

# **Évaluation de l'état des ponts autoroutiers par méthode RADAR : corrélation entre les méthodes de traitements qualitatives et normalisées**

François Saint-Pierre, ing. Ph.D,  
Ghislain Houde, ing., Marc-André Carrier, Stag., Alain Philibert, ing. Ph.D.,

Le Groupe S.M. International inc.  
740, rue Galt Ouest  
Sherbrooke (Québec) Canada, J1H 1Z3  
[fspierre@groupesm.com](mailto:fspierre@groupesm.com)

## **RÉSUMÉ**

Les ponts autoroutiers datant du milieu du siècle dernier ont fait l'objet de multiples travaux de réparation plus ou moins temporaires, à mesure que des dégradations apparaissaient. De nos jours, les gestionnaires d'ouvrage souhaitent augmenter la pérennité de leurs structures en réalisant des travaux de réhabilitation d'envergure. Dans ce contexte, une évaluation de l'état des ponts par méthodes non destructives s'impose car elle permet de localiser, à l'intérieur des ouvrages en béton, les désordres qui se sont développés progressivement au fil des années et qui sont souvent cachés sous de multiples couches de revêtement.

Le pont autoroutier que nous allons présenter a fait l'objet de relevés RADAR et de mesures de potentiel de corrosion. Ces relevés ont été réalisés selon les normes D6087-08 et C876-09 récemment mises à jour. Ces deux normes permettent principalement de caractériser les dégradations causées par la corrosion des armatures.

Pour améliorer l'interprétation des résultats, nous avons aussi effectué, directement à partir des sections RADAR, un traitement complémentaire des données basé sur le recensement des désordres qui ne peuvent pas être détectés habituellement par les méthodes de traitement normalisées.

Dans le cas du pont étudié, cette approche a permis de localiser des zones du tablier sans armature ou avec des armatures mal positionnées ou encore, de percevoir la présence d'un horizon de gravier de quelques centimètres d'épaisseur entre le dessus de la dalle de béton et la couche de roulement.

## **1. INTRODUCTION**

Le gouvernement québécois agit depuis plusieurs années contre le vieillissement des ponts et des viaducs. Depuis 2007, des actions ont pu être entreprises, grâce au plan de redressement de l'état du réseau québécois [1].

Ces quatre dernières années, les sommes investies pour la « conservation des structures » ont presque triplé. Le budget alloué à cette activité était de 440 000 \$ en 2007-2008 et passera à 1 185 000 \$ en 2010-2011 [2]. C'est dans le cadre de ces investissements que des méthodes non destructives sont de plus en plus employées pour évaluer l'état des tabliers des ponts autoroutiers.

Dans les paragraphes suivants, nous présentons les travaux d'investigation non destructive effectués sur le tablier du viaduc autoroutier de la promenade Leamy à Gatineau. Les investigations sont basées sur les méthodes RADAR et électriques. Les relevés de terrain et le traitement des données ont été réalisés conformément aux recommandations du ministère des Transports et aux normes ASTM D6087-08 et C876-09 [3 et 4].

Dans le cas de la méthode RADAR, les résultats obtenus sont sensibles aux facteurs environnementaux (température, humidité) et aux variations de certains paramètres de construction de l'ouvrage (mélange de béton, épaisseur de la couche de roulement, travaux de réparation, géométrie du tablier, etc.). Pour améliorer l'interprétation des résultats, nous avons effectué un traitement complémentaire des données basé sur un recensement des désordres observés visuellement sur les sections RADAR acquises lors des investigations de terrain.

Ce traitement complémentaire des données a aidé grandement à interpréter les résultats obtenus conformément à la norme ASTM C876-09[3].

## **2. DESCRIPTION DU VIADUC DE LA PROMENADE LEAMY**

Ce viaduc en béton armé a été construit en 1974 pour franchir la promenade Leamy (figure 1). Il appartient à l'autoroute 50 (autoroute de l'Outaouais) et se situe dans la ville de Gatineau, au Québec. Le tablier de ce pont est composé de seize poutres longitudinales reposant sur deux culées et une pile centrale. Cet ouvrage d'art mesure environ 76 m de longueur et possède une largeur totale de 62 m.



**Fig. 1 : Viaduc de la promenade Leamy à Gatineau**

Ce viaduc datant des années 70 est bien documenté. Un plan «tel que construit» nous donne la géométrie générale de l'ouvrage et nous informe sur la répartition des armatures. À la surface du tablier, les principaux défauts structuraux que l'on rencontre sont des fissures longitudinales dans l'asphalte et des réparations en béton bitumineux ou béton de ciment.

### 3. ESSAIS RÉALISÉS

Le tablier du viaduc, bien que n'ayant pas été imperméabilisé par une membrane, ne présente pas de dégradation majeure en surface. La méthode RADAR associée à la méthode du potentiel de corrosion et à quelques essais destructifs a été utilisée afin de vérifier que l'absence d'une membrane d'imperméabilisation n'a pas favorisé la pénétration des ions chlorure dans le béton et la corrosion des armatures.

#### 3.1 Mesure de probabilité de corrosion par méthode RADAR

Le « Ground Penetrating RADAR » est une méthode d'auscultation non destructive basée sur la propagation des ondes électromagnétiques dans le milieu. Elle permet de localiser les aciers d'armature, d'identifier les zones altérées ou fissurées près de la surface des ouvrages en béton ainsi que d'évaluer l'épaisseur d'une couche de béton [4]. La profondeur d'investigation de cette méthode varie entre 200 et 900 mm et dépend de la fréquence centrale de l'antenne ainsi que de la teneur en eau du béton. Dans le cadre de nos travaux, un appareil RADAR GSSI SIR-20 a été utilisé avec une antenne de fréquence 1,5 GHz.

Les profils RADAR obtenus, appelés « radargrammes », permettent de visualiser, le long du chemin parcouru par l'antenne, une coupe perpendiculaire à la surface auscultée. La figure 2 représente un radargramme le long du tablier du viaduc de la promenade Leamy. Dans ce radargramme, les formes apparaissant sous forme d'hyperboles correspondent à des armatures.

L'état de corrosion des armatures d'un tablier de pont peut être obtenu à partir du traitement des signaux des radargrammes décrits précédemment. Ce traitement consiste à mesurer l'amplitude de l'onde électromagnétique qui se réfléchit ou se diffracte sur différents éléments de la dalle de béton. Les amplitudes mesurées sont ensuite exprimées en *dB normalisé* par rapport à une valeur de référence dépendante de notre système de mesure.

