

Progrès récents dans la cartographie de la corrosion des dalles de pont en béton

Thikra Dawood, Mona Abouhamad, Ahmad Shami, Tarek Zayed
Dept. of Building, Civil, and Environmental Engineering, Concordia Univ., 1515 Sainte-Catherine St. W., Montréal, QC, Canada H3G 1M7

Kien Dinh

Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT), Rutgers, The State 11 University of New Jersey, 100 Brett Rd, Piscataway Township, NJ 08854

Résumé

Le potentiel du géoradar est reconnu depuis les années 80, mais l'utilisation de la cartographie d'amplitude (ASTM 6087), une méthode qui a de certaines lacunes, comme la technique préconisée d'interprétation, a retardé son acceptation dans l'industrie. Ces lacunes sont reflétées dans la sélection des seuils; l'incapacité de déterminer le degré de corrosion, la durée de l'analyse et la quantité d'informations perdues dans une telle analyse. Le projet de recherche actuel évalue les détails d'une procédure alternative pour la cartographie de corrosion, basée sur l'analyse d'images géoradar. Le concept et les fondations de cette méthode de cartographie furent présentés au Colloque des ouvrages d'art il y a quatre ans (Francois St-Pierre et al, 2010; Alex Tarussov et al, 2010).

L'équipe de recherche de l'université Concordia, avec le support financier du Ministère des Transports du Québec (MTQ), vise à surmonter les inconvénients de la méthode d'amplitude et à développer davantage l'analyse d'images géoradar. Une méthode à cinq phases est présentée pour l'interprétation des profils de géoradar. Au cours de ces recherches, plusieurs relevés ont été effectués et comparés avec des sources d'information variées sur l'état actuel des dalles de pont. Les données furent analysées par les méthodes d'amplitude et d'analyse d'images pour deux cas d'études: un à Montréal (l'autoroute 40) et un dans le New Jersey (NJ, USA). Les résultats démontrent l'efficacité et la supériorité de la méthode d'analyse d'images géoradar pour l'identification d'anomalies, ainsi que pour une cartographie de la probabilité de corrosion. Les deux méthodes de cartographie sont vérifiées en utilisant des photos prises sur site. Les résultats démontrent que la cartographie par l'analyse d'images géoradar est corrélée avec l'analyse de photos prises de dessous des dalles de pont. De plus, l'évolution de la corrosion sur une période de cinq ans sur le pont du New Jersey est clairement démontrée, montrant la précision et la fiabilité de cette méthode d'analyse, qui est aussi plus rapide et plus robuste (moins sensible à la qualité des données) que la cartographie d'amplitude. Les lacunes de cette nouvelle méthode comprennent le besoin d'un analyste hautement qualifié et une nature subjective du processus de classification, qui seront abordées et possiblement résolues lors de futures activités de recherche. Le présent projet de recherche permet d'être optimiste quant à la fiabilité de la méthode d'interprétation d'images géoradar en termes de précision, et d'efficacité.

1 INTRODUCTION

L'administration fédérale américaine des autoroutes (FHNA) a estimé que 170 milliards de dollars américains sont nécessaires chaque année pour améliorer les conditions et les performances des autoroutes (ASCE, 2013). De même, l'Association Canadienne du Transport Urbain (ACTU) a estimé que les infrastructures de transport avaient besoin d'un total de 53 milliards de dollars canadiens en 2013 (ACTU, 2013).

En réalité, l'augmentation croissante du vieillissement et de la détérioration des infrastructures dans plusieurs pays a créé le besoin de développer un système d'inspection plus détaillé et efficace. Le but de ce système est de fournir suffisamment de données pour la prise de décision en entretien et l'allocation budgétaire.

On trouve qu'aux États-Unis et au Canada, l'évaluation des conditions des infrastructures en béton est basée généralement sur l'inspection visuelle (IV). Avec cette méthode, des informations précieuses sur la condition de l'infrastructure sont obtenues. Néanmoins, ces informations sont considérées comme qualitatives et subjectives par rapport à la connaissance et jugement des inspecteurs (Jain et Bhattacharya, 2011).

