

# Suivi et caractérisation de la RAG par techniques non destructives

Patrice Rivard, Gérard Ballivy, Jamal Rhazi, Riad Al-Wardany, Guillaume Guissi, Omar Dous

Groupe de recherche en auscultation et instrumentation (GRAI)

Département de génie civil

Université de Sherbrooke J1K 2R1

## Résumé

Un programme expérimental a été conçu à l'Université de Sherbrooke afin de relier les propriétés physiques du béton (acoustique, électrique, diélectrique) aux propriétés mécaniques (résistance à la compression, module d'élasticité). Cinq mélanges, caractérisés par des compositions différentes et des résistances à la compression variant de 12 MPa à 80 MPa ont été étudiés. Des dalles de 1x1x0,26 m ont été fabriquées comme banc d'essais. Deux de ces cinq mélanges contiennent des granulats réactifs. L'objectif est de suivre l'évolution de la réaction alcalis-granulats (RAG) à l'aide de techniques non destructives et de comparer les résultats aux variations de propriétés mécaniques déterminées de façon conventionnelle. Des mesures d'allongement sur prismes et une quantification de l'endommagement par pétrographie seront également réalisées pour valider les mesures non destructives. Cet article présente l'avancement des travaux en cours.

## 1. Introduction

Les techniques non destructives sont de plus en plus utilisées pour l'évaluation de l'état des structures en béton. En général, une seule méthode est utilisée et les résultats obtenus, plutôt qualitatifs, ne permettent pas de discriminer les divers paramètres affectant les mesures. Il s'avère nécessaire de coupler différentes techniques afin de tirer un maximum d'informations des résultats acquis en laboratoire ou sur le terrain.

Cinq mélanges de béton de compositions et de propriétés mécaniques différentes ont été préparés dans le but d'étudier les relations entre les propriétés mécaniques et physiques du béton [GRAI 2003]. De plus, deux de ces mélanges contiennent des granulats réactifs et ont une teneur rehaussée en alcalis, ce qui provoquera un endommagement rapide du béton. L'évolution de la réaction alcalis-granulats et de ses effets seront ainsi caractérisés par méthodes destructives et non destructives.

## 2. Programme expérimental

### *2.1 Préparation des mélanges*

Pour chacune des cinq gâchées, il a été coulé une dalle de 100 cm×100 cm×26 cm, instrumentée à l'aide d'un thermocouple et, dans le cas des dalles réactives, d'une jauge à fibre optique et de plots de mesure collés à l'extérieur afin de suivre les déformations engendrées par la RAG. De plus, des cylindres 100 mm×200 mm ont été fabriqués pour les essais destructifs (résistance à la compression, modules d'élasticité, études pétrographiques, caractérisation de la porosité).

La formulation complète des mélanges est donnée au tableau 1. Le ciment utilisé est un ciment portland ordinaire type 10, à l'exception du mélange B1 où un ciment HSF (contenant déjà de la fumée de silice) a été utilisé. Dans le cas des mélanges réactifs (B2 et B4), des granules de NaOH ont été ajoutés à l'eau de gâchage afin d'augmenter la teneur en alcalis du béton à 5,25 kg/m<sup>3</sup> Na<sub>2</sub>O<sub>éq.</sub> Un agent entraîneur d'air a été utilisé pour tous les mélanges.

## 2.2 Granulats

Les bétons non réactifs contiennent un granulats calcaire 5-20 mm non lavé, à l'exception du mélange B1 où la fraction granulométrique est de 5-14 mm lavée. Les mélanges réactifs contiennent 25% de calcaire Spratt et 75% de granulats du Nouveau-Mexique (mélange de roches volcaniques). Ces deux granulats sont considérés comme très réactifs dans le béton.

## 2.3 Condition de conservation

Les dalles ont été enrobées de tissu absorbant maintenu humide et sont conservées à la température de la pièce. La température du béton a été mesurée régulièrement et varie entre 14°C et 22°C. Les éprouvettes cylindriques sont conservées à la température de la pièce, au-dessus de l'eau dans des contenants fermés.