Il existe plusieurs approches pour mesurer l'atténuation des ondes électromagnétiques qui se sont réfléchies ou diffractées sur les éléments constituant la dalle du tablier du pont :

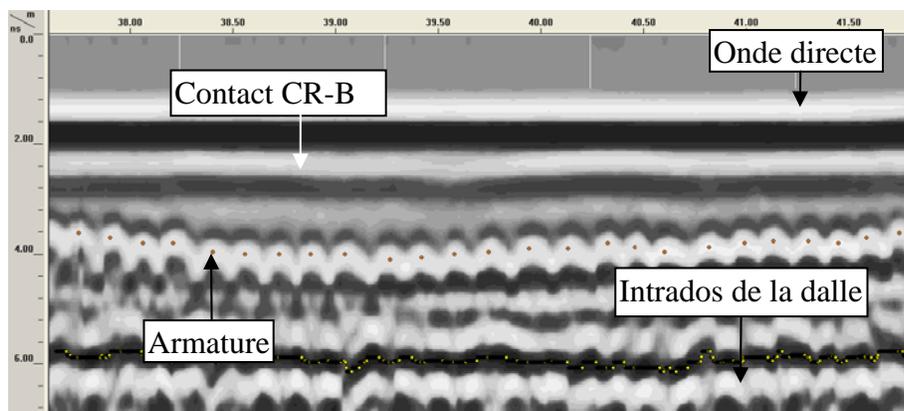
1. mesure de l'atténuation des ondes réfléchies au contact entre la couche de roulement et le béton (CR-B) [5 et 6];
2. mesure de l'atténuation des ondes réfléchies sur l'intrados de la dalle [7 et 8];
3. mesure de l'atténuation des ondes diffractées sur la première rangée de barres d'armature [9 et 10].

La première approche n'a pas pu être utilisée dans le cadre de nos travaux car les mesures étaient fortement affectées par la présence des multiples couches de roulement, zones de réparation et

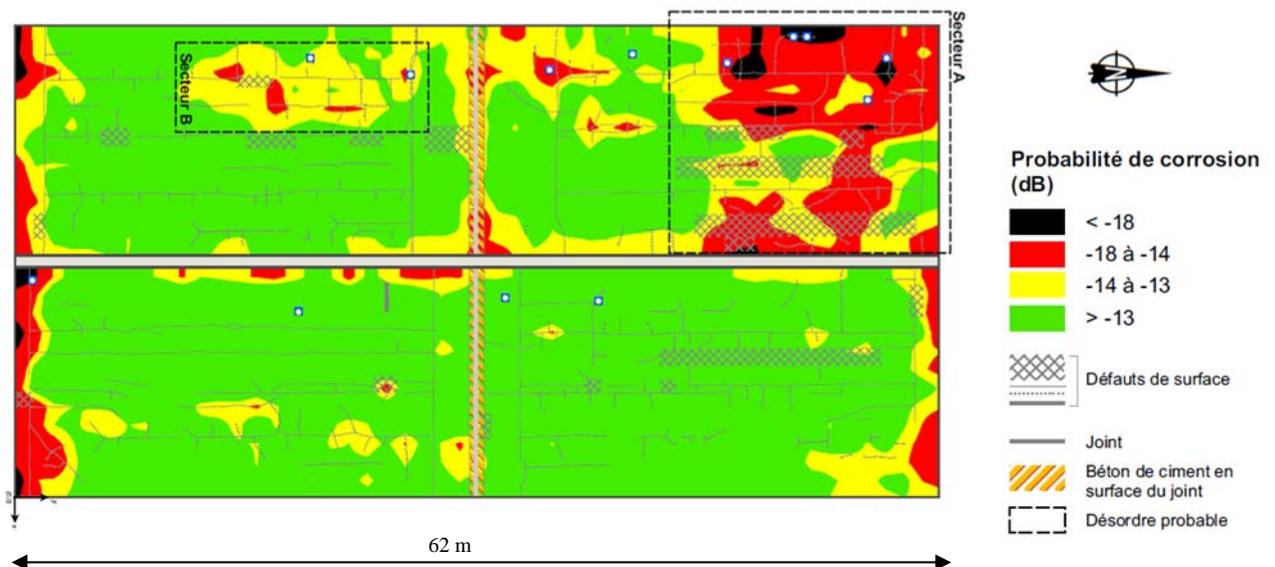
discontinuités inhérentes, lesquelles ont perturbé l'intensité des signaux réfléchis au niveau de l'interface CR-B.

Les deux autres approches ont pu être utilisées et leur principe est illustré par la figure 2, ci-après. Cette figure présente un radargramme obtenu avec une antenne 1,5 GHz, à partir duquel nous avons mesuré les amplitudes au niveau de la première rangée d'armatures et de l'intrados du tablier.

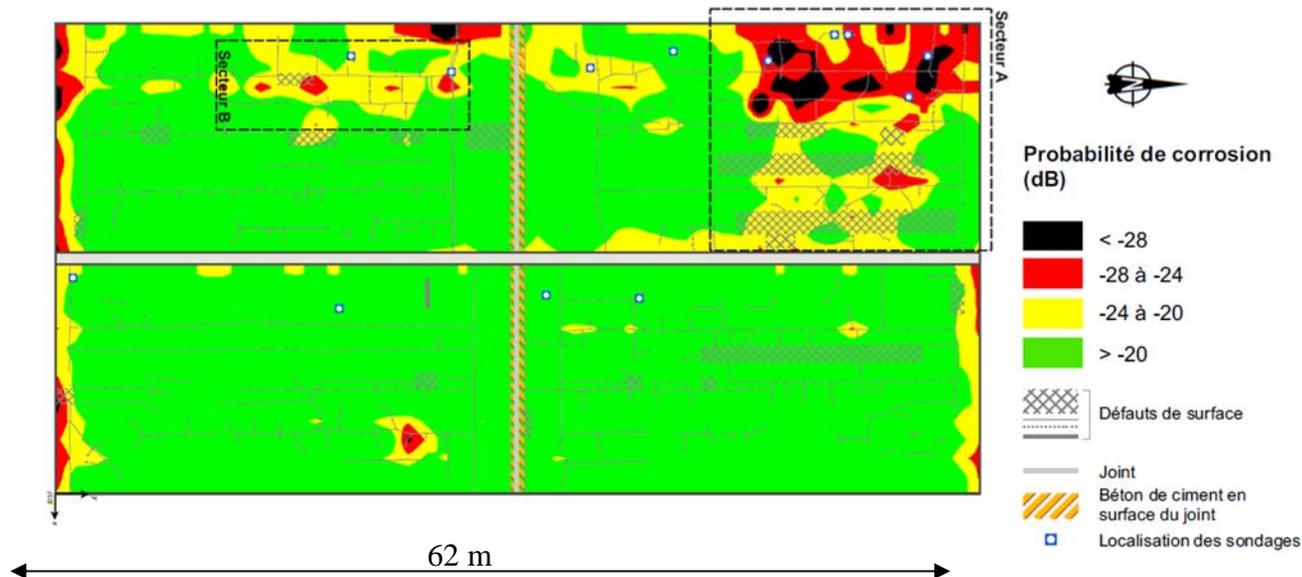
Les figures 3 et 4 illustrent les résultats des essais RADAR sous forme d'équipotential de probabilité de corrosion. Les zones rouges et noires indiquent l'emplacement où des désordres dans la dalle du tablier sont observés à partir des radargrammes. Sur ces figures, deux secteurs (A et B) sont identifiés où des désordres sont à anticiper.



