, 2011].

When comparing both types of transmission for their sensitivity to time shifts, it was concluded that indirect transmission is most sensitive for detecting the initiation of micro-damages because of its high content of coda waves. The shifts recorded are also of a higher scale. In fact, semi-direct transmission shows more erratic behaviours. Nevertheless, semi-direct transmission offers the possibility to investigate the surface independently from the body of the samples. This feature still needs to be investigated with samples where damages at the surface and in the body are controlled.

It was shown that to evaluate repeatability, slow dynamic phenomenon must be taken into account. Repeatability of the technique was definitely very strong if the material is left to relax as long as possible after each test. Indeed, slow dynamics affects the repeatability and is accentuated near the end of the signal, which is the part of the signal with a strong presence of diffused waves. This is due to the strong sensitivity of coda wave.

From this study, it was also shown that semi-direct transmission, because of sharper signals, allowed a more accurate evaluation of arrival time than indirect transmission. It was also demonstrated that velocity, as an indicator, is much less sensitive than time shift. Velocity was only sensitive when cracking became visible at the surface of the samples and at a much lower level of damage.

It is believed that, like other nonlinear techniques, time shift increase will become trifling as cracks become too important. The threshold of the time shift technique sensitivity must be determined and the use of other indicators such as ultrasonic pulse velocity (UPV), a linear parameter which become more sensitive at this stage of damage can be used beyond this threshold.

CHAPITRE 7

CONCLUSION

Ce projet de maîtrise avait pour objectif de tester et valider différentes techniques d'auscultations non destructives acoustiques sur des structures en service afin de tracer les grandes lignes d'un futur protocole d'inspection intégrant ces techniques. Le projet a été approché en deux volets, soit un volet d'essais de terrain sur une variété d'ouvrages de béton en service avec différentes techniques courantes et en développement. Le deuxième volet a permis d'approfondir la compréhension et de valider l'efficacité de la technique moins connue du saut temporel par des essais en laboratoire sur des échantillons endommagés par gel-dégel.

Le programme expérimental de terrain a permis de tester les techniques d'impact-écho, d'UPV et de saut temporel. Quatre indicateurs ont été évalués, soit la vitesse directe d'onde P, la fréquence centroïde, la vitesse indirecte provenant des fréquences de résonance et le saut temporel. Les résultats ont été validés avec l'indice d'endommagement de surface qui évalue visuellement la densité de la fissuration et la largeur des fissures. Les techniques ont démontré une sensibilité différente suivant le niveau d'endommagement et l'orientation de fissurations.

La vitesse directe de l'onde P indique une corrélation intéressante avec l'indice d'endommagement lorsque la transmission se fait en configuration indirecte. La corrélation est nulle en transmission directe. Cependant, ces résultats corrélaient bien avec les résultats d'impact-écho pour les mêmes points. C'est ce qui a permis de constater l'influence de l'orientation des fissures. La fréquence centroïde évaluée avec les signaux en transmission ont présenté une corrélation persistante avec l'indice d'endommagement de surface. Son intérêt comme indicateur lors d'un essai en transmission indirecte est qu'elle permet de rapporter de l'information sur l'élément ausculté sur une certaine profondeur.

En impact-écho, on a pu constater une certaine sensibilité de la fréquence de résonance à la fissuration, mais parce que l'orientation des fissures affectant les ondes était parallèle à la surface, l'indice d'endommagement de surface n'a pas permis de valider les résultats. Il faudra

observer des carottes aux endroits auscultés pour valider adéquatement la technique. De plus, en présence d'armature ou d'une géométrie complexe déviant du type dalle, nous avons observé des fréquences parasites dans les spectres fréquentiels rendant l'interprétation très ardue. L'intérêt de l'impact-écho est la possibilité d'ausculter en profondeur même lorsqu'une seule face est accessible. Toutefois, il ne s'agit pas d'une technique applicable sur tous types de structures et une bonne connaissance et expérience des techniques de traitement de signal est de mise.

En ce qui a trait au saut temporel, on a observé une corrélation très intéressante avec l'indice d'endommagement de surface pour un endommagement nul à moyen. Lorsque les fissures deviennent trop larges (~3-4 mm et plus), la technique semble devenir moins sensible, voire aléatoire. Afin de valider nos résultats sur cette technique encore nouvelle, un programme expérimental en laboratoire a été élaboré.

