

Expertise des ponts à étage de l'autoroute Dufferin-Montmorency par méthodes géoradar et relevé de potentiel

Éric Bédard, ing. M.Sc.*, François Saint-Pierre, ing. Ph.D.,
Étienne Paradis, ing. jr et Sofie Tremblay, géo. M.Sc.

LVM
325, rue de l'Espinay
Québec (Québec) Canada G1L 2J2
*eric.bedard@lvm.ca

RÉSUMÉ

1 Introduction

Étant donné que les ponts du réseau routier québécois tendent vers la fin de leur vie utile, il devient impératif pour les gestionnaires d'ouvrages de connaître l'état actuel de leurs structures afin de planifier adéquatement les travaux de réfection ou parfois même le remplacement des ouvrages. La corrosion des armatures étant l'une des principales causes responsables de la dégradation des ouvrages d'art, plusieurs méthodes d'auscultation non destructives ont été développées afin d'investiguer l'activité de corrosion des aciers d'armature ainsi que l'endommagement des ouvrages.

Dans cet article, deux méthodes d'auscultation (relevé de potentiel et géoradar) utilisées lors de l'expertise des tabliers de pont situés sur l'autoroute Dufferin-Montmorency sont présentées. Chacune des méthodes a été utilisée afin de déterminer l'activité de corrosion des armatures dans les différentes sections de l'autoroute. De plus, le géoradar a permis de déterminer les épaisseurs de pavage ainsi que les épaisseurs et le nombre de couches de matériaux présentes dans les tabliers et la présence de désordres. L'analyse des données obtenues par le géoradar couplées aux résultats de potentiel de corrosion ont permis d'avoir un meilleur aperçu de l'endommagement causé par la corrosion des armatures tout en diminuant significativement la quantité des essais destructifs nécessaires pour caractériser les tabliers. De plus, les résultats ont facilité la prise de décision quant aux travaux de réhabilitation qui devront être entrepris.

2 Méthodologie

2.1 Méthode de mesure du potentiel de corrosion par méthode électrique (ASTM C876 (09)[1])

La méthode de mesure du potentiel de corrosion 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/CuSO₄) placée en contact avec la surface en béton du tablier (Figure 1). Pratiquement, pour s'assurer de la continuité électrique du réseau d'armature, chaque travée du tablier doit être vérifiée avant la prise des mesures de potentiel. Pour effectuer les mesures, l'enrobé bitumineux doit d'abord être percé jusqu'au béton. Par la suite, les trous sont remplis d'eau savonneuse afin d'assurer la conductivité électrique. Pour chaque travée, des mesures de potentiel sont prises à environ chaque mètre carré.

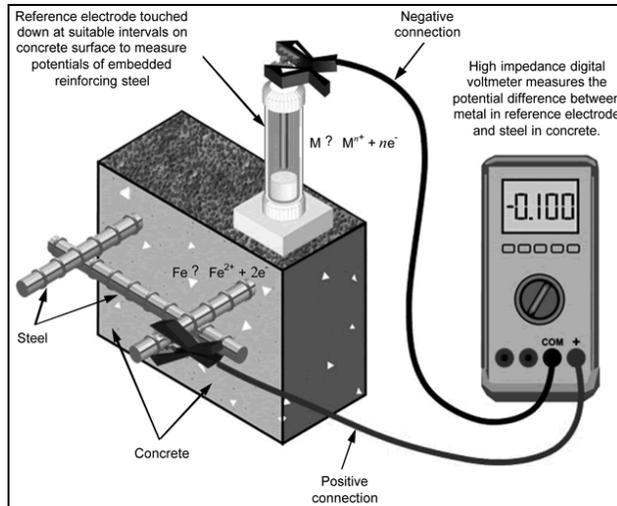


Figure 1 : Montage pour la mesure de potentiel de corrosion [1]

Les résultats obtenus par l'essai de potentiel de corrosion sont ensuite présentés sous forme de cartographie (Figure 2). Le Tableau 1 présente le code de couleurs utilisé pour créer les cartographies. Ce code est défini par le MTQ, mais est basé selon les recommandations de la norme ASTM C876 [1].