**Fig. 2: Radargramme - mesure de l'atténuation normalisée au niveau des différents réflecteurs de la dalle de béton (logiciel RADAN 6.5)**



**Fig. 3: Probabilité de corrosion de la dalle du tablier du viaduc de la promenade Leamy – Atténuation au niveau des armatures**



**Fig. 4 : Probabilité de corrosion de la dalle du tablier du viaduc de la promenade Leamy – Atténuation au niveau du contact CR-B**

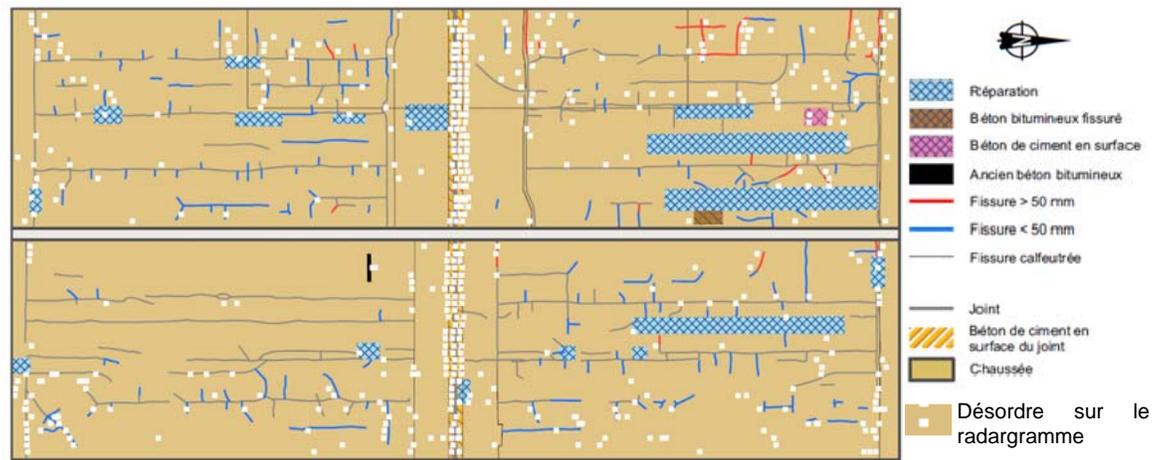
La difficulté liée aux mesures normalisées du potentiel de corrosion réside dans le fait que de nombreux facteurs, autres que la corrosion des armatures, peuvent aussi atténuer le signal. Parmi ces facteurs mentionnons la géométrie de l’ouvrage, l’épaisseur d’asphalte, les variations des paramètres de construction, l’endommagement du béton et la présence des ions chlorure.

Pour nous aider dans l’interprétation des résultats, une technique complémentaire de traitement de données a été utilisée afin d’identifier la nature des désordres observés sur le radargramme. Cette technique consiste à recenser les *caractéristiques structurales* et à les relier aux désordres observés visuellement sur les sections RADAR (radargramme). Ces *caractéristiques structurales* sont par la suite reportées sur les figures d’équipotentiel de corrosion afin de les faire correspondre aux valeurs d’atténuation.

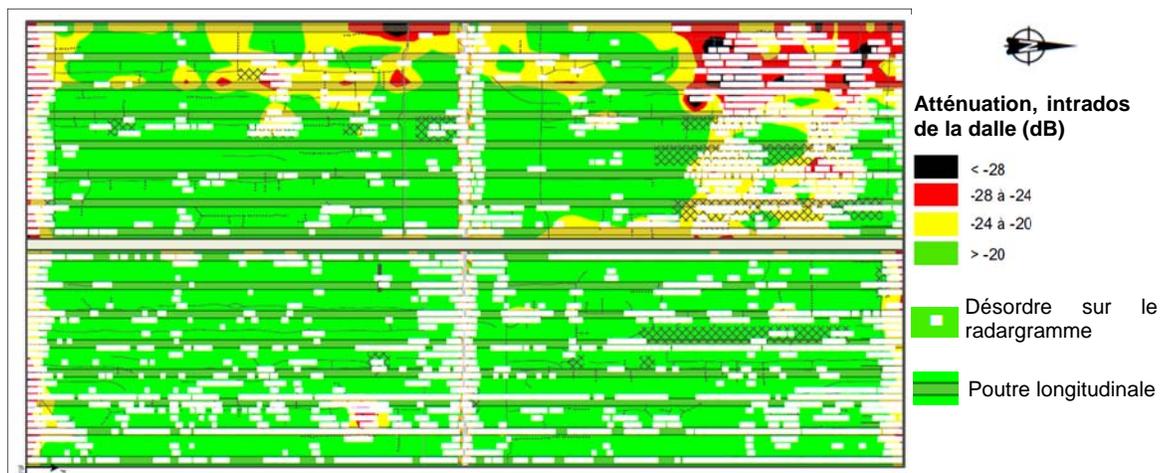
Le tableau 1, ci-après indique les principaux désordres que l'on peut retrouver sur les radargrammes et les différentes interprétations qui peuvent leur être données.