La détérioration des infrastructures est souvent un phénomène qui commence à l'intérieur et qui augmente par sévérité avant de se propager et d'atteindre la surface. Ainsi, les défauts internes non détectés lors de sa présence et avec un entretien reporté peuvent provoquer au cours du temps une détérioration et un endommagement de structure. Par conséquent, le fait de maintenir la condition de l'infrastructure constitue un défi important afin d'identifier les défauts invisibles avant qu'ils deviennent trop sévères et critiques (Belli et al., 2008). En revanche, différentes techniques d'évaluation non destructive (END) sont utilisées dans le but d'évaluer et de quantifier les défauts internes invisibles. L'une des technologies communes d'END utilisées est le géoradar (ou GPR) qui a démontré un potentiel élevé pour évaluer la condition des structures en béton depuis plus de 30 ans (Ulriksen, 1982). Cependant, cette technique est considérée comme une pratique limitée car elle ne fournit pas souvent des résultats fiables (Dinh et al., 2013). De plus, ses principales limites sont au niveau de l'analyse des données obtenue lors de l'inspection et non au niveau de l'équipement de géoradar (Dinh et al., 2013), (Tarussov et al., 2013), (Saint-Pierre et al., 2010).

Dans cette recherche, les principes de géoradar sont expliqués et la méthodologie sera illustrée étape par étape dans la suite. De plus, une méthode d'interprétation visuelle assistée par ordinateur est décrite. Ensuite, trois études de cas réalisées par notre équipe de recherche sont présentées avec différentes techniques afin de comparer leurs résultats et prouver la robustesse des concepts de la nouvelle méthodologie.

2 AXES DE RECHERCHE

L'objectif principal de cette recherche est de définir les principaux critères d'interprétation des profils de géoradar et d'identifier les raisons de l'atténuation des signaux enregistrés lors de l'inspection de l'infrastructure. De plus, pour s'affranchir des limitations de l'analyse des données de géoradar et pour évaluer la condition des infrastructures en béton, différents sous-objectifs sont définis ci-dessous:

- Identifier et étudier les méthodes actuelles de l'analyse des données de géoradar.
- Présenter une méthode détaillée d'analyse pour les profils de géoradar et l'évaluer en se basant sur l'analyse visuelle de l'image.

- Illustrer les différents cas de l'atténuation du signal, ainsi que l'atténuation visible, en même temps que leurs causes afin de clarifier le concept de la technique d'analyse d'image.

3 CONTEXTE

3.1 Le géoradar

Le géoradar est une technologie utilisée pour déterminer la position et profondeur d'objets dans les matériaux non-conducteurs comme le béton, sol, glace, etc. Son principe est basé sur le comportement de la propagation d'onde électromagnétique (EM) dans un milieu. Quand l'onde électromagnétique rencontre une interface entre deux milieux de constantes diélectriques différents, une partie de l'énergie de l'onde est réfléchie et la reste se propage à travers l'interface du milieu suivant comme le montre la Figure 1. Ensuite, grâce à l'enregistrement et l'analyse des formes d'onde réfléchie obtenues, les différentes couches de la structure ainsi que les défauts peuvent être identifiés et détectés facilement.