TABLEAU 1: Formulation et propriétés des mélanges B1 à B5

	B1	B2	B3	B4	B5
Réactivité	non réactif	réactif	non réactif	réactif	non réactif
rapport E/C	0,3	0,66	0,67	0,75	0,84
Type de ciment	HSF	portland 10	portland 10	portland 10	portland 10
Granulat	5-14 mm lavé calcaire	5-20 mm 75% N-M 25% Spratt	5-20 mm calcaire	5-20 mm 75% N-M 25% Spratt	5-20 mm calcaire
Formulation					
Ciment	510 kg/m <sup>3</sup>	390 kg/m <sup>3</sup>	205 kg/m <sup>3</sup>	210 kg/m <sup>3</sup>	195 kg/m <sup>3</sup>
Fumée de silice	27,5 kg/m <sup>3</sup>	0 kg/m <sup>3</sup>	0 kg/m <sup>3</sup>	0 kg/m <sup>3</sup>	0 kg/m <sup>3</sup>
Eau	155,6 kg/m <sup>3</sup>	258 kg/m <sup>3</sup>	137 kg/m <sup>3</sup>	158 kg/m <sup>3</sup>	164 kg/m <sup>3</sup>
Granulat	900 kg/m <sup>3</sup>	1140 kg/m <sup>3</sup>	798 kg/m <sup>3</sup>	705 kg/m <sup>3</sup>	689 kg/m <sup>3</sup>
Sable	793 kg/m <sup>3</sup>	720 kg/m <sup>3</sup>	1140 kg/m <sup>3</sup>	1133 kg/m <sup>3</sup>	1002 kg/m <sup>3</sup>
Entraîneur d'air	0,1 mL/L	0,1 ml/L	0,1 mL/L	0,1 mL/L	0,1 mL/L
Superplastifiant	7,5 mL/L	0	0	0	0
Ajout de NaOH	non	oui	non	Oui	non
Na <sub>2</sub> O <sub>éq.</sub>	4,59 kg/m <sup>3</sup>	5,25 kg/m <sup>3</sup>	1,64 kg/m <sup>3</sup>	5,25 kg/m <sup>3</sup>	1,56 kg/m <sup>3</sup>
Propriétés état frais				5,25	
Affaissement	255 mm	190 mm	100 mm	120 mm	230 mm
Air	6,8%	2,1%	6,3%	4,1%	pas testé
Masse volumique	2283 kg/m <sup>3</sup>	2326 kg/m <sup>3</sup>	2260 kg/m <sup>3</sup>	2223 kg/m <sup>3</sup>	2262 kg/m <sup>3</sup>

### **3. Méthodes non destructives utilisées**

Deux types de méthodes non destructives sont présentées ici, à savoir les méthodes acoustiques et les méthodes électriques.

#### ***3.1 Méthodes acoustiques***

Ces méthodes reposent sur le traitement et l'analyse des ondes générées par un impact donné sur une surface solide. On distingue deux types d'ondes: les ondes de volume, primaire (*P*) et secondaire (*S*), et les ondes de surface, de Rayleigh (*R*) et de Love (*L*). On peut considérer que 67 % de l'énergie produite se propage sous forme d'ondes de surface, 26 % sous forme d'ondes *S* et 7 % sous forme d'ondes *P*. Les techniques présentées ici consistent à enregistrer et mesurer les vitesses des ondes *P* et des ondes de Rayleigh. La propagation de ces ondes dans le béton est influencée par divers paramètres, dont principalement le module d'élasticité et les défauts rencontrés (porosité, fissuration, interfaces, etc.).

#### ***3.2 Méthodes électriques***

Les méthodes électriques consistent à injecter un courant dans le béton et à mesurer les variations de potentiel à différents endroits, ce qui permet de calculer la résistivité électrique du béton (soit l'opposition au passage du courant électrique). Ce dernier paramètre peut nous renseigner sur la porosité du béton, sa teneur en eau et son degré de fissuration. La méthode employée dans le cadre de nos travaux est celle dite de Wenner, qui est la technique la plus utilisée pour mesurer la résistivité électrique du béton sur chantier. Il s'agit d'un dispositif qui est constitué de quatre électrodes alignées, dont l'injection de courant se fait aux extrémités.