**Tab. 1 : Description des principaux désordres rencontrés dans les radargrammes et interprétations possibles**

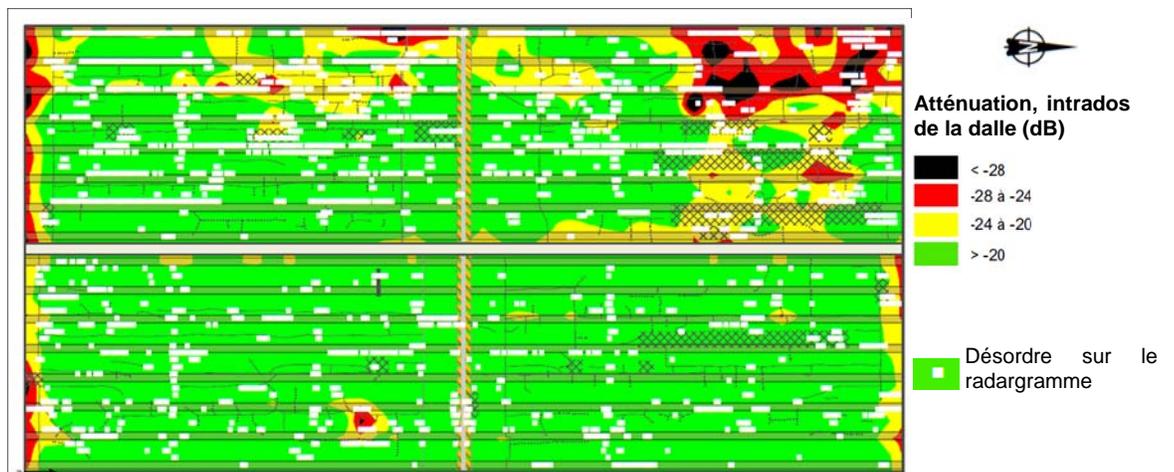
<b>Nature du réflecteur</b>	<b>Numéro associé</b>	<b>Désordre sur le radargramme</b>	<b>Interprétation (Caractéristiques structurales)</b>
<b>Surface</b>	1	Pique atteignant la surface	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gravier</li> <li>• Fissure</li> <li>• Joint de chaussée</li> </ul>
<b>Intrados de la dalle</b>	2	Réflecteur non visible	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Endommagement sur toute l'épaisseur de la dalle</li> <li>• Variation de l'épaisseur de la dalle</li> <li>• Présence d'une poutre, d'une entretoise ou de l'âme d'un caisson</li> </ul>
	3	Atténuation du réflecteur	
	4	Variation du temps de propagation	
<b>Acier d'armature</b>	5	Hyperbole non visible	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absence d'armature</li> <li>• Augmentation de la profondeur des armatures</li> <li>• Matériaux endommagés au-dessus des armatures</li> <li>• Corrosion des armatures</li> </ul>
	6	Hyperbole atténuée	
	7	Variation du temps de propagation	
<b>Interface couche de roulement béton</b>	8	Plusieurs réflecteurs sous la surface	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plusieurs couches de roulement</li> <li>• Délamination</li> <li>• Dégradation</li> <li>• Variation de l'épaisseur de la couche de roulement</li> </ul>
	9	Réflecteur atténué	
<b>Réparation</b>	10	Géométrie des réflecteurs différents localement des réflecteurs généralement rencontrés et décalés dans le temps par rapport aux autres.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réparation de béton de ciment</li> <li>• Réparation de béton bitumineux</li> <li>• Plaque d'acier</li> </ul>



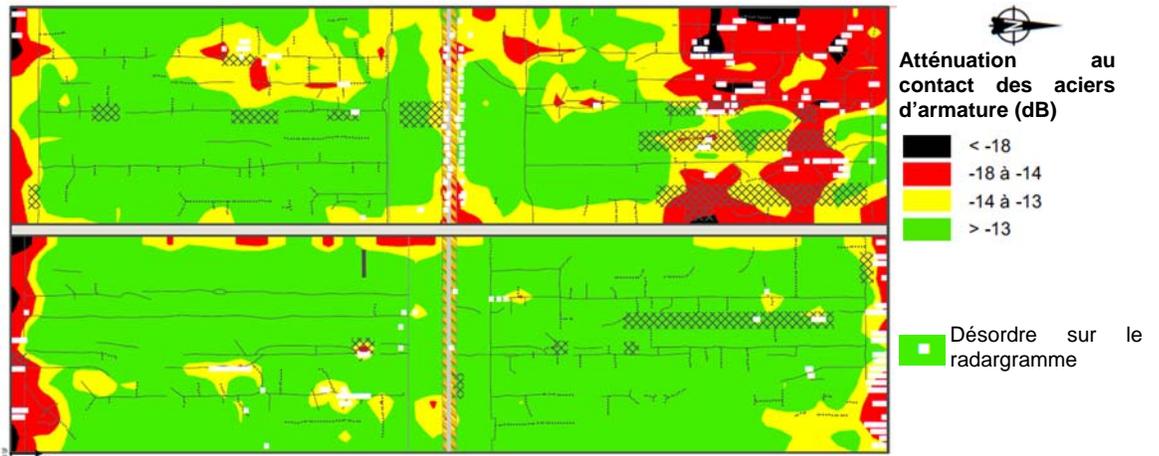
**Fig. 5 : Désordre numéro 1 - Pique atteignant la surface**



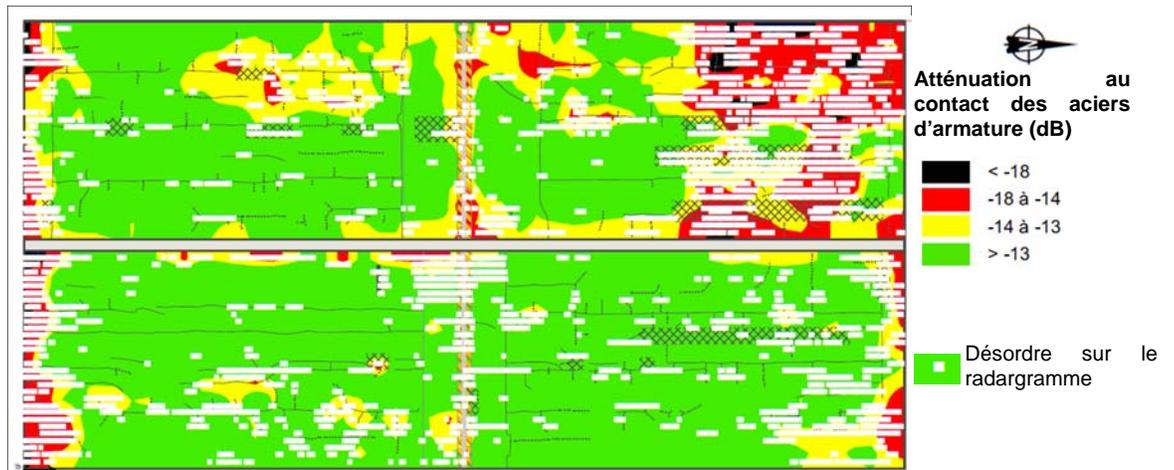
**Fig. 6 : Désordre numéro 2 et 3 - Intrados de la dalle, réflecteur non visible ou atténué – fond : atténuation de l'intrados de la dalle**



