

# COUPLAGE DE MÉTHODES NON DESTRUCTIVES POUR L'ÉVALUATION DE L'ENDOMMAGEMENT DU BÉTON

Patrice Rivard<sup>1</sup>, Samuel Naar<sup>1,2</sup>, Mehdi Zoubir Sbartai<sup>1,3</sup>, Benoit Fournier<sup>4</sup>

- (1) *Chaire CRSNG industrielle sur l'auscultation des structures en béton, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, J1K 2R1*
- (2) *CDGA - Université Bordeaux 1, av. des facultés, 33405 Talence cedex, France*
- (3) *LMDC- INSA-UPS Toulouse, Rangueil, 31077 France*
- (4) *International Center for Sustainable Development of Cement and Concrete (ICON) CANMET, Natural Resources Canada, Ottawa, K1A 0G1*

## RÉSUMÉ :

L'étude porte sur l'utilisation de quatre méthodes non destructives (l'impact-écho, la thermographie infrarouge passive, la mesure de résistivité électrique et le radar) pour évaluer l'endommagement de spécimens de béton atteints de réaction alcalis-granulats. Les mesures ont été réalisées sur des blocs et des dalles contenant des granulats de réactivité variable et des teneurs variables en alcalis, ce qui a engendré des niveaux de gonflement différents. Puisque les spécimens sont conservés à l'extérieur, d'autres processus de dégradation, comme les cycles de gel et de dégel, se sont manifestés et les mesures en tiennent donc compte. Des quatre méthodes testées, le radar semble la plus prometteuse. Une bonne corrélation a été observée entre la décroissance de l'amplitude et le niveau d'expansion des dalles. Les premiers résultats obtenus sont encourageants, mais demandent encore à être généralisés.

## 1. INTRODUCTION

Les programmes d'entretien et de réparation des ouvrages en béton reposent sur la justesse du diagnostic de la ou des causes des problèmes de dégradation, sur la connaissance précise des zones affectées et sur l'évaluation de l'endommagement. Dans le cas de la réaction alcalis-granulats (RAG), il est reconnu que le degré d'endommagement interne du béton est relié au niveau d'expansion global. Mais dans certains cas, la mesure de ces deux paramètres peut être difficile à obtenir et le prélèvement d'échantillons peut s'avérer impossible (structure fortement armée, accessibilité réduite pour la carotteuse...). L'utilisation de méthodes d'Évaluation Non Destructives (END) apparaît alors adaptée, même si les résultats obtenus par le passé n'ont pas toujours été probants.

Aujourd'hui, on ne dispose pas encore de procédures fiables faisant appel à des techniques END pour la caractérisation et l'évaluation des dommages associés à la RAG. Par conséquent, très peu de structures ont fait l'objet d'un suivi par méthodes END et la recherche en laboratoire s'est principalement limitée aux méthodes de mesures de vitesse ultrasonique par ondes de compression [1–9].

Cet article présente une étude sur l'utilisation de quatre méthodes END, soit l'impact-écho, la thermographie infrarouge passive, la mesure de résistivité électrique et le radar, pour l'évaluation de l'expansion du béton liée à la RAG. Ces méthodes ont été mises en oeuvre sur des blocs et dalles de béton contenant des granulats de différentes réactivités et ayant été conservés à l'extérieur depuis une dizaine d'années [10].

## 2. SITE EXPÉRIMENTAL

En 1991, CANMET a mis sur pied un programme de recherche visant à évaluer l'efficacité des ajouts minéraux pour inhiber la réaction alcalis-granulats. À ces fins, plusieurs mélanges de béton contenant divers types de granulats et différentes teneurs en alcalis ont été conçus. Des blocs de  $40 \times 40 \times 70 \text{ cm}^3$  et des dalles de  $70 \times 70 \times 15 \text{ cm}^3$  ont été fabriqués à partir de ces mélanges et ont été conservés à l'extérieur sur un site à Bell's Corner dans la région d'Ottawa (Fig. 1).

Huit mélanges ont fait l'objet de cette étude et leur composition est indiquée au tableau 1. Il est à noter que les seuls paramètres qui varient de façon significative sont le type de granulats et la teneur en alcalis (qui est fonction ici du type de ciment utilisé et de l'ajout de granulats de NaOH dans l'eau de gâchage du béton). Des plots métalliques ont été fixés sur les blocs et les dalles afin de prendre des mesures d'expansion au cours du temps. Dans le cas de blocs, les mesures ont été prises à la fois sur la surface du bloc et sur les côtés, alors que seules des mesures de surface ont été prises dans le cas des dalles. Les niveaux d'expansion des différents mélanges étudiés sont présentés au tableau 2.