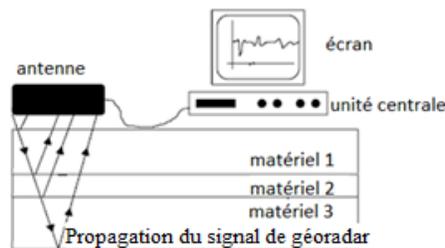


Figure 1: Les principes de géoradar (Hugenschmidt & Mastrangelo 2006)

Pour inspecter une structure, comme un enrobé, un garage ou une dalle de pont, une antenne est traînée le long de la structure. Cette antenne va émettre de courtes impulsions d'énergie électromagnétique dans la structure. Les signaux réfléchis sur les différentes interfaces de la structure sont reçus par une autre antenne (mode bistatique), ou parfois par la même antenne (mode monostatique). Les signaux reçus par l'unité centrale sont acquis sous forme des signaux A-scan qui possèdent la propriété électromagnétique du milieu. Ce processus est répété à une certaine fréquence (généralement 100 kHz), pendant que l'antenne est déplacée le long du trajet de la partie à inspecter. La sortie se présente ensuite sous forme d'image en nuances de gris (ou de profil de géoradar B-scan), comme le montre la Figure 2.

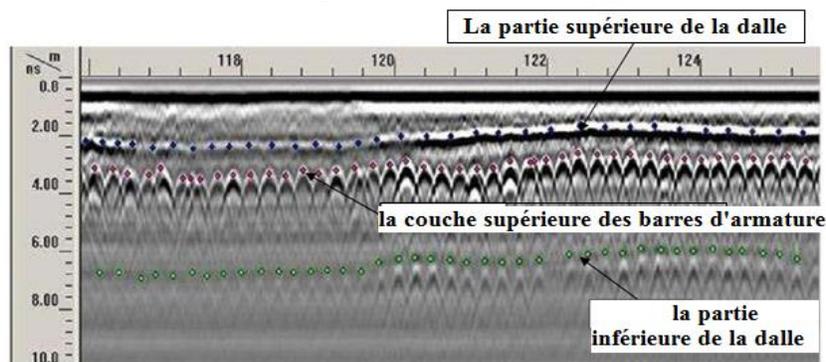


Figure 2: Exemple du profil de géoradar pour la dalle de pont en béton

3.2 Méthode d'analyse d'amplitude (numérique)

De nombreux chercheurs ont étudié les méthodes d'analyse des données de géoradar pour évaluer la condition des structures en béton et en particulier les dalles de pont. Malgré les différentes méthodes d'analyse proposées par les chercheurs (Chung et al., 1992, Chung et al., 1993, Barnes & Trottier, 2004, Tarussov et al., 2013, Dinh et al., 2013), la méthode d'analyse numérique de l'amplitude de réflexion est la méthode la plus utilisée pour interpréter les données de géoradar. Son principe est basé sur les mesures des amplitudes des signaux réfléchis sur les différentes interfaces du milieu. Ces signaux varient en fonction des paramètres électriques du milieu tels que : la conductivité et la constante diélectrique.

Ces deux paramètres augmentent avec la présence d'humidité, la teneur en chlorure et la rouille sur les signaux géoradar enregistrés. Dans ces cas, l'analyste peut déterminer à partir des signaux de géoradar enregistrés l'état de la dalle de béton en fonction de l'amplitude de réflexion normalisée à la surface extérieure de béton, sur la face inférieure de la dalle ou sur le quadrillage d'armature supérieure.

La cartographie de l'amplitude consiste à mesurer les amplitudes de réflexion sur le quadrillage d'armature supérieure de toute la zone et les tracer avec des lignes de contour. Selon Parrillo et al. (2006), l'ampleur de la détérioration ne doit pas être déterminée en se basant uniquement sur les couleurs de la carte de contour. Il a souligné que même une nouvelle dalle peut contenir une certaine gamme d'amplitudes de réflexion en raison de la variation de la profondeur des barres d'armatures. Pour la même raison, Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI) estime que cette technique d'interprétation d'amplitude n'est pas appropriée pour une dalle sans détérioration ou avec une détérioration quasi totale (GSSI, 2012). Même, pour une dalle de pont avec une détérioration moyenne, en plus de la variation de la profondeur de barres d'armature, il existe encore plusieurs facteurs qui peuvent conduire à l'inefficacité de l'analyse des amplitudes de réflexion (Tarussov et al., 2013). Ces facteurs comprennent notamment la variation de la profondeur de barres d'armature, l'espacement entre les barres d'armature, les propriétés de la surface, la configuration structurale et la qualité de la construction.