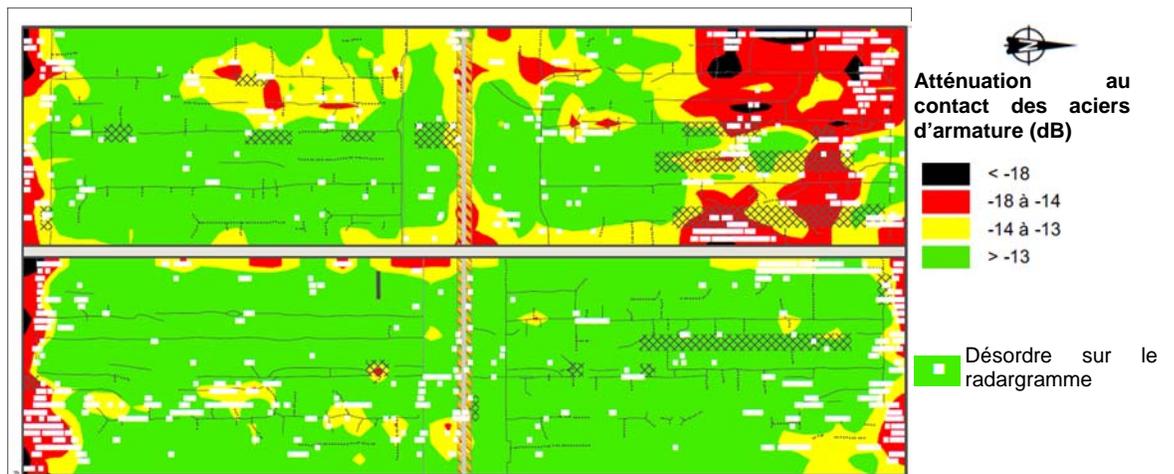
**Fig. 7 : Désordre numéro 4 - Intrados de la dalle, variation du temps de propagation**



**Fig. 8 : Désordre numéro 5 - Acier d'armature, hyperbole non visible**



**Fig. 9 : Désordre numéro 6 - Acier d'armature, hyperbole atténuée**



**Fig 10 : Désordre numéro 7 - Acier d'armature, variation du temps de propagation**

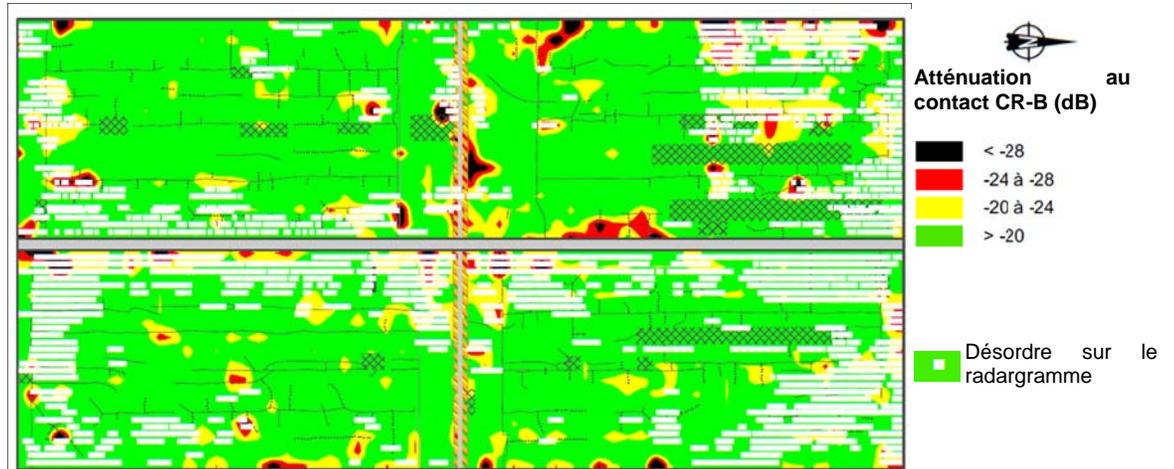


Fig. 11 : Désordre numéro 8 - Interface CR-B, plusieurs réflecteurs sous la surface

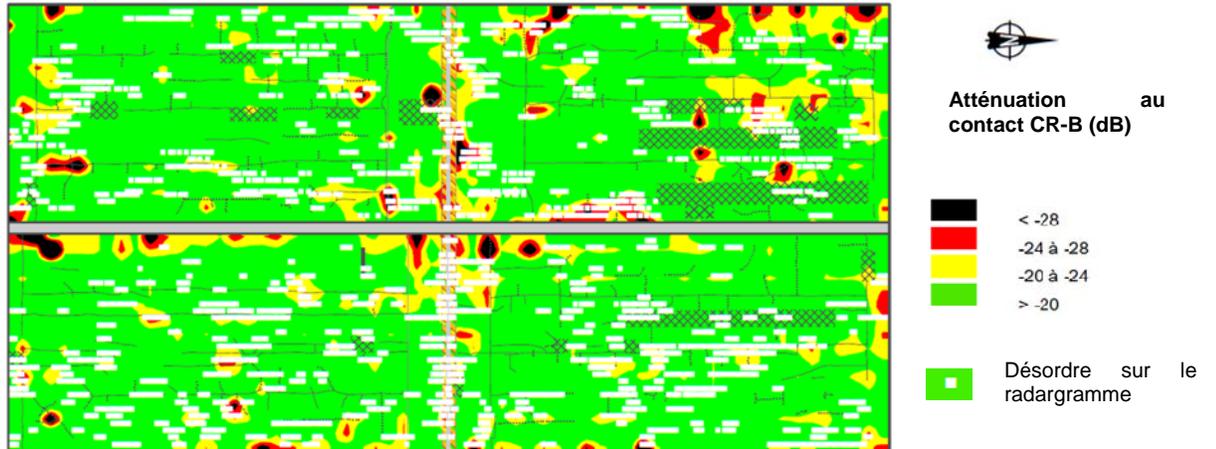
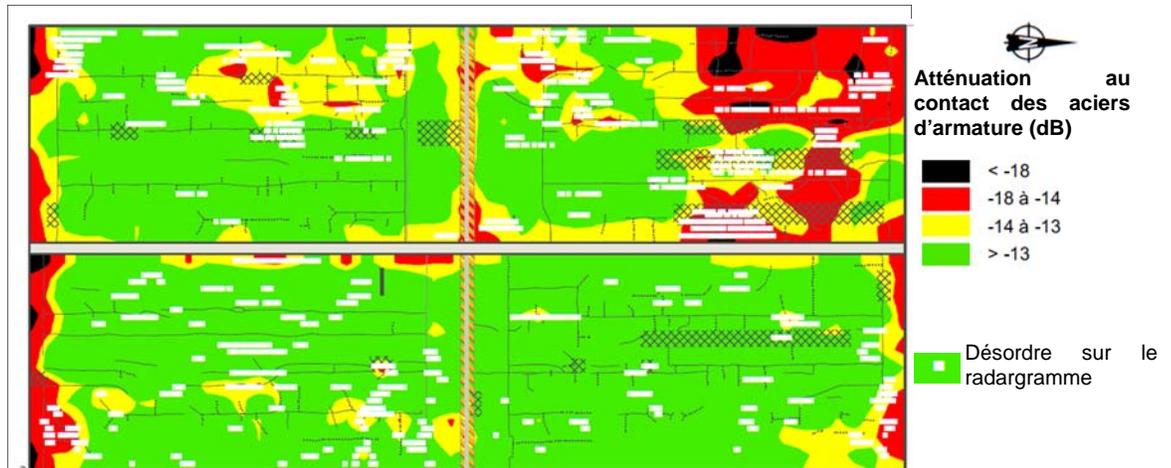