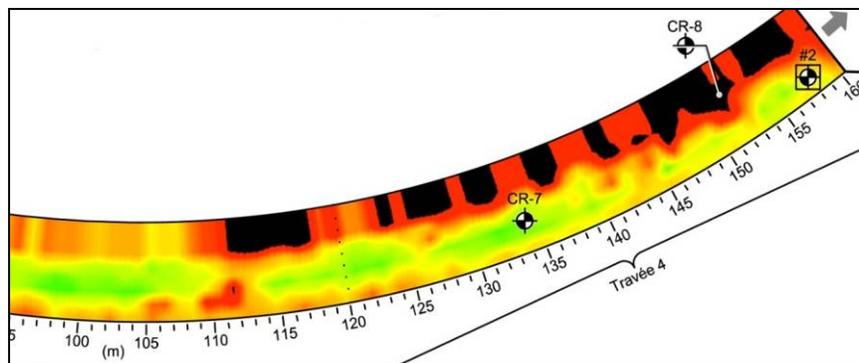


Figure 2: Exemple d'une cartographie des résultats de relevé de potentiel

Tableau 1 : Code de couleurs et convention d'interprétation des activités de corrosion

Potentiel (mV)	Activité de corrosion	Interprétation
> -200	Faible	La corrosion de l'acier d'armature est probablement inexistante.
-200 à -350	Initiée	L'activité de corrosion est incertaine. La présence de rouille est peu probable, mais l'activité de corrosion est non nulle et peut évoluer vers un état de corrosion intense.
-350 à -500	Avancée	La corrosion de l'acier d'armature est fort probablement existante. Ceci signifie que le processus de corrosion de l'acier d'armature est généralement suffisant pour engendrer la formation de rouille et induire une fissuration du béton.
≤ -500	Très avancée	

2.2 Méthode d'auscultation par mesure par géoradar (ASTM D4748-10)

Le géoradar, aussi connu sous le nom « Ground Penetrating RADAR », est une méthode d'auscultation basée sur la propagation des ondes électromagnétiques dans le milieu. Elle permet de localiser les différentes couches de matériaux sous-jacents, de même que les vides, les conduites et la surface des nappes d'eau souterraine. Dans le cas des structures en béton, le géoradar est principalement utilisé pour localiser les aciers d'armature, identifier les zones altérées ou délaminées ainsi qu'évaluer le degré de corrosion des armatures et l'épaisseur de la couche d'enrobé bitumineux. La profondeur d'investigation de ce procédé varie entre 300 et 400 mm dépendamment du type d'antenne utilisé.

Les profils géoradar obtenus, appelés « radargrammes », permettent de visualiser le long du chemin parcouru par l'antenne une coupe perpendiculaire à la surface auscultée (Figure 3). Dans ces profils, les éléments structuraux apparaissant sous forme d'hyperboles correspondent à des armatures.