Figure 1. Site expérimental de Bell's Corner

Tableau 1. Composition des mélanges de béton

	M1	M2	M3	M70	M63	M111	M115	M116
Granulats	Springhill	Springhill	Springhill	Grès de Potsdam	Grès de Potsdam	Gravier du N-M	Granite	Granite
Ciment	BTA	Type 10	Type 10	BTA	Type 10	Type 10	BTA	Type 10
E/C	0,42	0,42	0,42	0,40	0,40	0,40	0,41	0,41
Dosage en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	423	423	425	425	431	431	429	431
Dosage en granulats (kg/m <sup>3</sup> )	1021	1021	1026	995	1007	1028	1035	1042
Dosage en sable (kg/m <sup>3</sup> )	683	683	686	664	672	685	690	695
Na <sub>2</sub> O <sub>éq</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1,69	3,81	5,31	1,70	5,38	3,88	1,72	5,39
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2303	2303	2317	2253	2281	2317	2331	2345

Tableau 2. Niveaux d'expansion mesurés sur les blocs et les dalles

	M1	M2	M3	M70	M63	M111	M115	M116
Blocs								
Côté (%)	0,020	0,283	0,340	0	0,052	0,444	0,012	0,013
Surface (%)	0,030	0,465	0,425	0	0,122	0,524	0,019	0,025
Moyenne (%)	0,025	0,374	0,383	0	0,087	0,484	0,016	0,019
Dalles (%)	0	0,390	0,478	0	0,176	0,526	0,012	0,039

### 3. RÉSULTATS DES DIFFÉRENTES MÉTHODES

#### 3.1. L'impact-écho

##### a. La méthode

La méthode de l'impact-écho consiste à percuter la masse de béton à l'aide d'une bille normalisée et à enregistrer sur un capteur piézoélectrique (receveur) les signaux générés par l'impact afin de déterminer la vitesse des ondes de compression (ondes  $P$ ) traversant le matériau. L'équation suivante permet de calculer la vitesse des ondes  $P$  à partir de la première arrivée de l'onde et de la fréquence au pic :

$$C_p = 2X \cdot f_p$$

Avec  $C_p$  la vitesse des ondes (en  $\text{m.s}^{-1}$ ),  $X$  la distance de parcours entre le générateur d'impact et le receveur (en m) et  $f_p$  est la fréquence de résonance de l'onde  $P$  dans le solide (en Hz).

##### b. Mise en œuvre sur le site

Seuls les blocs ont fait l'objet de mesure, les dalles étant jugées trop minces pour cette application. Les mesures sur site ont été réalisées sur trois faces des blocs. Une gelée lubrifiante à base d'eau a été utilisée comme agent couplant entre la surface de béton et le receveur piézoélectrique.

##### c. Résultats et discussion

Les vitesses mesurées pour chacun des blocs sont présentées au tableau 3. Les mesures de vitesses, à l'exception du mélange M1, ne montrent pas de grandes variations. En effet, une différence de  $90 \text{ m.s}^{-1}$  a été mesurée entre le bloc présentant la plus forte expansion (M111) et celui présentant la plus faible (M115). Une certaine tendance de réduction des vitesses en fonction du niveau d'expansion peut être observée (Fig. 2).

Tableau 3. Vitesses des ondes de compression mesurées à l'aide de la méthode impact-écho.

Mélange	M1	M2	M3	M70	M63	M111	M115	M116
Surface ( $\text{m.s}^{-1}$ )	4873	4503	4440	4459	4489	4447	4526	4533
Face 1 ( $\text{m.s}^{-1}$ )	4962	4570	4295	4654	4367	4418	4549	4562
Face 2 ( $\text{m.s}^{-1}$ )	4953	4473	4445	4654	4525	4599	4669	4572
<b>V moy (<math>\text{m.s}^{-1}</math>)</b>	<b>4909</b>	<b>4513</b>	<b>4402</b>	<b>4566</b>	<b>4466</b>	<b>4481</b>	<b>4571</b>	<b>4552</b>
CV (%)	1,8	3,8	3,6	2,9	2,6	2,8	3,9	1,8