Fig. 12 : Désordre numéro 9 – Interface CR-B, Réflecteur atténué



**Fig. 13 : Désordre numéro 10 - réparation, géométrie des réflecteurs différents localement des réflecteurs généralement rencontrés et décalés dans le temps par rapport aux autres**

Sur les figures 5 à 12 les carrés blancs représentent l'emplacement des désordres observés sur les radargrammes. L'interprétation associée à ces désordres, numérotés de 1 à 10, est indiquée précédemment dans le tableau 1.

La figure 5 montre que les piques atteignant la surface (observés sur les radargrammes) sont généralement causés par des défauts de surface (fissures, joints, réparations). Les figures 6 et 7 indiquent que la plupart des désordres observés au niveau de l'intrados de la dalle sont majoritairement orientés selon l'axe des poutres. Il est aussi observé que ces désordres apparaissent le long de l'axe probable des entretoises. De plus, si on compare les figures 6 et 7, il est possible de différencier l'effet résultant de l'endommagement de la dalle de celui causé par la présence des poutres et entretoises et ainsi, de vérifier que les atténuations occasionnées par les poutres n'ont pas été considérées dans la mesure des atténuations au niveau de l'intrados de la dalle.

Les désordres occasionnés par l'absence d'armature ou bien des hyperboles fortement atténuées (figures 8 à 10) se situent principalement au droit des zones rouges et noires (forte probabilité de corrosion) et près des joints de chaussée.

Les figures 11 et 12 mettent en évidence que les valeurs d'atténuation mesurées au contact entre la couche de roulement et le béton sont fortement influencées par la nature des désordres observés sur le radargramme (numérotés 8 et 9). En effet, ces mesures d'atténuation mettent principalement en évidence la présence de plusieurs réflecteurs ou de réflecteurs atténués causés par la variation de l'épaisseur de la couche de roulement.

Finalement, les désordres occasionnés par des réparations visibles en surface ne sont pas tout le temps visibles sur les radargrammes (figure 13). À l'inverse, la figure 13 montre aussi que d'anciennes réparations cachées sous une nouvelle couche de roulement peuvent apparaître sur les radargrammes sans que ces anciennes réparations soient visibles en surface ou n'affectent les mesures d'atténuation.

### 3.2 Mesure du potentiel de corrosion par méthode électrique et épaisseur de la couche de roulement

La méthode repose sur la mesure de la différence de potentiel entre un courant circulant dans la cage d'acier d'armature et une électrode de référence (demi-cellule Cu/CuSO<sub>4</sub>) placée en contact avec la surface en béton du tablier (fig. 14) [3]. Pour assurer un bon contact entre le béton de la dalle et l'électrode de référence, des trous ont été percés dans la couche de roulement avec un foret de 10 mm de diamètre conformément à la norme ASTM C876-09[3].



Fig. 14 : Mesure de potentiel de corrosion

La figure 15a illustre les résultats de l'essai de potentiel de corrosion qui a été réalisé sur une partie du tablier du viaduc (côté ouest). L'échelle des couleurs représente des équipotentiels de corrosion des armatures. Cette échelle de valeurs de potentiel de corrosion est définie par la norme ASTM C 876-09 [3] et est résumée dans le tableau 2 ci-après. Elle indique que plus le potentiel de corrosion est négatif, plus le niveau de corrosion des armatures est susceptible d'être élevé. Dans le cas de la figure 15a, ci-après, les valeurs de potentiel de corrosion sont supérieures à -350 mV autrement dit, selon le tableau 2, l'activité de corrosion peut être qualifiée d'incertaine à très peu probable.