### **4. Caractérisation du béton à 28 jours**

#### ***4.1 Propriétés mécaniques et microstructurales***

Le tableau 2 donne les caractéristiques des mélanges déterminées à 28 jours. Les mélanges B1 et B2 présentent de très bonnes caractéristiques mécaniques alors que les mélanges B3 à B5 peuvent être considérés comme de piètre qualité.

#### ***4.2 Propriétés physiques***

##### ***4.2.1 Méthodes acoustiques***

Les différentes méthodes non destructives utilisées ont permis de distinguer, à 28 jours, les mélanges selon leurs propriétés mécaniques. La figure 1 illustre les vitesses de phase des ondes de Rayleigh. La dispersion des phases de longueur d'onde inférieure à 0,06 m est reliée à l'effet de peau du béton, zone où les propriétés sont différentes du reste du solide. Ce phénomène est beaucoup plus marqué pour le mélange B1 qui possède, de loin, les résistances les plus élevées.

La vitesse des ondes de Rayleigh corrèle beaucoup mieux les valeurs de module d'élasticité que les valeurs de résistance à la compression (Fig. 1). Les mélanges B3 à B5, qui ont des modules d'élasticité similaires (22 à 24 GPa), présentent des vitesses peu différenciées. Toutefois, les mélanges B2 et B1 montrent des augmentations de vitesse proportionnelles à l'augmentation de leur module d'élasticité (29 et 38 GPa).

TABLEAU 2: Caractéristiques des mélanges à 28 jours

Paramètres	B1	B2	B3	B4	B5
Résistance à la compression (MPa)	80,1	29,2	14,8	12,5	15
module d'élasticité (GPa)	38,4	28,8	22,7	24,0	21,9
Porosité ouverte moyenne (%)	8,7	13,7	18,1	16,9	13,3
Diamètre moyen des pores ( $\mu\text{m}$ )	0,021 0,636	0,062	0,147	0,205	0,277