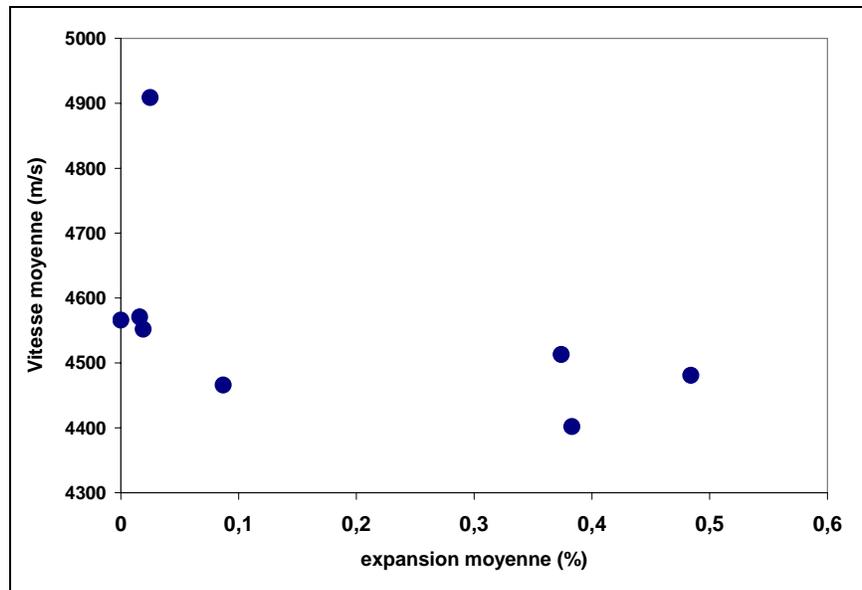


Figure 2. Vitesses moyennes en fonction du niveau moyen d'expansion

Les vitesses des ondes de compression semblent donc peu sensibles à la fissuration générée par la réaction alcalis-granulats. La RAG génère en effet un réseau de microfissures prenant naissance dans les granulats et se propageant dans la pâte de ciment. Ces fissures sont en outre relativement fines (quelques millimètres d'ouverture) et leur orientation est probablement fortement isotrope puisque les cubes de béton à l'étude ne contiennent pas d'armature. Ces caractéristiques semblent être mieux représentées par l'atténuation de l'énergie des ondes que par leur simple vitesse [7]. Ainsi, lorsqu'une onde sonore voyage dans l'air ou dans un liquide (dans une fissure ou un vide), sa vitesse décroît car les ondes  $P$  se propagent à environ  $340 \text{ m.s}^{-1}$  dans l'air et à environ  $1500 \text{ m.s}^{-1}$  dans l'eau. Cependant, la distance totale dans l'air ou l'eau peut être considérée comme très faible, voire pratiquement négligeable, comparativement à la distance parcourue dans le matériau solide.

L'analyse spectrale des ondes (dans le domaine fréquentiel et non temporel) semble donc plus appropriée pour la qualification et la quantification de l'endommagement du béton car les ondes sonores, particulièrement celles de hautes fréquences (courtes longueurs d'onde) perdent une partie importante de leur énergie par diffusion et réflexion sur un nombre grandissant d'interfaces (fissures, gel...).

### 3.2. Thermographie infrarouge

#### a. La méthode

Technique nouvelle en génie civil, la méthode d'auscultation par thermographie infrarouge semble constituer une des techniques END les plus attractives. En effet, les mesures sont réalisées de façon rapide, sans contact, avec une durée de mise en œuvre réduite. Généralement, l'appareillage est de faible encombrement et d'une grande maniabilité [11], ce qui facilite son application sur site. De plus, la caméra infrarouge présente l'avantage de proposer une image thermique instantanée de la surface. Un prétraitement des images thermiques, très rapide, peut donc se faire en direct, mais demande néanmoins un regard expert.

Tout matériau absorbe et émet de l'énergie appelée rayonnement thermique dans la gamme spectrale des infrarouges (longueur d'onde de l'infrarouge moyen  $\lambda = 2$  à  $12\mu\text{m}$ ) proportionnelle à sa température de surface [12]. La caméra infrarouge mesure ce rayonnement lié à la luminance de la surface de la scène. L'équation radiométrique [13] permet ensuite le passage de la luminance à la température de surface de la zone d'étude. La caméra, qui reçoit le rayonnement composé de trois parties (émis par l'objet, réfléchi par l'objet et émis par l'atmosphère entre l'objet et le détecteur), calcule et affiche cette température (Fig. 3).

L'influence de la température de l'environnement et les hypothèses faites sur l'homogénéité de l'objet (température et émissivité  $\varepsilon_0$  considérées constantes dans l'espace et dans le temps) rend l'exploitation des valeurs numériques de température très délicate. Toutefois, dans le but d'une démarche quantitative, l'analyse de comportements différentiels ou de contrastes de température est envisageable.

### b. Mise en œuvre sur le site

L'auscultation a été effectuée à l'aide d'une caméra infrarouge ThermaCam PM 575, FLIR Systems. Les images thermiques ont été prises à une hauteur de 1,50m de la surface auscultée. À cette distance de la cible et avec une ouverture standard de l'objectif de la caméra, la dimension des images est de 0,65 x 0,50m. La valeur du coefficient d'émissivité du béton utilisée pour les mesures ( $\varepsilon = 0,94$ ) est celle communément rencontrée dans la littérature [14]. Ceci permet d'avoir, en lecture, des images thermiques, une température apparente de surface proche de la température vraie avec une précision de  $\pm 2\%$  et une résolution de  $0,2^\circ\text{C}$ . Deux images ont été nécessaires pour couvrir toute la surface du bloc.

Trois séries de mesures ont été réalisées au cours de la journée sur les surfaces supérieures des blocs M1, M2, M3, M111, M115 et M116 : à 9h30, 12h30 et 16h00. Le comportement thermique du béton a alors été suivi au cours de la journée, c'est-à-dire l'évolution de la température de surface en fonction de l'ensoleillement. Ainsi, sur chaque image thermique, est calculée la moyenne de la température sur l'ensemble de la surface auscultée.

### c. Résultats et discussion

L'objectif des mesures par thermographie infrarouge est d'estimer la sensibilité de la méthode vis-à-vis de l'endommagement par la RAG. La forte présence d'eau dans le béton, la formation de micro et macro fissures et la présence de gel sont autant de facteurs susceptibles de modifier la diffusivité thermique du béton. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 4.