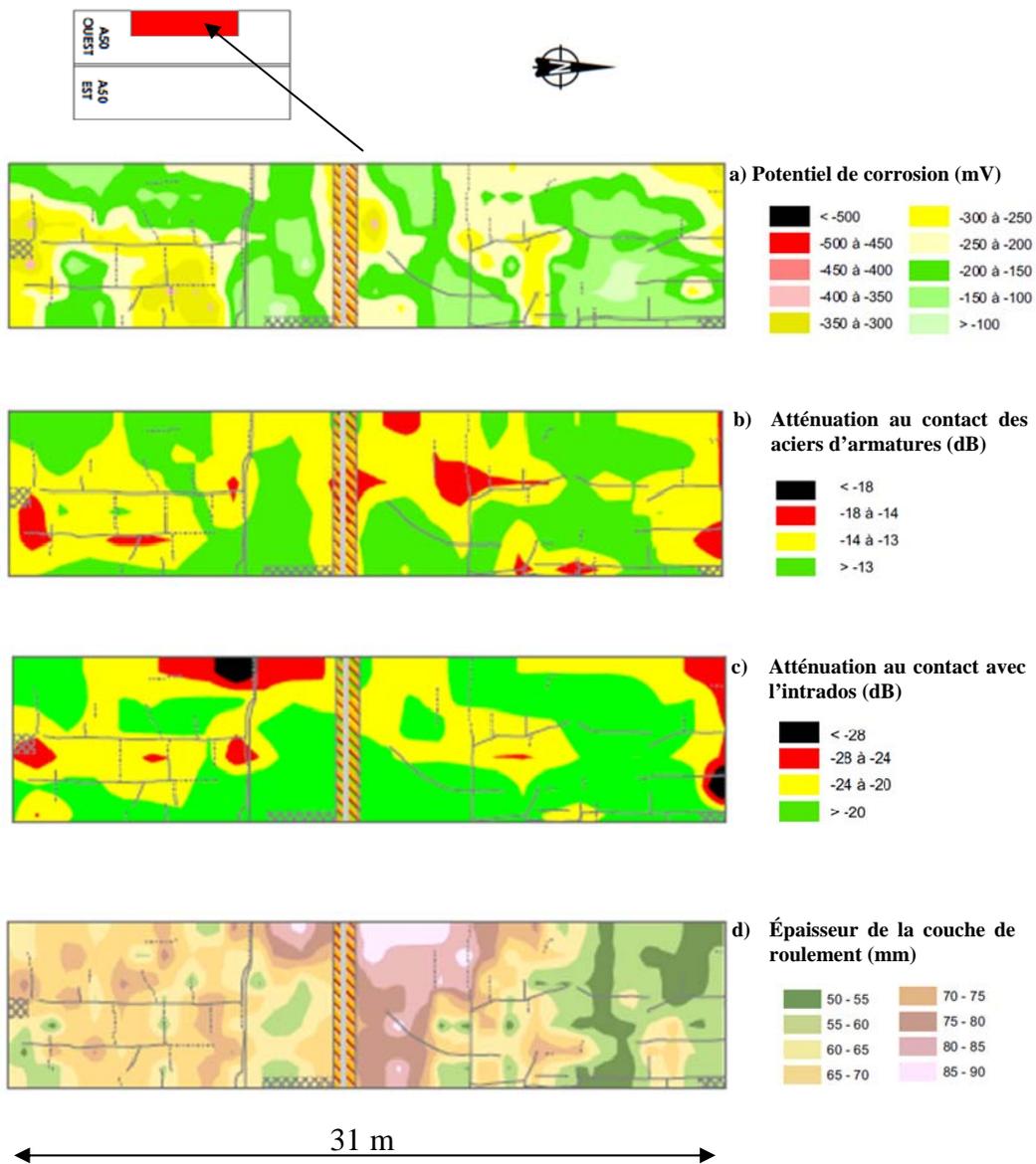
Tab. 2 : Zones de potentiel de corrosion définies par la norme ASTM C 876-09

Zones	Valeurs limites (mV)	Description
vert	Supérieure à -200	90 % de probabilité qu'il n'y ait <b>aucune</b> corrosion des armatures
jaune	Entre -200 et -350	L'activité de corrosion des armatures est incertaine
rouge	Inférieure à -350	90 % de probabilité qu'il y ait corrosion des armatures

L'épaisseur d'asphalte a été mesurée à l'occasion du perçage des trous nécessaires pour la réalisation des mesures de potentiel de corrosion. La figure 15d représente l'épaisseur d'asphalte recouvrant le tablier. L'épaisseur de ce recouvrement varie entre 50 et 100 mm.

### **3.3 Comparaison entre les essais RADAR, électriques et d'épaisseur de la couche de roulement**

L'analyse comparative des figures 15a à 15d démontre que tous les désordres (zones jaunes et rouges) que l'on rencontre avec la méthode électrique (figure 15a) peuvent être retrouvés soit sur la figure 15b soit sur la figure 15c et parfois même sur les deux figures associées aux méthodes RADAR. D'autre part, la comparaison des figures 15b, 15c et 15d indique que certaines zones rouges et jaunes de la figure 15c et surtout 15b peuvent être reliées à une augmentation de l'épaisseur de l'enrobé bitumineux. Autrement dit, la variation de l'épaisseur de la couche de roulement influence l'atténuation des ondes électromagnétiques diffractées au niveau des aciers d'armature et légèrement les mesures prises au niveau de l'intrados de la dalle. Finalement, les deux techniques RADAR choisies pour l'interprétation des résultats (figures 15b et 15c) permettent d'identifier tous les défauts de structure qui avaient été repérés avec la technique du potentiel de corrosion.



**Fig. 15 : Comparaison entre les résultats de potentiel de corrosion, RADAR et d'épaisseur des couches de roulement**

### 3.4 Validation des résultats et essais en laboratoire

Pour valider les résultats des essais non destructifs, des points de contrôle et des prélèvements d'échantillons par carottage ont été réalisés dans différentes zones de probabilité de corrosion.

Les points de contrôle ont consisté à dégager les armatures à l'aide d'un marteau pneumatique. Ils ont permis de confirmer les résultats des essais non destructifs en observant l'état de la dalle de béton et de la couche de roulement de même que la corrosion des armatures. La figure 16 représente un des points de contrôle que nous avons dégagé dans le secteur A identifié sur les figures 3 et 4.

Ce dégagement des armatures nous a permis de mettre en évidence la présence dans le secteur A d'un horizon de gravier entre la couche de roulement et le dessus de la dalle en béton qui est à l'origine des désordres observés aux figures 3 et 4.



**Fig. 16 : Point de contrôle dans le secteur A – horizon de gravier au contact CR-B**

D'autres sondages réalisés au droit des désordres les plus importants n'ont montré, au niveau des armatures, aucune perte de section par corrosion. Par contre, dans certains secteurs, les essais en laboratoire réalisés sur les échantillons prélevés dans ces points de contrôle montrent que des facteurs entraînant la corrosion sont réunis. En effet, les valeurs de pH mesurées sur les échantillons C à E (tableau 3) varient entre de 12,4 et 12,5. Ces valeurs de pH favoriseraient l'amorçage de la rouille. Les échantillons D et E prélevés dans le secteur A présentent une teneur en ions chlorure ( $106,4$  et  $164,8 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) supérieure à la valeur critique entraînant généralement une dégradation des aciers d'armature (la teneur critique de  $60 \text{ mg.kg}^{-1}$  pour un béton avec une masse de ciment de  $400 \text{ mg.kg}$ ).

D'autre part, la résistance à la compression simple des échantillons de béton de la dalle du tablier du viaduc est supérieure à  $36 \text{ MPa}$  (tableau 3). La résistivité électrique du béton est de  $219$  et  $306 \Omega.m$ . Ces valeurs de résistivité électrique sont souvent retrouvées dans des bétons ayant une résistance à la compression d'environ  $40 \text{ MPa}$  [11].