Le tableau 7.1 présente brièvement les indicateurs et les contextes d'application associés à chaque technique étudiée dans ce projet.

Tableau 7.1 : Résumé des techniques étudiées et de leurs caractéristiques

Technique	Indicateurs	Application
Impact-écho	<ul style="list-style-type: none"> • Fréquence de résonance • Vitesse indirecte 	<ul style="list-style-type: none"> • Géométrie simple • Peu d'armature
UPV	<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse directe • Fréquence centroïde (lorsqu'un signal est enregistré) 	<ul style="list-style-type: none"> • Élément dont l'endommagement est déjà visible • Endommagement de surface en transmission indirecte ou semi-directe • La présence d'armature peut induire des erreurs de mesure
Saut temporel	<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse directe • Fréquence centroïde • Saut temporel 	<ul style="list-style-type: none"> • Endommagement précoce • Avec ou sans armature • Possibilité d'évaluer un endommagement superficiel et interne distinctement en un essai (perspective d'étude)

Les essais en laboratoire ont évalué les configurations de transmission indirecte et semi-directe et ont comparé les résultats du saut temporel, un indicateur de l'élasticité non-linéaire, avec la vitesse directe et la fréquence centroïde. Les résultats ont démontré que la transmission indirecte permet d'observer des variations plus importantes du saut entre les différents états d'endommagement que la transmission semi-directe. La transmission semi-directe, elle, donne de meilleurs résultats pour l'évaluation de la vitesse et pour la fréquence centroïde par un signal dont le début est plus net et une variation par rapport aux différents niveaux d'endommagement plus intéressante. Elle rend également possible l'identification des portions de signal comme étant des ondes P et S directes et de volume.

Les essais de saut temporel réalisés sur ces ondes jusqu'à présent ont permis d'observer qu'elles sont peu sensibles à l'initiation de la fissuration. C'est seulement dans les deux dernières séries de gel-dégel que les variations devenaient plus intéressantes, mais les sauts demeurent faibles. Il a quand même été possible d'observer que les ondes S sont plus sensibles que les ondes P et permettraient, pour des niveaux d'endommagement plus grand, d'établir la différence de fissuration entre la surface et le volume.

Outre des essais de comparaison entre les techniques linéaires et la technique du saut temporel, les essais en laboratoire avait également pour objectif de déterminer la répétabilité et la reproductibilité de la technique ainsi que les paramètres optimaux d'essais.

La reproductibilité de la technique sur différents échantillons de béton ayant subi le même processus de cure et d'endommagement est très bonne. Toutefois, les premiers essais de répétabilité nous ont fait constater la présence du phénomène de dynamique lente, l'échantillon prenant un temps considérable pour revenir à son état initial après un impact. La répétabilité est observée lorsqu'on laisse le matériau se reposer suffisamment entre deux essais. Ceci dit, lorsqu'en chantier nous enregistrons des séries de trois essais consécutifs, il devient important de tenir compte de l'intervalle de temps entre chaque essai. Afin d'obtenir des résultats comparables, il faut que tous les intervalles de temps soient identiques ou il ne faut considérer que le premier essai, mais dans ce cas, il y a moins de place pour des erreurs de manipulation.

Ces constats nous ont permis de développer de nouvelles hypothèses à vérifier avec la technique du saut temporel. En premier lieu, il serait possible d'évaluer de façon plus absolue le niveau de fissuration en saturant le matériau par des impacts répétés amenant l'ouverture complète des fissures. Cette méthode s'apparente aux méthodes non linéaires existantes dans la littérature où une onde de grande amplitude vient exciter le matériau. L'onde de grande amplitude est remplacée ici par des impacts répétés. Pour déterminer l'ouverture complète des fissures, il faudrait observer le délai calculé (Figure 6.9) et attendre la stabilisation de la valeur absolue maximale.

La deuxième perspective permettrait la caractérisation de l'endommagement en utilisant la méthode d'impacts successifs. Cette hypothèse découle directement du travail présenté par Kodjo *et al.* [2011] où la dynamique lente permet de distinguer un endommagement mécanique d'un endommagement par la RAS par la courbe d'excitation.