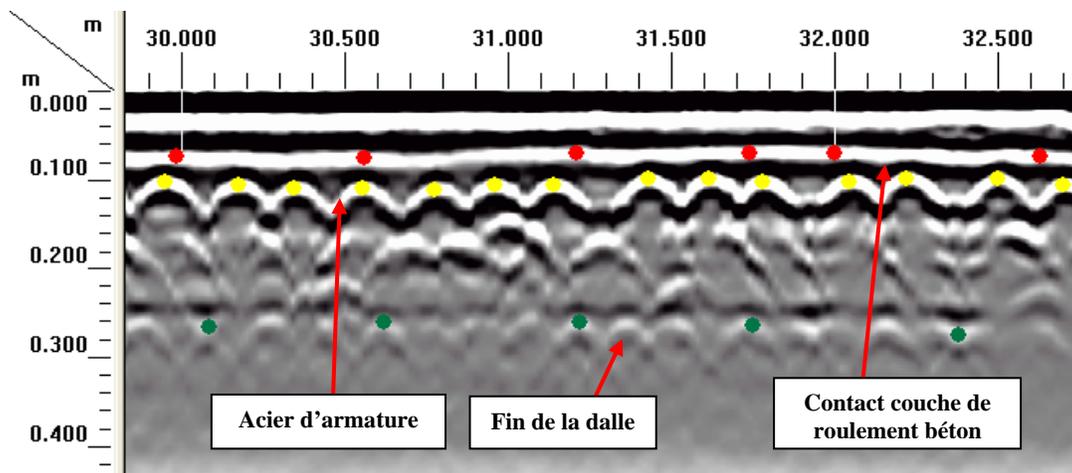


Figure 3 : Profil géoradar – mesure de l'atténuation normalisée au niveau des armatures du tronçon 9 de l'autoroute Dufferin- Montmorency (Logiciel RADAN 7)

La probabilité de corrosion est basée sur la mesure de l'amplitude de l'onde électromagnétique qui se réfléchit ou se diffracte sur différents éléments de la dalle de béton. Les amplitudes mesurées sont exprimées en dB normalisé par rapport à une valeur de référence dépendante de notre système de mesure.

La difficulté des méthodes d'analyse réside dans l'interprétation des résultats, car de nombreux facteurs, autres que la corrosion des armatures, peuvent aussi atténuer le signal. Parmi ces facteurs, on note : la géométrie de l'ouvrage, l'épaisseur de béton et d'enrobé bitumineux recouvrant les armatures, les couches multiples de matériaux, les variations de paramètres de construction du béton, l'endommagement du béton, la présence des ions chlorures et les conditions environnementales.

La norme ASTM D 6087 [2] est spécifiquement conçue pour les tabliers de pont et définit la façon dont les relevés et le traitement des données doivent être effectués. Dans le cadre du présent projet, cette norme a été appliquée.

Les échelles de probabilité de corrosion ont été déterminées à partir de la norme ASTM D6087. Ces dernières sont établies en prenant la valeur de l'amplitude maximale moyenne à laquelle est soustrait 6 et 8 dB. Cette valeur correspond à la valeur maximale la plus récurrente dans l'ensemble des relevés et indique la limite à partir de laquelle le béton et/ou l'acier est jugé détérioré. À titre d'exemple, si la valeur d'amplitude maximale moyenne est de -20dB, le béton est considéré en bon état pour des valeurs supérieures à -20 dB et est considéré détérioré pour des valeurs inférieures à -28 dB. Pour faciliter la comparaison entre les méthodes d'auscultation par relevé de potentiel et par géoradar, le même code de couleur a été utilisé pour produire les cartographies. Le Tableau 2 présente la méthode qui a été utilisée pour établir le code de couleurs.

Tableau 2 : Code de couleurs et convention d'interprétation des probabilités de corrosion

Probabilité de corrosion	Interprétation
Faible	Correspond aux valeurs supérieures à la valeur de l'amplitude maximale moyenne
Moyenne	Correspond aux valeurs se situant entre la valeur de l'amplitude maximale moyenne et cette même valeur - 6 dB
Élevée	Correspond aux valeurs se situant entre la valeur de l'amplitude maximale moyenne - 6 dB et la valeur de l'amplitude maximale moyenne - 8 dB
Très élevée	Correspond aux valeurs inférieures à la valeur de l'amplitude maximale moyenne - 8 dB

À titre d'exemple, si la valeur de l'amplitude maximale moyenne est de -10dB, nous aurons le code de couleur suivant :

- Zones vertes = valeurs supérieures à -10 dB
- Zones jaunes = valeurs de -10 dB à -16 dB
- Zones rouges = valeurs de -16 dB à -18 dB
- Zones noires = valeurs inférieures -18 dB

Dans le cadre du projet Dufferin-Montmorency, quatre échelles différentes ont été définies pour évaluer la probabilité de corrosion des barres d'armature, car la valeur moyenne des résultats obtenus variait de façon significative entre les différentes sections du pont. Ces variations étaient principalement causées par l'épaisseur de la couche de roulement (enrobé bitumineux). En d'autres termes, l'ajustement des échelles de probabilité de corrosion permet de s'affranchir de l'influence de l'épaisseur d'asphalte sur les données.