3.3 Méthode d'analyse d'image des profils de géoradar

Généralement, la méthode d'analyse visuelle est basée sur la reconnaissance d'images typiques dans les signaux de géoradar. Dans la littérature, Tarussov et al. (Tarussov et al., 2013) ont proposé une procédure améliorée de cartographie de corrosion pour les données géoradar des structures en béton en utilisant l'analyse d'image à balayage linéaire. Cette méthode nécessite la présence d'un analyste pour parcourir chaque profil de géoradar et marquer les régions détériorées en se basant sur des signes visuels de détériorations bien définis. Les profils traités sont ensuite regroupés par un logiciel spécialisé pour générer une cartographie de la détérioration. Comme on peut le déduire, le concept derrière l'analyse à base visuelle est intuitif et facile à comprendre.

Dinh et al. (Dinh et al., 2013) ont continué la recherche en développant une méthode détaillée basée sur l'analyse d'image afin d'évaluer et cartographier les données de géoradar pour les dalles en béton. Par ailleurs, Dinh et Zayed (Dinh & Zayed, 2014) ont utilisé la méthode d'analyse de corrélation comme une technique de traitement du signal afin de comparer chaque « A-scan » de géoradar pour interpréter les conditions des dalles de pont en béton. Cette recherche définit les différentes étapes de la méthode d'interprétation visuelle initialement proposée par Tarussov et al.

(Tarussov et al., 2013) validée et expliquée par notre équipe de recherche.

4 MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

La démarche systématique de la méthode d'analyse visuelle des profils de géoradar pour les structures en béton est illustrée dans la Figure 3. Ces cinq étapes sont présentées par la suite:

Étape 1 : Établir des lignes de balayage ou des grilles: après une étude approfondie de la zone à scanner, l'inspecteur prépare un plan sur lequel il détermine les lignes de balayage ou les grilles.

Étape 2 : Rassembler les données de géoradar : à cette étape, l'inspecteur commence à parcourir chaque ligne déterminée lors de la précédente étape afin de rassembler les données (profils de géoradar).