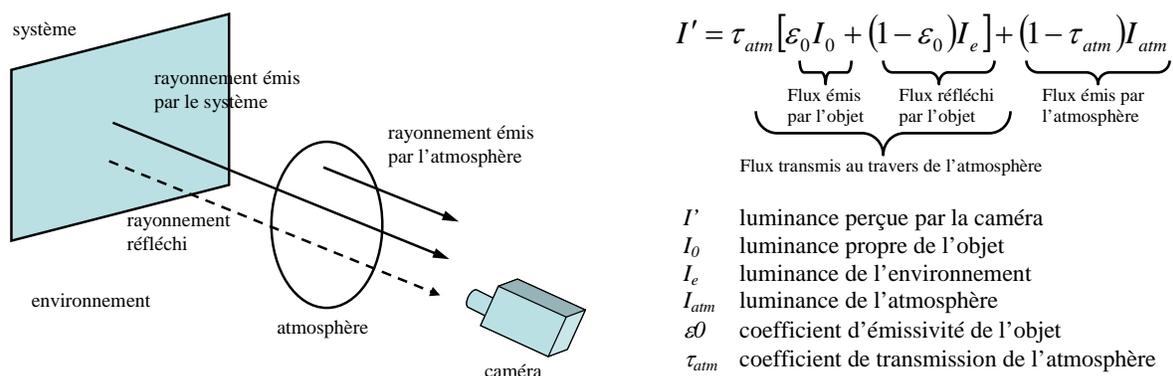


Figure 3. Composition du rayonnement reçu par la caméra infrarouge et équation radiométrique

Tableau 4. Résultats des mesures par thermographie infrarouge.

	Air ambiant	M1	M2	M3	M111	M115	M116
T (°C) 9h30	21,4	26,3	25,5	25,2	20,7*	24,9	25,0
T (°C) 12h30	32,3	32,7	31,7	33,0	31,3	31,7	32,7
T (°C) 16h00	33,3	33,7	33,1	33,0	33,0	33,6	34,0
Variation (°C)	11,9	7,4	7,6	7,8	12,3	8,7	9,0

\* la surface du bloc est à l'ombre d'un arbre.

Lors de ces trois différentes séances de mesures, les seules anomalies thermiques détectées sont le patron de fissuration, nettement visible sur les images thermiques (Fig. 4).

Dans l'étude présentée ici, un béton atteint par la RAG ne semble pas avoir un comportement thermique différent d'un béton sain. De plus, il apparaît difficile de classer les différents mélanges au regard de leur comportement thermique. Au vu des résultats présentés dans le tableau 4 et à ce stade de la recherche, il est difficile de tirer des conclusions convaincantes quant à l'utilisation de cette technique vis-à-vis de l'endommagement par la RAG. D'autres traitements des données thermiques sont en cours, notamment l'étude, par traitement d'image, du patron de fissuration.

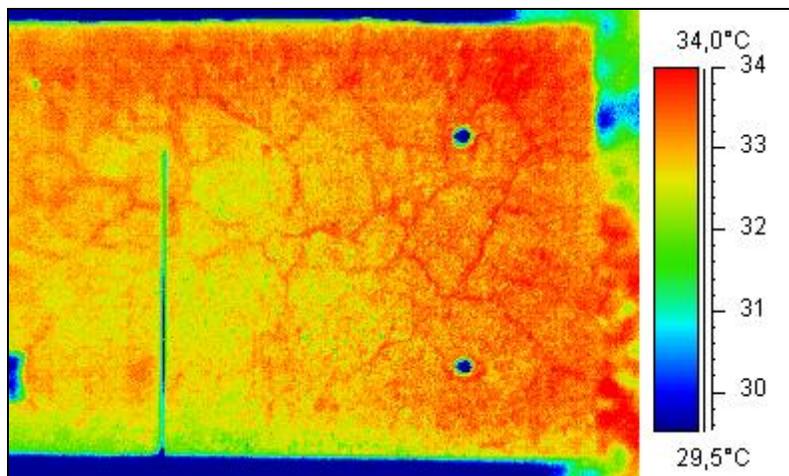


Figure 4. Image thermique de la surface du bloc M111

### 3.3. Résistivité électrique

#### a. La méthode

Parmi les nombreuses familles de techniques d'auscultation, la mesure de la résistivité électrique apparaît adaptée au suivi de l'état d'endommagement du béton. Elle est utilisée notamment pour localiser des zones présentant une probabilité de corrosion des barres d'armatures [15], mais aussi pour caractériser la fissuration dans le béton [16].

La méthode de mesure par résistivité électrique consiste en une auscultation du béton à partir de la surface. Pour cela, le Centre de Développement en Géosciences Appliquées de l'Université Bordeaux 1 [15] a développé un dispositif carré comportant quatre électrodes (Fig. 5). Deux électrodes permettent d'injecter une intensité de courant connue  $I$ . Puis, la différence de potentiel

$\Delta V$  créée par le passage du courant dans le béton est mesurée par les deux autres électrodes. La résistivité électrique est ensuite proportionnelle à un facteur géométrique  $k$  qui dépend de la géométrie et des dimensions du dispositif.