3 Étude de cas : Autoroute Dufferin-Montmorency (Aut. 440) dans la région de Québec

3.1 Introduction

L'expertise réalisée sur l'autoroute Dufferin-Montmorency comprend l'évaluation de l'endommagement du béton de six tabliers de pont à poutres de béton précontraint, préfabriqué ou coulé en place. Ces structures construites en 1976 dans la région de Québec (Figure 4) totalisent une superficie de 55 416 m² sur un maximum de 9 voies dans les deux directions. Le débit journalier moyen annuel (DJMA) pour les structures est de l'ordre de 40 000. Les dalles de béton ont une épaisseur moyenne de 200 mm et sont recouvertes d'une couche d'enrobé bitumineux dont l'épaisseur peut varier entre 40 et 100 mm.

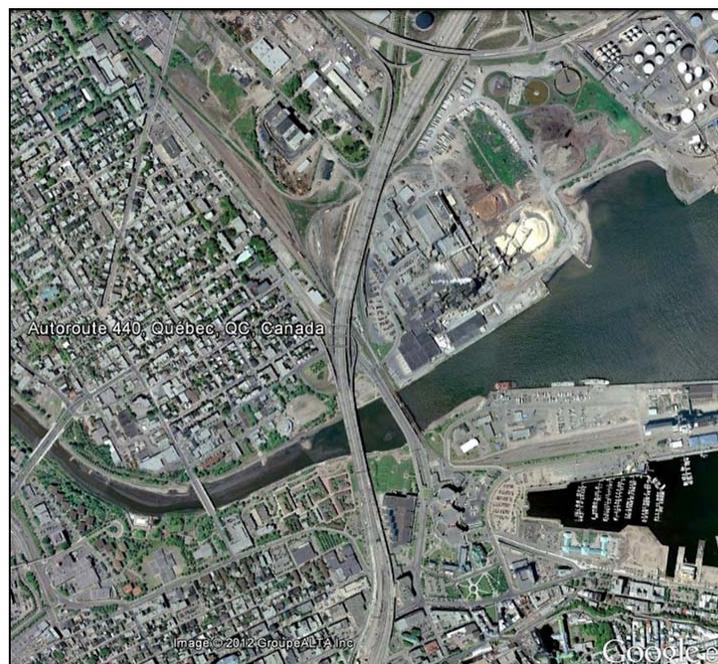


Figure 4 : Source : Google Earth 2012

Pour chacun des tabliers, la détermination des zones de probabilité de corrosion a été réalisée par la méthode géoradar (ASTM D4748) ainsi que par la méthode de relevé de potentiel (ASTM C876). L'évaluation du degré d'endommagement du béton a été réalisée à partir de différents essais réalisés sur des carottes de béton qui ont été prélevées à différents endroits dans chacun des tabliers. Les essais réalisés consistaient à la détermination de la résistance à la compression (CSA A23.2-14C), du module d'élasticité statique (ASTM C469), des caractéristiques du réseau de vides d'air (ASTM C457), de la porosité et de l'absorption (ASTM C642) ainsi que de la teneur en ions chlorure totaux (ASTM C1152).

Dans le cadre de cette étude, une comparaison a été effectuée entre les résultats obtenus pour la méthode de géoradar et par celle du relevé de potentiel pour deux sections (S1 et S2) de tablier de l'autoroute. De plus, afin de valider les données obtenues par ces deux méthodes, des comparatifs sont faits avec l'état de corrosion observé visuellement sur les carottes prélevées et les résultats de teneur en ions chlorure totaux. Pour déterminer à quel moment la corrosion peut s'initier, la valeur critique utilisée est celle mentionnée dans le *Manuel d'entretien des structures* du Ministère des Transports du Québec [3]. Selon l'article 4.4.1.1 de ce manuel, la corrosion des armatures est susceptible de s'initier lorsque la teneur en ions chlorure est supérieure à 0,03 % de la masse volumique du béton aux environs immédiats des armatures (0,012 % dans le cas du béton précontraint).