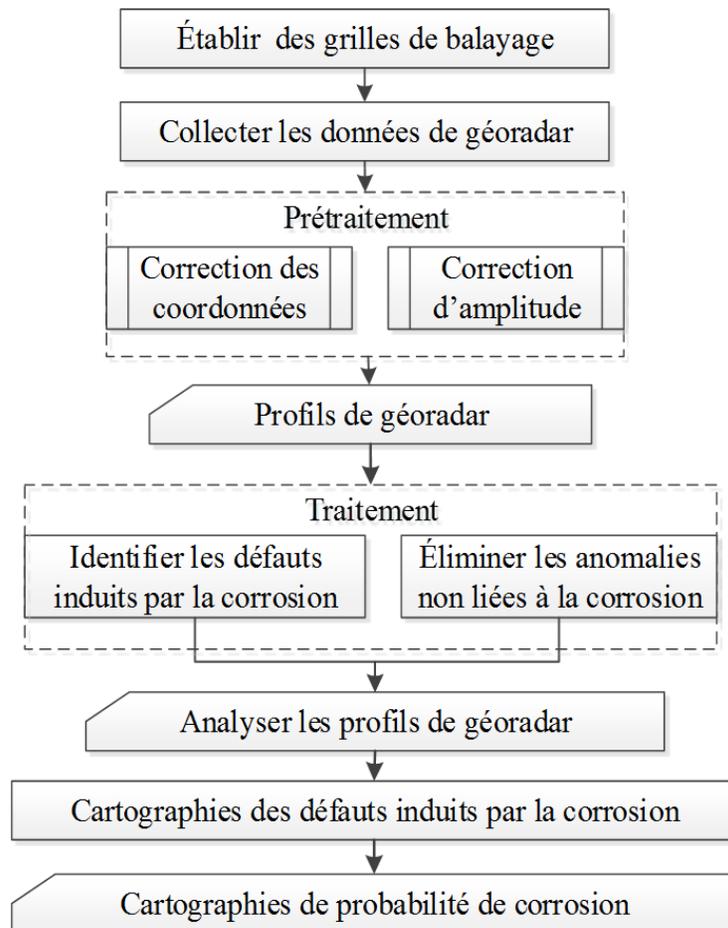


Figure 3: L'organigramme de la méthodologie

Étape 3 : Prétraitement des données de géoradar: Chaque profil de géoradar est traité et organisé dans une grille de données avant qu'il soit prêt à l'analyse pour corriger les coordonnées et amplitudes. La sortie de cette étape est une grille bidimensionnelle des profils de géoradar

prétraités. Contrairement à la méthode d'analyse d'amplitude qui utilise les données avec une valeur de gain constant, l'analyse visuelle d'image est effectuée sur des profils de géoradar optimisés pour visualiser avec un gain différentiel approprié.

Étape 4 : Traitement des données de géoradar: Identifier les défauts associées à de la corrosion et éliminer les anomalies non liées à la corrosion (voir Figure 4). Plus précisément, chaque profil de géoradar est analysé et les régions associées aux zones détériorées sont marquées. L'identification des défauts induits par la corrosion est basée sur la compréhension de la structure inspectée tout en tenant compte des paramètres suivants:

1. Atténuation du signal, compte tenu de :
 - a) L'amplitude de la barre d'armature supérieure
 - b) L'amplitude de la barre d'armature inférieure
2. L'amplitude de dessous de la dalle
3. Déformation des hyperboles
4. Changement de la vitesse de radar
5. Fissures visibles /Délaminage

Les paramètres ci-dessus sont pris en considération comme étant les plus représentatifs de la condition d'une activité corrosive dans la dalle. Ainsi, d'autres facteurs doivent être pris en considération pour éliminer des anomalies sans rapport avec la corrosion comme:

1. Les structures de supports tels que les poutres principales et les colonnes
2. La variation de l'alignement, de la profondeur et de l'espacement des barres d'armature
3. Les réparations antérieures
4. Les anomalies de la surface

Ces facteurs sont les principales causes d'erreur dans l'analyse d'amplitude des données, mais ils sont facilement reconnus et éliminés dans l'analyse visuelle d'image.

Étape 5 : Cartographier les zones dégradées qui sont identifiées par l'analyse d'images de géoradar: Dans cette étape, les régions marquées qui sont associés à chaque profil de géoradar de l'étape 4 sont mappées à la grille préparée à l'étape 3. Ensuite, une cartographie de condition complète de la structure est produite en connectant les mêmes types de région à partir des lignes scannées séparément. Dans ce processus, l'organigramme illustré à la Figure 4 doit être suivi tout en gardant les instructions suivantes:

- La corrosion modérée qui est invisible au niveau supérieur des barres d'armature est visible au niveau inférieur des barres d'armature à travers l'atténuation du signal.
- Le niveau inférieur des barres d'armature est généralement plus sensible à l'atténuation du signal que le niveau supérieur des barres d'armature. Ceci est prévu puisque le signal s'atténue en raison de son passage à travers le béton très profond avec des barres d'armature corrodés ou dans une condition apte à la corrosion.
- Un élément de support (poutre) peut être identifié dans un profil de géoradar à partir des signes suivants:
 - Le signal disparaît rapidement, accompagné en même temps de la disparition de la base (sans l'atténuation du signal ou affaissement).
 - Les barres renforcées qui sont ajoutées, elles sont accompagnées brusquement par une base manquante (la configuration des barres apparaît changée sur le profil de géoradar).

- L'atténuation du signal est due à l'existence des barres d'armature longitudinales supérieures.