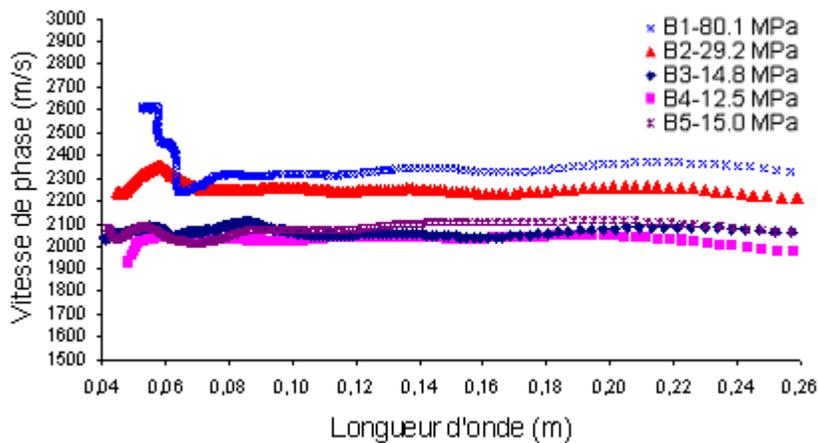


Figure 1: Vitesses de phases des ondes de Rayleigh

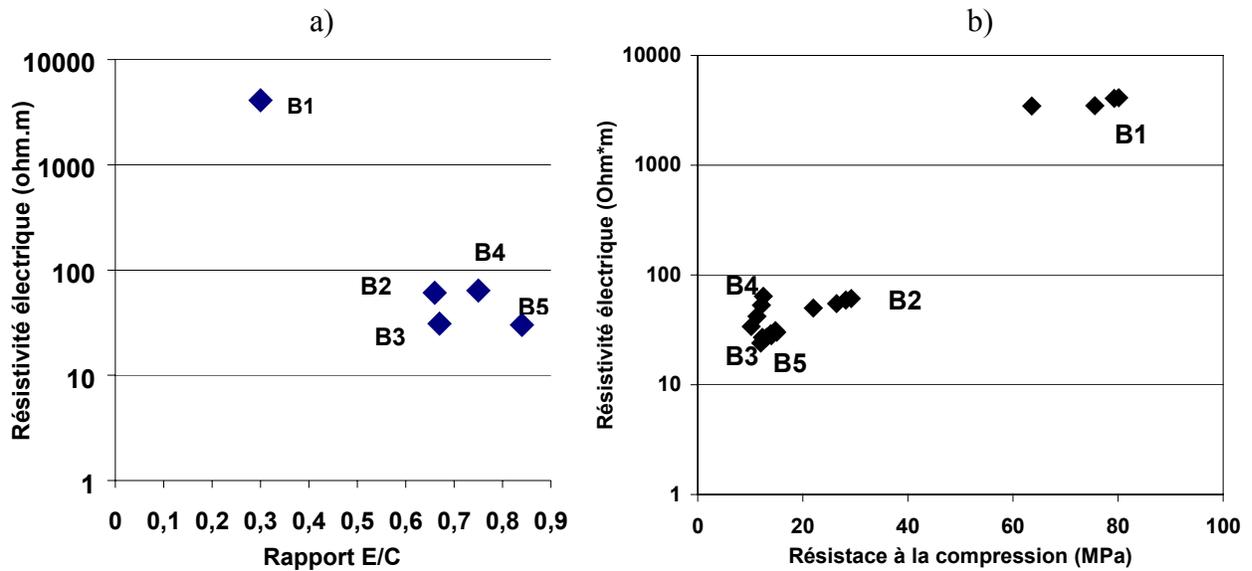


Figure 2: Valeurs de résistivité électrique des bétons en fonction:  
a) rapport E/C  
b) résistance à la compression

#### 4.2.1 Méthodes électriques

La résistivité électrique des différents mélanges semble mieux corrélérer la résistance à la compression du béton (Fig. 2b) que son module d'élasticité (non illustré). Ceci est principalement attribuable au fait que le courant électrique circule dans l'eau du béton à travers le réseau poreux. Il est bien connu que la résistance à la compression a lien direct avec la porosité du béton. Par ailleurs, pour des rapports E/C relativement élevés, aucune tendance ne semble se dégager entre ce paramètre et la résistivité du béton (Fig. 2a).

### 4. Endommagement par la RAG

#### 4.1 Expansion des dalles

Les deux dalles réactives n'ont pas présenté d'expansion durant les premières semaines suivant leur fabrication (Fig. 3). Dans le cas des deux dalles, un gonflement se manifeste après environ 30 jours. Ce premier saut est essentiellement dû à l'augmentation de la température du laboratoire (enregistré dans le béton par des thermocouples). Néanmoins, la tendance à l'expansion s'est maintenue jusqu'à présent dans la dalle B2. Des fissures sont apparues à la surface de cette dalle au début du mois de mars 2003. En ce qui concerne l'autre dalle réactive (B4), l'expansion après 30 jours est très peu perceptible.

#### 4.2 Variations des propriétés mécaniques

La résistance à la compression mesurée à 28, 91 et 126 jours sur les cylindres des mélanges réactifs n'a pas montré de variation significative. Toutefois, le module d'élasticité est légèrement réduit à partir de 28 jours, surtout dans le cas du mélange B2, soit une diminution du module de 8,6% (Fig. 4). Ces tendances sont conformes à ce que l'on retrouve dans la littérature.