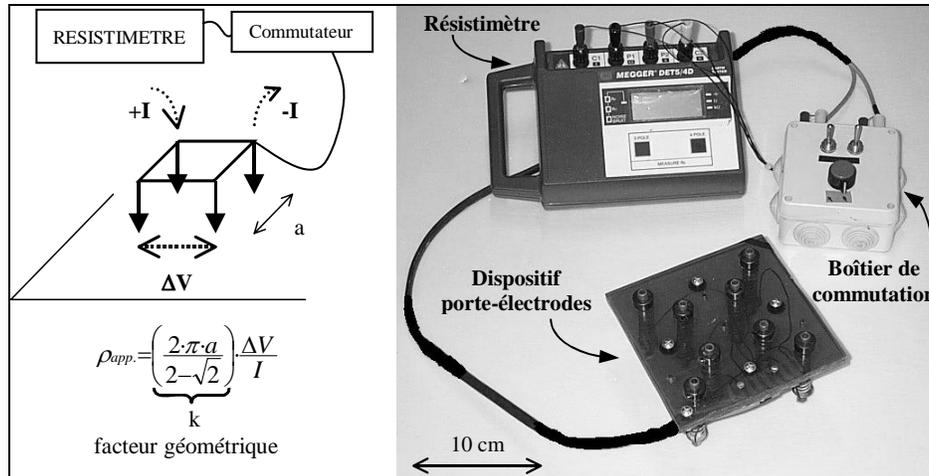


Figure 5. Principe de la mesure électrique par un dispositif carré

Le dispositif utilisé est un quadripôle carré de 5cm de côté. En première approximation, la profondeur d'investigation correspond à l'écartement des électrodes. Équipé d'un commutateur, deux directions d'injection du courant sont possibles pour chaque mise en place du dispositif porte-électrodes. Cela permet d'étudier l'anisotropie du matériau (exprimée en logarithme de l'anisotropie).

### b. Mise en œuvre sur le site

Cinq points de mesure ont été réalisés sur chaque face latérale des blocs M1, M2, M3, M111, M115 et M116, en utilisant le dispositif avec les deux orientations d'injection du courant. La moyenne (sur 20 mesures) de la résistivité électrique de chaque bloc a été calculée, en prenant soin d'éliminer, par traitement statistique, quelques mesures aberrantes. Associé à cette valeur, le coefficient de variation de la résistivité électrique, qui est le rapport de l'écart type sur la moyenne, a aussi été calculé.

D'autre part, la moyenne de la valeur absolue de l'anisotropie électrique, définie elle-même par le logarithme décimal des rapports des résistivités obtenues avec les deux configurations du dispositif de mesure, a été calculée. De la même façon que précédemment, un coefficient de variation de l'anisotropie peut être déterminé.

### c. Résultats et discussion

L'objectif des mesures de résistivité électrique est d'estimer la sensibilité de la méthode vis-à-vis de l'endommagement par la RAG. La forte présence d'eau dans le béton, la formation de micro et macro fissures et la présence de gel sont autant de facteurs auxquels la méthode doit être sensible. Les résultats sont donnés dans le tableau 5. La figure 6 illustre la relation entre les valeurs de résistivité électrique et de l'anisotropie en fonction du niveau d'expansion des blocs.

Tableau 5. Résultats des mesures électriques

	M115	M116	M1	M2	M3	M111
$\rho_{\text{moy}} (\Omega.m)$	33,3	29,0	39,1	26,1	31,2	24,1
CV	30%	21%	20%	37%	40%	39%
Anisotropie	0,16	0,11	0,20	0,20	0,24	0,27
CV	78%	59%	46%	112%	79%	73%

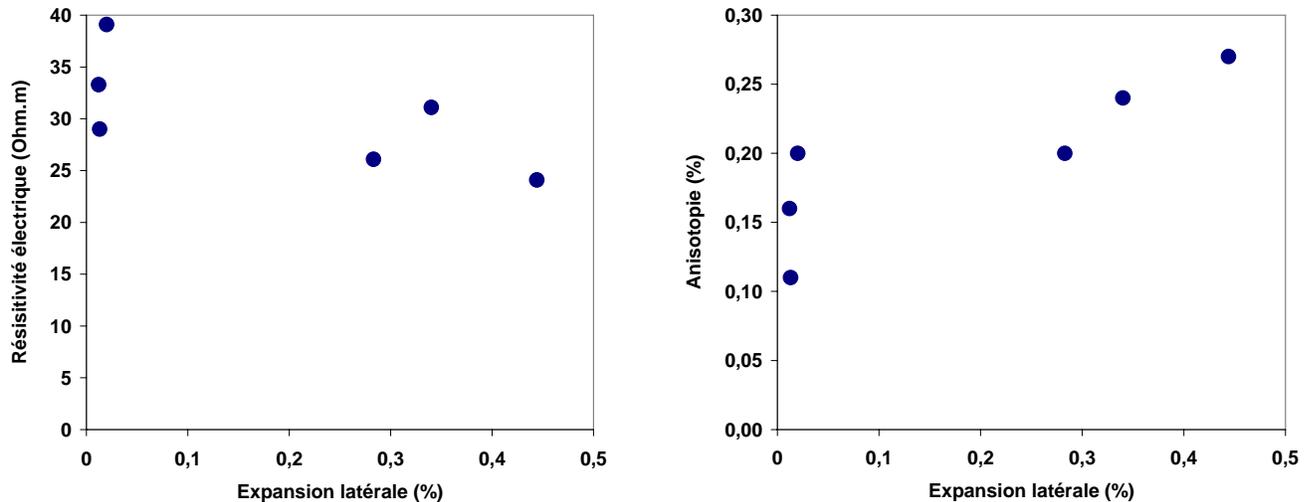


Figure 6. Valeurs de a) la résistivité électrique et b) de l'anisotropie en fonction de l'expansion latérale des blocs