Selon ces instructions, la corrosivité du béton pourrait être identifiée en se basant sur le degré d'atténuation du signal dans ces profils. D'après le degré d'atténuation de signal, le béton peut être classé selon les trois états suivants: (i) béton sain, (ii) béton avec une corrosion modérée probable et (iii) béton avec une corrosion sévère probable. Le tableau 1 présente les différents états précédents avec leurs descriptions correspondantes.

Tableau 1: Définition typique de différentes conditions par l'analyse d'image des profils de géoradar

Béton Sain Probable	Corrosion Modérée Probable	Corrosion Sévère Probable
La réflexion de la barre d'armature est forte avec une forme claire et uniforme de l'hyperbole	La réflexion de la barre d'armature est relativement faible, mais la forme de l'hyperbole est bien visible	L'atténuation est forte au niveau de la barre d'armature supérieure; La forme hyperbolique de la réflexion de la barre d'armature est déformée ou quasi-invisible

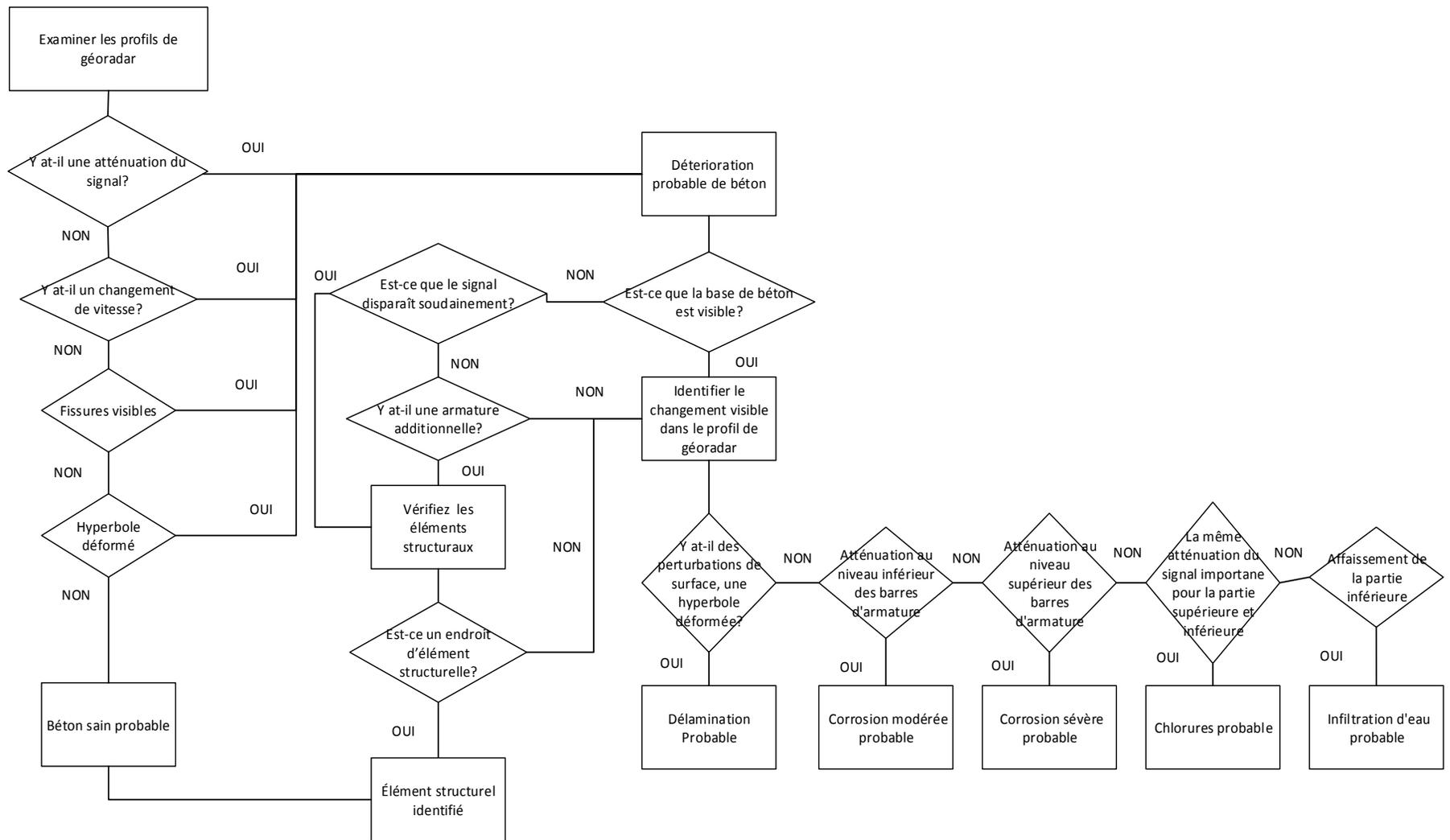