**Tab. 3 : Résultats des essais en laboratoire**

Échantillon	Résistance en compression simple (MPa)	Teneur en chlorure		Mesure de résistivité électrique ( $\Omega.m$ )
		Résultats ( $mg.kg^{-1}$ )	Profondeur (mm)	
A	36,6	-	-	219
B	48,9	-	-	306
C	-	22,4	80	-
D	-	106,4	80	-
E	-	164,8	90	-

## 4. RÉSULTATS

### 4.1 Résultats des travaux réalisés au viaduc de la promenade Leamy à Gatineau

Les figures 3 et 4, représentant l'atténuation des signaux diffractés au niveau des armatures et réfléchis sur l'intrados de la dalle, montrent deux secteurs où l'on rencontre des désordres dans la dalle (probabilité de corrosion élevée). Dans le secteur situé au nord (secteur A) un dégagement de la couche de roulement et du béton de la dalle a mis en évidence que les désordres mesurés au RADAR étaient causés par un horizon de gravier situé entre la couche de roulement et le dessus de la dalle de béton du tablier.

L'étude comparative entre les méthodes de traitement RADAR et de mesure de potentiel de corrosion a montré une bonne corrélation entre les résultats. Cette étude met aussi en évidence le phénomène connu de l'effet de l'épaisseur de la couche d'asphalte. En effet, il apparaît dans nos résultats (figure 15) que l'épaisseur de la couche de roulement influence l'atténuation des ondes électromagnétiques diffractées au niveau des aciers d'armature et, de façon plus faible, les mesures prises au niveau de l'intrados de la dalle.

### 4.2 Analyse qualitative des données RADAR

Afin de contrôler la validité des mesures RADAR, nous avons effectué, à titre expérimental, une analyse qualitative des données RADAR en identifiant certaines caractéristiques structurales du viaduc et en les corrélant aux désordres observés visuellement sur les radargrammes. Cette analyse a mis en évidence les principales observations suivantes :

- les désordres sur les radargrammes atteignant la surface (pic) sont généralement causés par des défauts de surface (fissures, réparation, joints);
- l'atténuation des réflecteurs associés à l'intrados de la dalle s'oriente principalement le long des poutres longitudinales et des entretoises;
- les désordres sur les radargrammes occasionnés par des hyperboles fortement atténuées correspondent aux zones de forte probabilité de corrosion;
- les multiples couches de roulement observées sur les radargrammes ont fortement influencé les résultats des mesures d'atténuation au niveau du contact entre la couche de roulement et le béton.

- on retrouve au niveau des radargrammes d'anciennes réparations cachées par les nouvelles couches de roulement.

## 5. CONCLUSION

Les travaux effectués sur le viaduc de la promenade Leamy à Gatineau montrent que l'auscultation des ouvrages en béton par méthodes électrique et RADAR est un outil efficace qui permet, dès le début de l'évaluation de l'état d'un ouvrage, d'avoir une idée de la répartition des défauts probables dans le tablier de l'ouvrage et d'en connaître leur origine. Cet outil permet également d'orienter et de minimiser les travaux complémentaires pour évaluer l'état des ponts. En effet, connaissant à l'avance les particularités d'un ouvrage, il ne suffit par la suite que de quelques sondages, observations visuelles et analyses des radargrammes pour connaître précisément l'état de l'ouvrage.

L'analyse qualitative basée sur l'identification des désordres directement sur les radargrammes (profil RADAR) montre une excellente cohérence dans les résultats basés sur la mesure de l'atténuation des ondes RADAR. Il se dégage aussi de ce type d'analyse complémentaire un moyen prometteur pour mieux connaître l'origine des désordres structuraux qui sont mis en évidence par la mesure des atténuations au niveau des différents réflecteurs du tablier.

L'auscultation des ponts et viaduc par des méthodes non destructives corrélées à quelques essais destructifs *in situ* et en laboratoire permet d'évaluer rapidement, et de manière approfondie, l'état des ouvrages anciens, souvent peu documentés, afin de répondre aux récentes exigences pour la « conservation des structures » au Québec.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'équipe du GRAI de l'Université de Sherbrooke pour son aide lors de la réalisation de ces travaux. Nous tenons aussi à remercier M. Sylvain Cordeau du ministère des Transports du Québec.

## RÉFÉRENCES

- [1] Gouvernement du Québec, Plan de redressement de l'état du réseau routier, *CNW Telbec*, Communication du 5 février 2010.
- [2] Gouvernement du Québec, Programmation des travaux routiers 2010-2011, *Transport Québec*, Conférence de presse du 13 février 2010.
- [3] ASTM C 876 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, *Norme ASTM*, 2009
- [4] ASTM D6087 Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Using Ground Penetrating Radar, *norme ASTM*, 2008
- [5] Barnes, C.L., Trotier J.F., Ground-Penetrating Radar for Network-Level Concrete Deck Repair Management, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 126, No 3, mai-juin 2000, P. 257-262
- [6] Balayssac, J-P., Laurens, S., Rhazi, J., Utilisation du RADAR pour la détection de zones à risque de corrosion dans le béton armé, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, Vol. 237, mars-avril 2002, p. 99-102.

- [7] Rhazi, J., Dous, O., Ballivy, G., Laurens, S., Balayssac J.-P., Non destructive health evaluation of concrete bridge decks by GPR and half cell potential techniques, *Non-Destructive testing in Civil Engineering, International Symposium*, Berlin, 2003
- [8] Dous, O., Rhazi, J., Ballivy G., Bertrand L., *Évaluation des dalles de tabliers de ponts par RADAR, potentiel de corrosion et résistivité électrique*, 11<sup>e</sup> colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Université de Laval, Québec 2004, 10 p.
- [9] Parrillo, R., Robert, R.L., Haggan, A., 2005, Bridge Deck Condition Assessment Using Ground Penetrating RADAR, *International Bridge Conference*, juin 2005, Pittsburgh, PA.
- [10] Kim, W., Ismail, A., Anderson, N-L., Atekwana, E-A., Buccelato, A., Non-destructive testing (NDT) for corrosion in bridge deck using GPR. *The 3<sup>rd</sup> International Conference on Applied geophysics*, décembre 2003, Orlando, Florida.
- [11] Neville, A.N., 2000, *Propriété des bétons*, Éditions Eyrolles, 806 p.