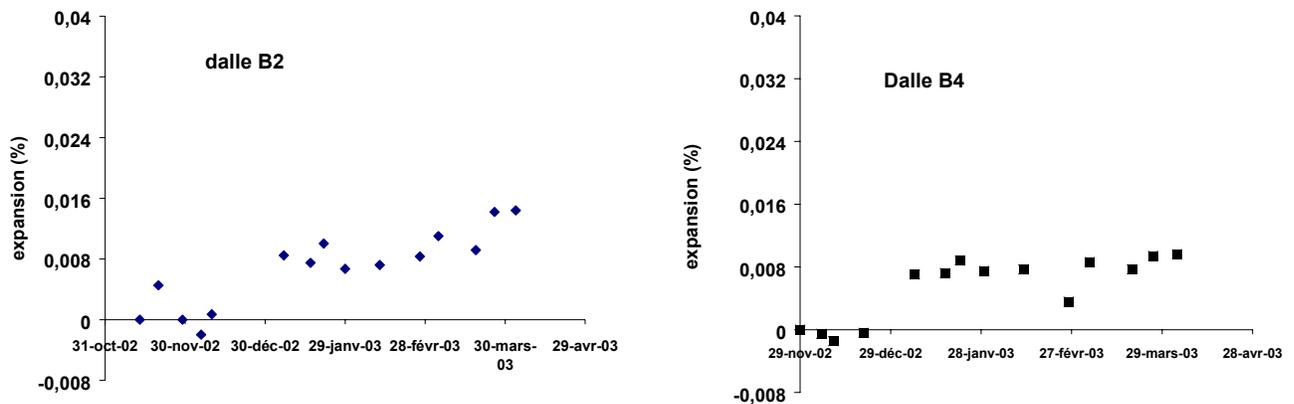


Figure 3: Expansion verticale des dalles B2 et B4, mesurée par un capteur à fibre optique

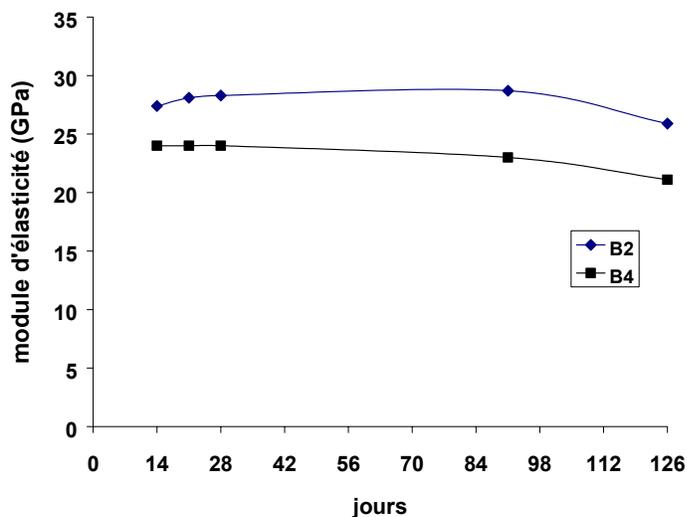


Figure 4: Variation du module d'élasticité des mélanges réactifs

### 4.3 Mesures acoustiques

La littérature rapporte qu'en général les vitesses des ondes de compression diminuent en fonction de l'expansion du béton atteint de RAG. En revanche, on retrouve quelques études signalant que les vitesses ne varient pratiquement pas malgré l'expansion [Amasaki et Takagi 1989, Pleau et al. 1989].

Les mesures effectuées à la fois sur les dalles réactives et sur les éprouvettes cylindriques tendent à montrer qu'en dépit d'une expansion significative du béton, les vitesses des ondes de compression et des ondes de Rayleigh n'ont pratiquement pas changé après 124 jours. Les figures 5 et 6 illustrent les vitesses de phases des ondes de Rayleigh dans les dalles réactives B2 et B4. Aucune variation significative ne peut être notée après 124 jours. Une légère augmentation des vitesses est même observée dans la dalle B4 après 116 jours. En ce qui concerne les vitesses des ondes de compression (mesurées sur les éprouvettes cylindriques), une légère chute est observée après 120 jours (Fig. 7).