Ni la valeur moyenne résistivité électrique (1<sup>re</sup> ligne du tableau 5), ni le coefficient de variation des mesures (2<sup>e</sup> ligne du tableau 5) ne semblent être des critères de classification des différents mélanges. La moyenne de l'anisotropie (3<sup>e</sup> ligne du tableau 5) permet, quant à elle, de classer les différents mélanges selon leur taux d'expansion : les mélanges non réactifs M115 et M116 ont les plus faibles valeurs d'anisotropie, alors que le mélange M111 a la plus forte valeur. Plus la réaction est avancée, plus l'expansion est grande, plus il y a de fissures à la surface du bloc: en termes de propriétés électriques, cela se traduit par une plus grande anisotropie du matériau.

### 3.4. La technologie radar

#### a. La méthode

Le RADAR (**R**adio **D**etecting **A**nd **R**anging) est une application de l'électromagnétisme. Le système émet de l'énergie électromagnétique (EM) qui se propage dans le milieu et se réfléchit sur des interfaces présentant un contraste de propriétés EM. L'analyse du signal enregistré (vitesse et atténuation) peut donner des informations pertinentes comme la position de la cible ou les caractéristiques EM du milieu de propagation. De plus, le radar présente de nombreux avantages. En effet, la technique est simple d'utilisation, rapide, permet l'auscultation de grandes surfaces et

ne nécessite pas l'interruption de la circulation du trafic routier. En outre, le système de mesure est portable, léger et peu encombrant.

La sensibilité des ondes radar à l'état d'humidité des matériaux (ex : sol, béton) a été rapportée par des nombreux auteurs [17–20]. L'augmentation de la teneur en eau du béton conduit à une forte variation des paramètres du signal radar. Cela est généralement dû à l'augmentation de la permittivité et la conductivité du béton. Ainsi la présence d'eau et/ou des fissures remplies d'eau (signes caractéristiques de la RAG) peut affecter le comportement du signal radar.

### **b. Mise en œuvre sur le site**

Le système radar utilisé pour la réalisation des essais est un SIR-20 équipé d'une antenne couplée au matériau GSSI 5100, de fréquence centrale égale à 1,5 GHz. Cette antenne à très haute fréquence est limitée à des profondeurs de pénétration entre 20 et 40 cm. Étant donné les dimensions importantes des blocs, seules les dalles ont été testées. Deux profils radar ont été réalisés sur la surface supérieure des dalles M115, M111, M1, M2 et M3 ayant atteint des niveaux d'expansion différents.

Le traitement des données a été focalisé sur le signal réfléchi et consistait à appliquer un filtre passe-bande entre 500 et 3000 MHz de façon à limiter le bruit et les signaux indésirables. L'amplitude et le temps de parcours du premier pic du signal ont ensuite été extraits. Connaissant l'épaisseur des dalles et donc la distance parcourue par l'onde radar, la vitesse a été calculée par référence à la position temporelle du premier pic du signal réfléchi par le fond des dalles.

### **c. Résultats et discussion**

Le tableau 5 présente les moyennes des expansions des dalles testées ainsi que les vitesses et amplitudes mesurées. On observe une faible variation de la vitesse de propagation indiquant que ce paramètre n'est pas significativement influencé par l'endommagement causé par la RAG. Par contre, l'amplitude semble être sensible à cette pathologie et permet de classer les dalles en deux groupes. Le premier comprend les dalles M115 et M1 qui n'ont pratiquement pas subi d'expansion et où une forte amplitude des signaux a été enregistrée. Les dalles M2, M3 et M111 forment le deuxième groupe de dalles présentant une forte expansion du béton avec une faible amplitude de l'onde réfléchie. On note une variation de l'ordre de 75% entre l'amplitude mesurée sur un béton sain (M115, M1) et celle enregistrée sur la dalle la plus atteinte par la RAG (M111). La relation de décroissance de l'amplitude de l'onde radar en fonction du niveau d'expansion des dalles est illustrée à la figure 7.

L'évolution de la RAG engendre de la microfissuration et donc une augmentation de la porosité ainsi que la teneur en eau du béton. Cette dernière diminue l'amplitude du signal radar dû à l'augmentation de l'atténuation par adsorption (polarisation diélectrique et conduction électrique) et par divergence du lobe de rayonnement de l'antenne (atténuation géométrique). L'atténuation par diffusion (diffraction du rayonnement sur les hétérogénéités de dimensions comparables à la longueur d'onde) peut aussi intervenir dans ce cas dû à la présence de fissures et donc une augmentation de l'hétérogénéité du matériau. Tous ces phénomènes expliquent donc l'effet de l'endommagement causé par la RAG sur l'atténuation de l'amplitude du signal radar.