3.2 Résultats de la section S1

Tel que présenté à la Figure 5, les cartographies obtenues par le relevé de potentiel (Figure 5A) et par le géoradar (Figure 5B) sont plutôt similaires. De façon générale, les zones où l'activité de corrosion est élevée sont identiques sur les deux cartographies même si les pourcentages des niveaux d'activité de corrosion sont différents. La Figure 6 présente les résultats de pourcentage. Pour la section S1, on peut remarquer que l'activité de corrosion mesurée par la méthode du géoradar est généralement inférieure à celle obtenue par la méthode du relevé de potentiel.

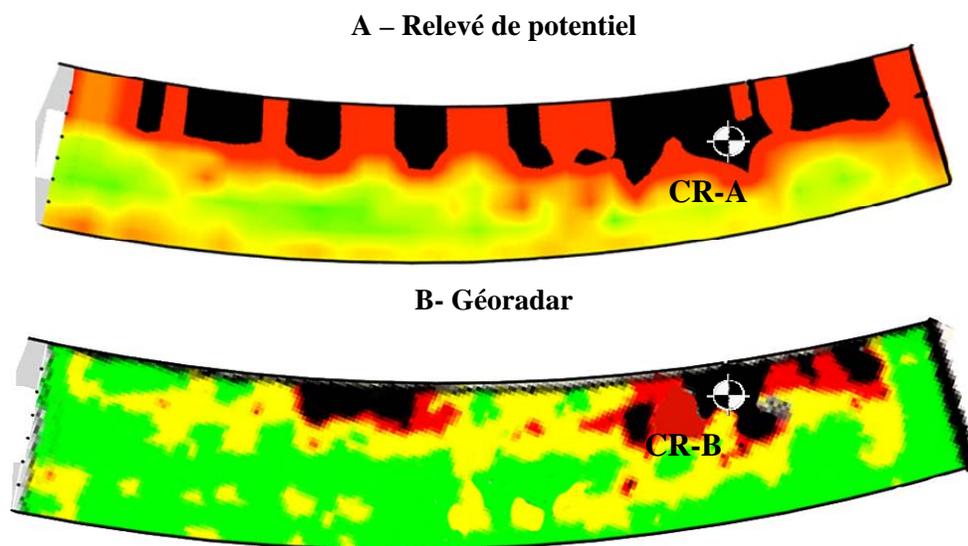


Figure 5 : Cartographies de l'activité de corrosion des armatures (section S1)

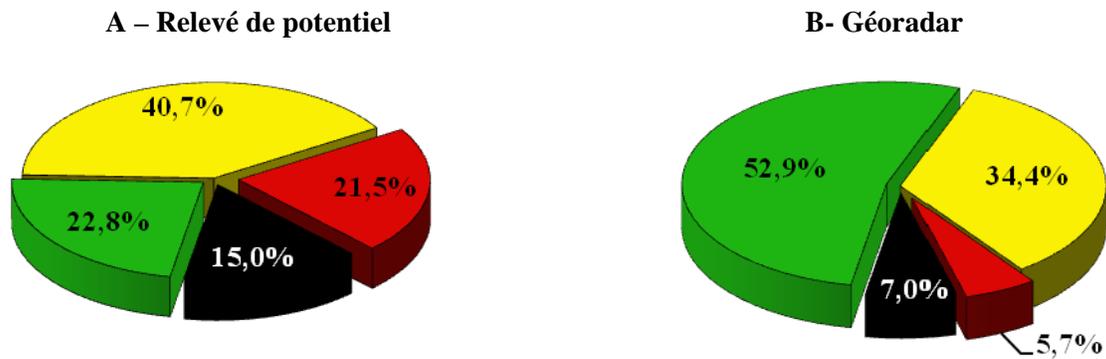


Figure 6 : Pourcentage des niveaux d'activité de corrosion (section S1)

Pour la section S1, le relevé de géoradar a permis d'identifier un plan de délaminage dans un secteur précis du tablier au niveau du premier rang d'armature (à une profondeur de 75-80 mm). Afin de valider cette information, des carottes (CR-8 et CR-30) ont été prélevées dans la zone problématique.