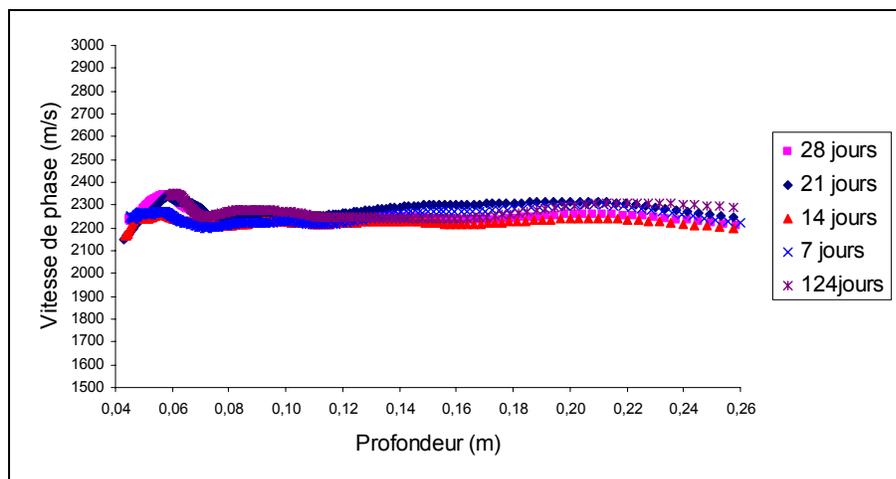


Figure 5: Courbes de dispersion sur la dalle B2

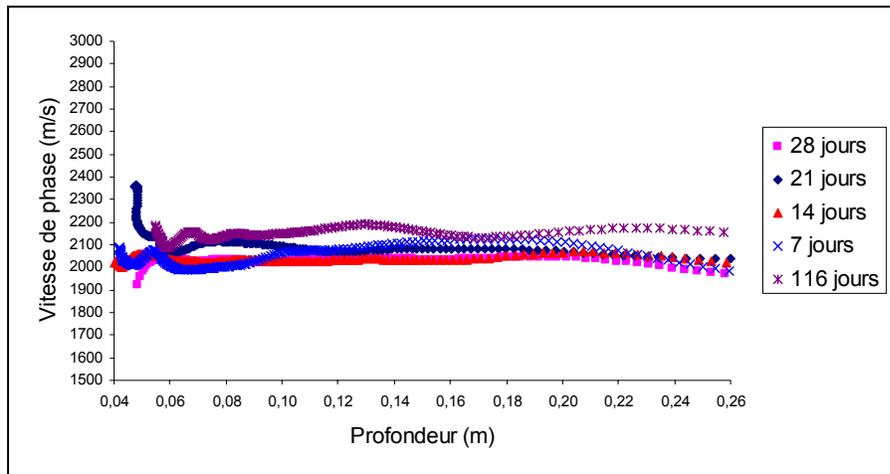


Figure 6: Courbes de dispersion sur la dalle B4

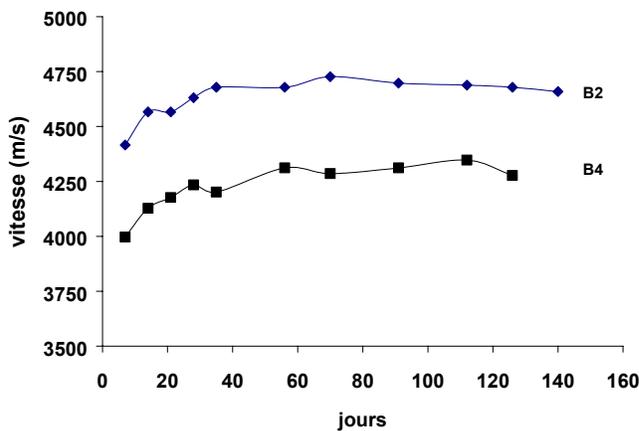


Figure 7: Mesure des vitesses des ondes de compression sur les éprouvettes réactives