Tableau 5. Résultats des mesures radar sur les dalles

	M115	M1	M2	M3	M111
Expansion (%)	0.012	0.000	0.390	0.478	0.526
Vitesse (cm/ns)	8.00	8.42	8.11	8.01	7.45
Amplitude	<b>1076</b>	968	450	330	<b>245</b>

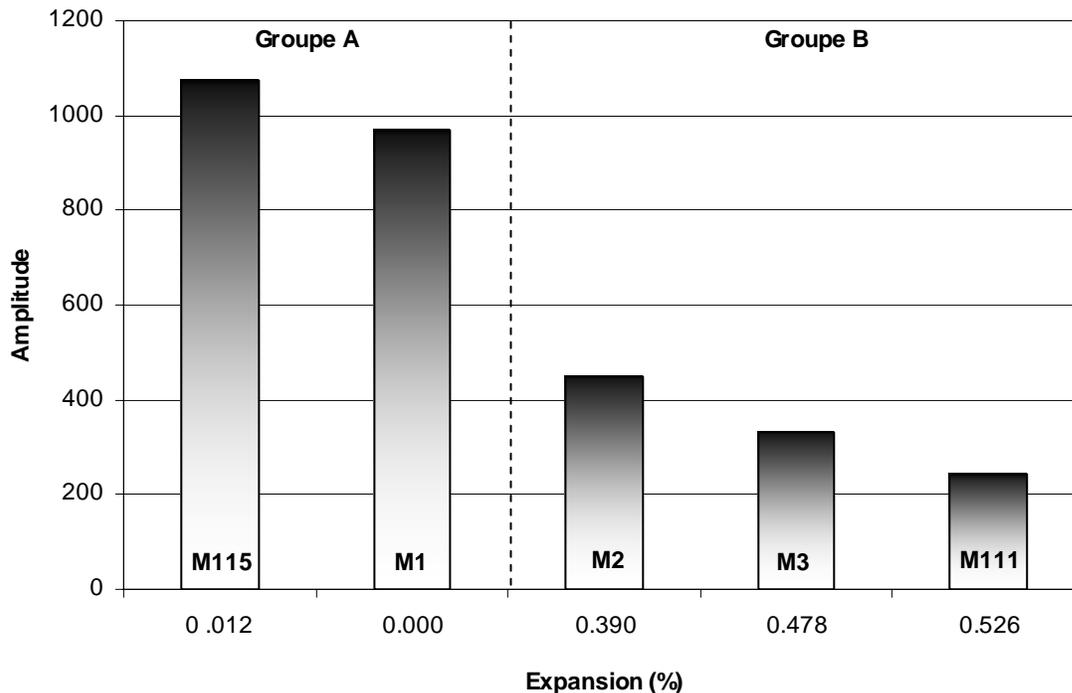


Figure 7. Relation entre l'amplitude de l'onde radar et le niveau d'expansion des dalles

#### 4. CONCLUSIONS

Des quatre méthodes testées, le radar semble la plus prometteuse pour l'évaluation de l'expansion liée à la RAG. Il sera néanmoins difficile d'établir une corrélation universelle entre les niveaux d'expansion des différents blocs. En effet, ces blocs n'étant pas identiques, certaines propriétés varient d'un mélange à l'autre. Par exemple, le type de granulats (en fonction de sa porosité propre ou de sa minéralogie) peut avoir une influence non négligeable sur la conductivité électrique du béton. La chimie de la solution interstitielle peut aussi influencer les mesures électriques. En outre, on sait que pour un même niveau d'expansion, l'endommagement du béton peut être différent selon le type de granulat qu'il contient.

Néanmoins, l'application en chantier de telles méthodes pourra nous renseigner sur la qualité du béton dans le cas où les structures présenteraient une certaine hétérogénéité dans le mélange. Les variations obtenues lors des relevés pourront ainsi être mieux corrélées avec le degré d'endommagement du béton.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées à partir de cette étude préliminaire :

- Impact-écho : La vitesse des ondes de compression est peu affectée par l'expansion du béton et son degré d'endommagement. Il sera préférable de travailler dans le domaine fréquentiel (plutôt que temporel) afin de tirer profit du maximum d'information contenue dans les ondes;
- Thermographie infrarouge : Les propriétés thermiques du béton semblent peu affectées par son expansion et par son degré d'endommagement. Les images thermiques permettent néanmoins de faire ressortir les patrons de fissuration de surface, ce qui pourra trouver une application dans l'évaluation des structures endommagées par la RAG ;
- Résistivité électrique : Les propriétés électriques du béton semblent être sensibles au degré d'endommagement du béton, notamment au niveau de l'anisotropie des mesures. Ces propriétés sont toutefois influencées par d'autres facteurs (conductivité de la solution interstitielle liée à la présence d'alcalins dissous, conductivité des granulats, etc.), ce qui complique l'interprétation des résultats;
- Radar : La vitesse de propagation de l'onde réfléchiée par le fond des dalles testées varie peu en fonction du degré d'endommagement causé par la RAG. Néanmoins, l'amplitude a permis de classer les dalles selon leur expansion. Cependant, cette partie du signal radar nécessite la présence d'un réflecteur (armatures, interface) dans la structure. Cela limite donc les investigations à des structures en béton très ferrailé. Par contre, la partie du signal qui se propage directement de l'émetteur vers le récepteur existe sans la présence d'aucun réflecteur et sa sensibilité à l'humidité du béton a déjà été démontrée. Le traitement futur consistera donc à se focaliser sur ce signal pour envisager l'auscultation des structures à faible ferrailage comme les ouvrages hydrauliques.