Une dernière hypothèse serait la possibilité d'évaluer l'endommagement en évaluant la courbe de retour à l'équilibre. Toutefois, cette méthode peut prendre beaucoup de temps et est moins facilement applicable sur site.

Outre ces nouvelles pistes de recherche, il faut évidemment valider toutes nos observations en non destructif par la comparaison entre des résultats non destructifs et une observation de l'endommagement au microscope et par essais destructifs et ce, de façon systématique pour tous les niveaux de gel-dégel. De plus, selon toute logique, le saut temporel varierait en fonction de la distance entre les transducteurs.

Le projet qui vient d'être exposé a été réalisé avec des contraintes majeures. Des travaux de recherches supplémentaires seront donc nécessaires pour atteindre l'objectif d'élaboration d'un protocole d'évaluation des structures existantes. Une des contraintes était l'impossibilité d'échantillonner tout ce qui a été testé par essais non destructifs. Du coup, les conclusions émises ne pouvaient qu'évaluer sommairement la capacité des différentes techniques et comment elles peuvent s'intégrer à un plan d'inspection. Nos conclusions ont effectivement permis de déterminer pour quel type de structure et à quel niveau d'endommagement les tech-

niques sont destinées. La quantification de l'endommagement constitue la prochaine étape. Il faut en fait tenter de normaliser le saut par rapport à la distance entre les transducteurs et la profondeur de l'élément ausculté. Deuxièmement, le saut temporel étant une technique nouvelle, il n'existe pas de littérature sur le sujet et beaucoup de questions doivent être répondues par expérimentation. De ce fait, il n'a pas été possible d'évaluer l'ensemble des facteurs influençant la technique et nous avons dû nous arrêter sur une méthodologie qui n'est pas parfaitement optimisée. Il demeure que les résultats que nous avons réussi à obtenir ont permis de conclure sur plusieurs points dont l'intérêt des différentes techniques, leurs intervalles de sensibilité, la configuration de transmission optimale pour chacune, etc.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- ASTM. (2004). ASTM C597: Standard test method for pulse velocity through concrete. *Annual book of ASTM standards*, West Conshohocken, Pa, volume 4, numéro 2
- ASTM. (1994). ASTM C215: Standard test method fundamental transverse, longitudinal, and torsional frequencies of concrete specimens. *Annual book of ASTM standards*, West Conshohocken, Pa, volume 4, numéro 2
- ASTM. (1997). ASTM C597: Standard method to test pulse velocity through concrete. *Annual book of ASTM standards*, West Conshohocken, Pa, volume 4, numéro 2
- Aki, K. et Chouet, B. (1975). Origin of coda waves: Source, attenuation, and scattering effects, *Journal of Geophysical Research*, volume 80, p. 3322–3342.
- Al Wardany, R. (2005). *Caractérisation non destructive des structures en béton au moyen des ondes dispersives de Rayleigh et de Lamb*. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada, 181 p.
- Bentahar, M., El Aqra, H., Guerjouma, R. E., Griffa, M., & Scalerandi, M. (2006). Hysteretic elasticity in damaged concrete: Quantitative analysis of slow and fast dynamics. *Physical Review B (Condensed Matter and Materials Physics)*, volume 73, numéro 1, p.14116-1.
- Bentahar, M., Marec, A., El Guerjouma, R., Thomas, J. & Tournat, V. (2008). Experimental investigations on non-linear slow dynamics of damaged materials: Correlation with acoustic emission. *Nonlinear Acoustics - Fundamentals and Applications: 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics – ISNA*, volume 18, numéro 1022, p.501-4.
- Berubé, M. -A., Smaoui, N., Fournier, B., Bissonnette, B. et Durand, B. (2005). Evaluation of the expansion attained to date by concrete affected by alkali-silica reaction. Part III. Application to existing structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 32, numéro 3, p. 463-79.
- Boukari Y., Rivard P., Bulteel D., Abriak, N.E, Ballivy G. (2011) Comparative study of nonlinear resonance and wave interaction techniques for concrete damage assessment, *Int. Symp. on NDT of Materials and Structures*, Istanbul (Turquie), Mai 2011.
- Carino, N.J. (2001) The impact-echo method: an overview. *Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition/edited by P.C. Chang*. Washington, D.C. (USA), Mai 2001.
- Chai, H. K., Momoki, S., Kobayashi, Y., Aggelis, D. G., & Shiotani, T. (2011). Tomographic reconstruction for concrete using attenuation of ultrasound. *NDT and E International*, volume 44, numéro 2, p.206-215.