Les observations visuelles réalisées sur les carottes CR-8 et CR-30 ont démontré que le premier rang d'armature présente effectivement des signes de corrosion (Figure 7). De plus, les essais de teneurs en ions chlorures réalisés sur ces mêmes carottes présentent de fortes concentrations, et ce, jusqu'à une profondeur de 110 mm, soit plus de la moitié de l'épaisseur théorique de la dalle.



Figure 7 : Carottes de béton prélevées dans une zone où l'activité de corrosion est élevée

3.3 Résultats de la section S2

Pour la section S2, les cartographies obtenues par les méthodes de relevé de potentiel et par géoradar sont présentées à la Figure 8. Les pourcentages des niveaux d'activité de corrosion sont présentés à la Figure 9. Tout comme la section S1 présentée précédemment, les zones d'activité de corrosion sont généralement similaires. Par contre, on peut remarquer que le géoradar a mis en évidence un secteur où l'activité de corrosion est plus élevée (Figure 8B section hachurée). Cette différence est due à l'altération des signaux provoquée par une variation dans l'épaisseur de l'enrobé bitumineux. En effet, après l'analyse des carottes prélevées dans la section S2, une épaisseur de pavage pouvant atteindre 60 mm a été mesurée dans la section hachurée, alors que l'épaisseur moyenne observée sur le reste de la section S2 était de 35 mm.

Pour la section S2, l'activité de corrosion est généralement faible ou initiée. Pour les deux méthodes, ces deux zones d'activité de corrosion représentent plus de 90 % de la superficie expertisée. Tout comme la section S1, on peut constater que les zones où l'activité de corrosion est élevée (zones rouges et noires) ont similairement été identifiées par les deux méthodes.

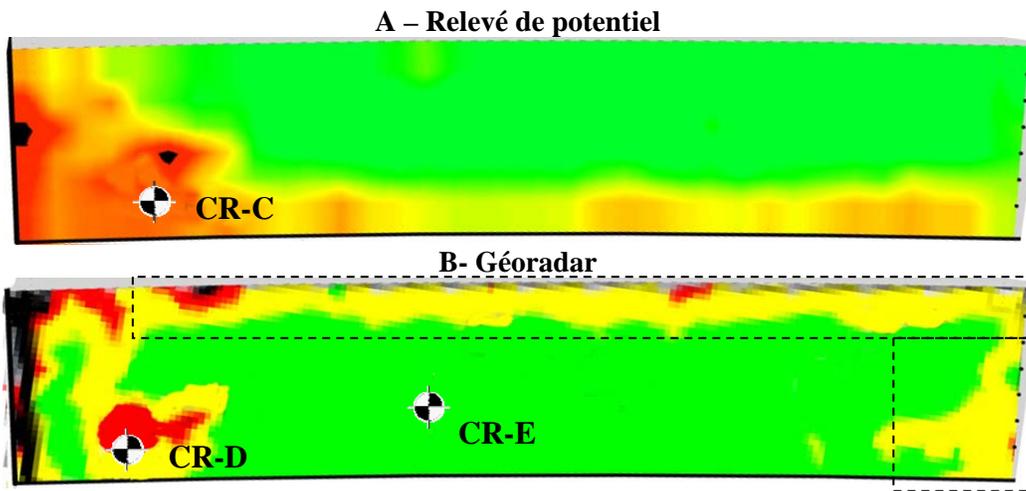


Figure 8 : Cartographies de l'activité de corrosion des armatures (section S2)

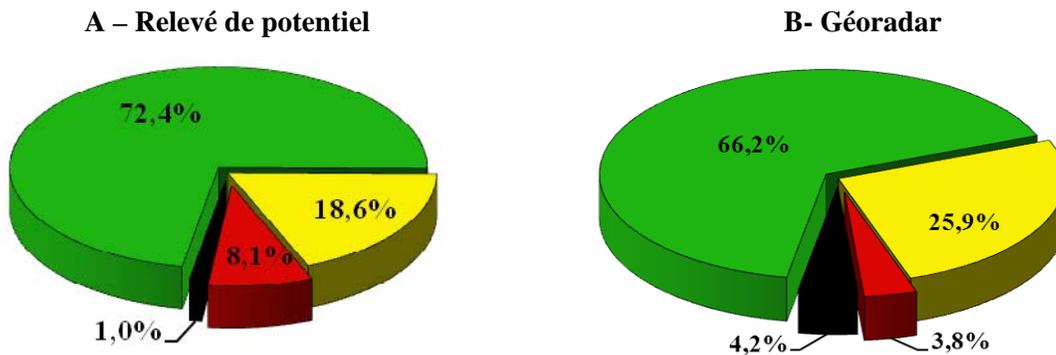


Figure 9 : Pourcentage des niveaux d'activité de corrosion (section S2)