## REMERCIEMENTS

L'aide financière a été assurée par la Chaire CRSNG industrielle sur l'auscultation des structures en béton et par le Fonds Québécois de Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT). La participation de M. Alexandre Mihalache à cette étude est également soulignée.

## REFERENCES

- [1] Swamy, R.N. and Al-Asali, M.M. (1988). Engineering Properties of concrete affected by alkali-silica reaction. *ACI Materials Journal*, **85** (5), p.367-374.
- [2] Amasaki, S., and Takagi, N. (1989). The estimate for deterioration due to alkali-silica reaction by ultrasonic spectroscopy. Proc. de la 8<sup>e</sup> CIRAG, Kyoto (Japon), p.839-844.
- [3] Gallias, J.L. (2000). Comparison of Damaging criteria for testing aggregates by autoclaving treatment. Proc. de la 11<sup>e</sup> CIRAG, Québec (Canada), p.949-958.
- [4] Kojima, T., Hayashi, H., Kawamura, M., Kuzume, K. (2000). Maintenance of highway affected by AAR. Proc. de la 11<sup>e</sup> CIRAG, Québec (Canada), p.1159-1166.
- [5] Ono, K. and Taguchi, M. (2000). Long-term behavior of AAR bridge pier and the internal deterioration. Proc. de la 11<sup>e</sup> CIRAG, Québec (Canada), p.1167-1174.
- [6] Monette, L.J., Gardner, N.J., Grattan-Bellew, P.E. (2002). Residual strength of reinforced concrete beams damaged by alkali-silica reaction - Examination of Damage Rating Index method. *ACI Materials Journal*, **99** (1), p.42-50.

- [7] Saint-Pierre, F., Rivard, P. Sauriol, B., Ballivy, G. (2004). Étude de l'évolution de la réaction alcalis-silice par méthodes ultrasoniques, 11<sup>e</sup> Colloque sur la progression de la recherche québécoise portant sur les ouvrages d'art, Université Laval, Québec.
- [8] Hobbs, D.W. (1986). Some tests on fourteen year old concrete affected by the alkali-silica reaction. Proc. de la 7<sup>e</sup> CIRAG, Ottawa (Canada), p.342-346.
- [9] Pleau, R., Bérubé, M-A., Pigeon, M., Fournier, B., Raphaël, S. (1989). Mechanical Behaviour of concrete affected by ASR. Proc. de la 8<sup>e</sup> CIRAG, Kyoto (Japon), p.721-726.
- [10] Fournier, B., Nkinamubanzi, P.C., Chevrier, R. (2004). Comparative field and laboratory investigations of the use of supplementary cementing materials to control ASR in concrete, Proc. de la 12<sup>e</sup> ICAAR, Beijing (Chine), p.528-537.
- [11] Clark, M., Mc Cann, D., Forde, M. (2003). Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges, *NDT&E International*, **36** (4), p.265-275.
- [12] Gaussorgues, G. (1999). La thermographie infrarouge : principes - techniques – applications, Quatrième édition revue et argumentée, ISBN : 2-7430-0290-5, Technique et Documentation, Lavoisier – Paris, 587 p.
- [13] Sirieix C., Defer D., Antzack E. (2005) Chapitre B.5 : Méthodes END thermiques – Thermographie infrarouge, dans BREYSSSE D., ABRAHAM O., Méthodologie d'évaluation non destructive des ouvrages en béton armé, Presses ENPC (sous presse, printemps 2005).
- [14] Avdelidis, N.P., Moropoulou, A. (2004). Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures, *Journal of Cultural Heritage*, **5** (1), p.119-127.
- [15] Polder, R. (2000). RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion – Test methods for on site measurement of resistivity of concrete, *Materials and Structures*, **33**, p.603-611.
- [16] Lataste J.-F. (2002). Évaluation Non Destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton armé par mesures de résistivités électriques, Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 295 pages.
- [17] Greaves, R.J., Lesmes, D.P, Lee, J.M, Toksöz. N. (1996). Velocity variations and water content estimated from multi-offset, ground-penetrating radar, *Geophysics*, **61** (3), p.683-695.
- [18] Laurens, S., Balayssac. J.-P., Rhazi, J., Arliguie, G. (2002). Influence of concrete moisture upon radar waveform, *RILEM Mater Struct*, **35**, (248), p. 198-203.
- [19] Sbartaï, Z.M., Klysz, G., Laurens, S., Balayssac, J-P., Ballivy, G., Arliguie, G. (2004). Aptitude de l'onde directe radar à la détection des gradients d'humidité dans le béton: Essais en laboratoire et étude de cas, INFRA 2004, 15-17 Nov 2004, Montréal.
- [20] Klysz, G, Balayssac, J.-P, Laurens, S. (2005). Spectral analysis of radar surface waves for non-destructive evaluation of cover concrete, *NDT&E International*, article sous presse.