- Cheng, C. et Sansalone, M. (1993). Impact-echo response of concrete plates containing delaminations: numerical, experimental and field studies. *Matériaux et constructions*, volume 26, numéro 159, p. 274-285.
- David, J. and Cheeke, N. (2002). *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. CRC Press LLC, p 324-326. (Collection CRC Serie in pure and applied physics).
- Dondonné, E., Toussaint, P. (2002). Synthèse sur l'utilisation de l'impact-écho par la Direction de l'expertise des structures du ministère wallon de l'Équipement et des Transpots (French). *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, numéro 239, p.51-62.
- Elmer, F.-J. (1998). *Nonlinear Resonance*. En ligne.
<http://www.elmer.unibas.ch/pendulum/nonres.htm> (Consulté le 10 novembre 2011).
- Fournier, B. et Berubé, M.-A. (2000). Alkali-aggregate reaction in concrete: A review of basic concepts and engineering implications. *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 27, numéro 2, p. 167-191.
- Gagné, R. (2000). *Notes de cours : GCI 714 – Durabilité et réparation du béton*. Université de Sherbrooke, 339 p.
- Gouvernement du Québec. (2011). «Réseau routier », In *Transport Québec*. En ligne.
http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/grand_public/vehicules_promenade/reseau_routier#reseau (Consulté le 15 novembre 2011).
- Herraiz, E. et Espinosa, F. (1987). Coda Waves : A Review. *PAGEOPH*, volume 125, numéro 4, p.499-578.
- Hobbs, D.W. (1988). *Alkali-silica reaction in concrete*. Thomas Telfort Ltd, London.
- Houde, Marie-Josée. (2007). « Modélisation de poutres en béton armé endommagées par chargements cycliques : Comportement en flexion et en cisaillement. » Mémoire de maîtrise en ligne, Québec, Université Laval. In *Collection Mémoires et thèses électroniques*.
<http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/fichiers/24305/ch03.html> (Consulté le 14 juillet 2012).
- Huang, Q., Gardoni, P., & Hurlbauss, S. (2011). Predicting concrete compressive strength using ultrasonic pulse velocity and rebound number. *ACI Materials Journal*, volume 108, numéro 4, 403-412.
- Hughes D. S. and Kelly J. L (1953). Second-Order Elastic Deformation of Solids. *Physical Review*, volume 92, numéro 5, p.1147-1149.

- Ju, J. W., Weng, L., & Liu, Y. (2006). Ultrasonic frequency-dependent amplitude attenuation characteristics technique for nondestructive evaluation of concrete. *ACI Materials Journal*, volume 103, numéro 3, 177.
- Kesner, K., Sansalone, M. J. et Poston, R. W. (2004). Use of the impact-echo method to evaluate damage due to distributed cracking in concrete plate members: Theory and field trials. National Research Council, p. 61-69.
- Kielczyrski, P., & Cheeke, J. D. N. (1997). Love waves propagation in viscoelastic media [and NDT application]. 1997 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings an International Symposium, numéro 1, p. 437-40.
- Kodjo, A. S. (2008). *Contribution à la caractérisation des bétons endommagés par des méthodes de l'acoustique non linéaire. Application à la réaction alcalis-silice*. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke et Université de Cergy-Pontoise, Sherbrooke, Canada, 127 p.
- Kodjo, A. S., Rivard, P., Cohen-Tenoudji F., Gallias J-L. (2009). Evaluation of damages due to alkali-silica reaction with nonlinear acoustics techniques, in XIV International Conference on Nonlinear Elasticity in Material, The Acoustical Society of America through the American Institute of Physics, <http://asa.aip.org>
- Kodjo, A. S., Rivard, P., Cohen-Tenoudji, F. & Gallias, J. (2011). Impact of the alkali-silica reaction products on slow dynamics behavior of concrete. *Cement and Concrete Research*, volume 41, numéro 4 p.422-428.
- Komlos, K., Popovics, S., Nurnbergerova, T., Babal, B., & Popovics, J. S. (1996). Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards. *Cement and Concrete Composites*, volume 18, numéro 5, p.357-364.
- Lacouture, J. (2002). *Modélisation de l'évolution des coefficients mécaniques du béton pendant la prise. Liaison avec les mesures ultrasonores linéaires et non linéaires*. (Ph.D. thesis in French), Université Paris 7, Paris, France, 195 p.
- Lillamand I., Chaix J. F., Ploix M. A., Garnier V. (2010). Acoustoelastic effect in concrete material under uni-axial compressive loading. *NDT&E International*, numéro 43, p.655-660.
- Malhotra V. (1976). *Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods*. Detroit. MI: ACI Monograph No. 9.
- Michel, B., Thiebaut, J. et Wackenheim, C. (2003). Relation of the mineralogy of aggregates in the understanding of the risks of the alkali reaction. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, volume 62, numéro 2, p. 145-153.