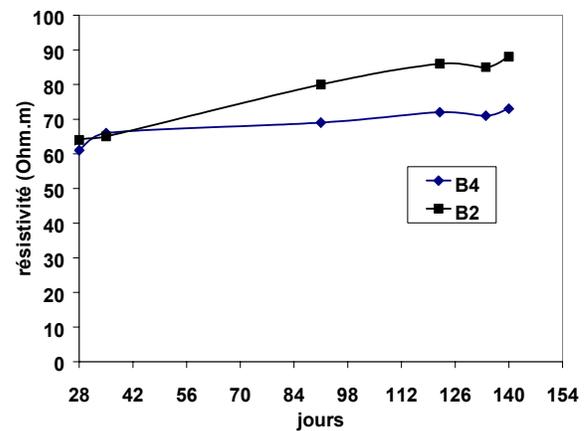


Figure 8: Variation de la résistivité électrique des dalles réactives

### 4.3 Mesures électriques

La figure 8 illustre les variations de résistivité électrique des dalles réactives. Une augmentation constante de la résistivité électrique est observée dans les deux dalles, quoique plus marquée dans le cas de la dalle la plus réactive (B2). Cette augmentation de résistivité est probablement attribuable à la formation de microfissures remplies de gel générée par la RAG. Des mesures additionnelles sont nécessaires pour valider cette hypothèse.

## 5. Discussion

La RAG engendre un réseau de microfissures prenant naissance à l'intérieur des particules de granulats et se propageant, la plupart du temps, dans la pâte de ciment environnante. Dans un contexte où le béton n'est pas armé et les contraintes ne sont pas fortement orientées, la distribution et l'orientation de la microfissuration sera plutôt aléatoire comme il est anticipé dans nos dalles. Cette caractéristique semblerait être le mieux définie par la mesure de l'atténuation de l'énergie spectrale des ondes. Amasaki et Takagi [1989] rapportent à ce sujet que les ondes de fréquence supérieure à 20 kHz sont fortement atténuées dans des échantillons atteints de RAG contrairement à des échantillons sains. L'énergie de la réponse de fréquence du spectre de l'onde ultrasonique semble être un bien meilleur indicateur de la détérioration causée par la RAG que la vitesse de ces ondes.

## 6. Conclusions

Les méthodes non destructives (acoustique et électrique) permettent, à jeune âge, de différencier les bétons selon leurs propriétés mécaniques. Les mesures acoustiques corréleront mieux le module d'élasticité tandis que les mesures électriques corréleront mieux la résistance à la compression.

Il est bien connu que le RAG engendre une réduction notable du module d'élasticité, sans pour autant affecter grandement la résistance à la compression. Nos données vont dans ce sens. Toutefois, la chute du module d'élasticité dans les bétons atteints de RAG ne semble pas avoir affecté, jusqu'à présent, la vitesse des ondes de compression et des ondes de surface. Les prochains travaux porteront sur le développement de filtres numériques permettant d'évaluer la perte d'énergie des ondes (i.e. l'atténuation) et ainsi mieux caractériser l'évolution de la RAG. Les mesures électriques se poursuivent également pour déterminer si la variation de résistivité corréle l'expansion des dalles. Finalement, des relevés radar sont également réalisés mais les données préliminaires ne permettent pas encore de corréler l'expansion des dalles.

## Remerciements

Cette étude est réalisée dans le cadre de la Chaire CRSNG-Industrie en auscultation des infrastructures en béton.

## Références

- Amasaki, S. et Takagi, N. (1989) "The Estimate for Deterioration Due to Alkali-silica Reaction by Ultrasonic Spectroscopy", *8<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Kyoto, Japon, juillet 1989, p. 839-844.
- GRAI (2003) "Rapport des travaux de la chaire CRSNG-Industrie en auscultation des infrastructures en béton", février 2003, 340 pages.
- Pleau, R., Bérubé, M-A., Pigeon, M., Fournier, B. and Raphaël, S. (1989) "Mechanical Behavior of Concrete Affected by ASR", *8<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Kyoto, Japon, juillet 1989, p. 721-726.