Les observations visuelles réalisées sur la carotte CR-35, prélevée dans une zone où l'activité de corrosion est très avancée (Figure 10A), démontrent que le premier rang d'armature présente des signes de corrosion avec un début de perte de section. La carotte CR-1, prélevée dans une zone où l'activité de corrosion est avancée, ne contient pas d'armature, mais présente de la fissuration transversale au niveau du premier rang d'armature qui a généralement été observée sur les autres carottes prélevées dans la section S2 (Figure 10B). Aucun signe de corrosion n'a été observé sur l'armature de la carotte CR-36 qui a été prélevée dans une zone où l'activité de corrosion est faible (Figure 11). Cependant, comme on peut le constater sur la Figure 11, des produits de corrosion ont été observés sur la surface de béton qui entoure l'armature. Ces produits étant apparus après les opérations de carottage, il faut donc être vigilant sur l'évaluation du niveau de corrosion des armatures.

Les essais de teneurs en ions chlorures réalisés sur les carottes prélevées dans des zones où l'activité de corrosion est élevée présentent de fortes concentrations, et ce, jusqu'à une profondeur de 130 mm soit près de 65 % de l'épaisseur théorique de la dalle. Les teneurs en ions chlorure réalisées sur la carotte CR-36 (activité de corrosion faible) sont inférieures à la valeur limite prescrite par le *Manuel d'entretien des structures* du MTQ [3] sur toute la profondeur du tablier.



Figure 10 : Carottes de béton prélevées dans une zone où l'activité de corrosion est élevée

A – CR-E



Figure 11 : Carotte de béton prélevée dans une zone où l'activité de corrosion est faible

4 Conclusion

L'expertise réalisée sur l'autoroute Dufferin-Montmorency a permis de comparer l'activité de corrosion mesurée par les méthodes de relevé de potentiel et de géoradar. Dans le cadre de cet article, seulement deux sections des tabliers expertisés sont présentées. Pour la section S1, l'activité de corrosion mesurée par la méthode du géoradar est généralement plus faible que celle mesurée par la méthode du relevé de potentiel tandis que pour la section S2, l'activité de corrosion est plutôt similaire. Malgré les différences observées, les deux méthodes ont permis d'identifier les zones qui présentent une activité de corrosion élevée. En plus de mesurer l'activité de corrosion, le géoradar a permis de visualiser sous forme d'image les dégradations reliées à la corrosion des armatures dans le tablier. Pour la section S1, une zone de délaminage a pu être identifiée et confirmée par des opérations de carottage.

En conclusion, le choix de la méthode pour évaluer l'activité de corrosion est principalement fait en fonction des besoins. La méthode de relevé de potentiel est une méthode robuste qui permet d'obtenir une lecture directe de l'activité de corrosion tandis que la méthode de géoradar requiert une analyse approfondie des résultats pour obtenir l'activité de corrosion. La méthode du géoradar permet par contre d'obtenir beaucoup plus d'informations sur la dalle. Si seulement l'activité de corrosion doit être mesurée, la méthode de relevé de potentiel risque d'être plus précise. Si, par exemple, l'épaisseur de pavage ou la profondeur des rangs d'armature doit être obtenue, la méthode du géoradar risque d'être plus avantageuse et économique. Il est donc très important de connaître ses besoins avant de faire le choix d'une des méthodes.

5 Références

- [1] : ASTM C 876 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, *Norme ASTM*, 1991, réapprouvée en 1999.
- [2] : ASTM D6087 Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar, *Norme ASTM*, 2008.
- [3]: Manuel d'entretien des structures, Ministère des Transports du Québec, 2010.