- Murnaghan, F. D. (1951). *Finite Deformations of an Elastic Solid*, John Wiley and Sons, Inc, New York.
- Ostrovsky, L. A. & Johnson, P. A. (2001). Nonlinear dynamics of rock: Hysteretic behavior. *Radiophysics and Quantum Electronics*, volume 44, numéro 5-6, 450-64.
- Ostrovsky, L. A., & Rudenko, O. V. (2008). What problems of nonlinear acoustics seem to be important and interesting today? *Nonlinear Acoustics - Fundamentals and Applications: 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics - ISNA 18*, p. 9-16.
- Pao, Y. W. Sachse and H. Fukuoka. Acoustoelasticity and Ultrasonic Measurement of residual Stress. *Physical Acoustics. Vol. XVII*. W. Mason and R. Thurston, eds. Orlando, FL: Academic Press (1984), p. 61-143
- Payan, C., Garnier, V., Moysan, J. et Johnson, P. A. (2009). Determination of third order elastic constants in a complex solid applying coda wave interferometry. *Applied Physics Letters*, volume 94, numéro 1, p. 011904 (3 p.).
- Peeters, G. (2004). A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the CUIDADO project. *IRCAM*.
- Poole, A.B. (1992). Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. *Alkali-silica reaction in concrete/edited by R.N. Swamy*. Blackie and Son Ltd, Bishopbriggs, Glasgow, p. 16-20.
- Popovics, S and Popovics, J. S. (1992). A Critique of the ultrasonic pulse velocity method for testing concrete. *Nondestructive Testing of Concrete Elements and Structures*, p.94-103.
- Prassianakis, I. N. et Giokas, P. (2003). Mechanical properties of old concrete using destructive and ultrasonic non-destructive testing methods. *Magazine of Concrete Research*, volume 55, numéro 2, p. 171-176.
- Prassianakis, I. N. et Prassianakis, N. I. (2004). Ultrasonic testing of non-metallic materials: concrete and marble. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, volume 42, numéro 2, p. 191-198.
- Rasolofosaon, P., Zinszner, B. et Johnson, P.A. (1997). Propagation des ondes élastiques dans les matériaux non linéaires. *Revue de l'Institut Française du Pétrole*, vol. 52, n°6, p. 585-608.
- Rahzi, J. (2010). *Notes de cours : GCI 716 – Technique d'auscultation et d'instrumentation en infrastructures*. Université de Sherbrooke.

- Rivard, P. et Ballivy, G. (2005). Assessment of the expansion related to alkali-silica reaction by the Damage Rating Index method. *Construction & Building Materials*, volume 19, numéro 2, p. 83-90.
- Rivard, P. et Saint-Pierre, F. (2009). Assessing alkali-silica reaction damage to concrete with non-destructive methods: From the lab to the field. *Construction and Building Materials*, volume 23, numéro 2, p. 902-909.
- Saint-Pierre, F., Rivard, P. et Ballivy, G. (2007). Measurement of alkali-silica reaction progression by ultrasonic waves attenuation. *Cement and Concrete Research*, volume 37, numéro 6, p. 948-956.
- Sansalone, M. (1997). Impact-echo: The complete story. *ACI Structural Journal*, volume 94, numéro 6, p. 777-786.
- Sargolzahi, M., Kodjo, S. A., Rivard, P. et Rhazi, J. (2010). Effectiveness of nondestructive testing for the evaluation of alkali-silica reaction in concrete. *Construction and Building Materials*, volume 24, numéro 8, p. 1398-1403.
- Schubert, F. et Kohler, B. (2008). Ten lectures on impact-echo. *Journal of Nondestructive Evaluation*, volume 27, numéro 1-3, p. 5-21.
- Schurr, D., Kim, J.-Y., Sabra, K. G., Jacobs, L. J. (2011). Damage detection in concrete using coda wave interferometry. *NDT&E International*, numéro 44, p.728-735.
- Shah, A. A. et Ribakov, Y. (2009-a). Non-destructive evaluation of concrete in damaged and undamaged states. *Materials and Design*, volume 30, numéro 9, p. 3504-3511.
- Shah, A. A. et Ribakov, Y. (2009-b). Non-linear ultrasonic evaluation of damaged concrete based on higher order harmonic generation. *Materials and Design*, volume 30, numéro 10, p. 4095-4102.
- Sims, I. (1992). UK Experience. *Alkali-silica reaction in concrete/edited by R.N. Swamy*. Blackie and Son Ltd, Bishopbriggs, Glasgow, p. 178-183.
- Smaoui, N., Berube, M., Fournier, B., Bissonnette, B. et Durand, B. (2004-a). Evaluation of the expansion attained to date by concrete affected by alkali-silica reaction. Part I: Experimental study. *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 31, numéro 5, p. 826-845.
- Smaoui, N., Fournier, B., Berube, M., Bissonnette, B. et Durand, B. (2004-b). Evaluation of the expansion attained to date by concrete affected by alkali-silica reaction. Part II: Application to nonreinforced concrete specimens exposed outside. *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 31, numéro 6, p. 997-1011.

- Snieder, R., Gret, A., Douma, H. & Scales, J. (2002). Coda wave interferometry for estimating nonlinear behavior in seismic velocity. *Science*, volume 295, numéro 5563, p.2253-5.
- Snieder, R. (2004). Coda wave interferometry, in 2004 Yearbook of Science and Technology, McGraw-Hill, New York, p.54-56.
- Solís-Carcaño, R. et Moreno, E. I. (2008). Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, volume 22, numéro 6, p. 1225-1231.
- Stauffer, J. D., Woodward, C. B. et White, K. R. (2005). Nonlinear Ultrasonic Testing with Resonant and Pulse Velocity Parameters for Early Damage in Concrete. *ACI Materials Journal*, volume 102, numéro 2, p. 118.
- Swamy, R.N. (1992). Testing for alkali-aggregate reaction. *Alkali-silica reaction in concrete/edited by R.N. Swamy*. Blackie and Son Ltd, Bishopbriggs, Glasgow, p. 72-92.
- Swamy, R. N. (1997). Assessment and rehabilitation of AAR-affected structures. *Cement and Concrete Composites*, volume 19, numéro 5-6, p. 427-440.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Robert E. S. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge University Press. p. 149.
- The Constructor. (2011). *Inspection of Concrete Structures – II*. En ligne. <http://theconstructor.org/concrete/inspection-of-concrete-structures-ii/868/> (Consulté le 8 août 2011).
- Towhata, I. (2008). *Wave Propagation in Elastic Medium. Geotechnical Earthquake Engineering*. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, p. 42-58.
- Tremblay, N., Larose, E., Rossetto, V. (2010). Probing slow dynamics of consolidated granular multicomposite materials by diffuse acoustic waves spectroscopy. *Journal of the Acoustical Society of America*, Volume 127, numéro 3, p.1239-1243.
- Turgut, P., & Kucuk, O. F. (2006). Comparative relationships of direct, indirect, and semi-direct ultrasonic pulse velocity measurements in concrete. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, volume 42, numéro 11, p.745-751.
- Vergara, L., Gosálbez, J., Fuente, J. V., Miralles, R., & Bosch, I. (2004). Measurement of cement porosity by centroid frequency profiles of ultrasonic grain noise. *Signal Processing*, volume 84, numéro 12, p.2315-2324.
- Whitehurst, E. A. (1951). Soniscope tests concrete structures. *Journal of the American Concrete Institute*, Feb. 1951, volume 22, numéro 6, p.433-444.

Zhu, J. et Popovics, J. S. (2007). Imaging concrete structures using air-coupled impact-echo.
Journal of Engineering Mechanics, volume 133, numéro 6, p. 628-640.