Figure 4: Organigramme illustrant l'interprétation à base visuelle des profils de géoradar

5 EXEMPLES D'ANALYSE DES PROFILS DE GÉORADAR

Les différents cas de l'atténuation du signal ainsi que leurs causes sont mis en évidence afin de clarifier le concept de la méthode d'analyse visuelle d'image. La Figure 5 illustre un profil de géoradar pour une dalle de pont en béton sans asphalte. Le profil montre un béton sain dans la partie gauche de la figure où les signaux reçus sont solides et un béton corrodé aux deux endroits marqués. A ces deux derniers, les signaux sont atténués et les parties inférieures semblent être affaissées.

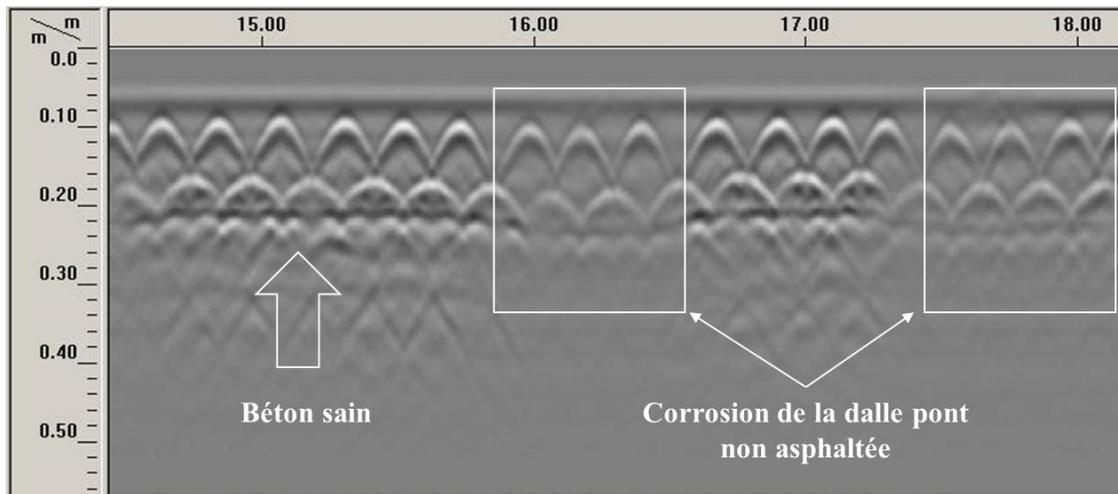


Figure 5: Atténuation du signal causée par la corrosion de la barre d'armature

La finesse de l'analyse d'images de géoradar est illustrée dans la Figure 6. Dans cet exemple la dalle en béton est en bon état mais le signal obtenu présente une forte atténuation à cause de la saturation de chlorures dans la couche mince d'enrobé sur la partie supérieure du pont. C'est l'atténuation uniforme en profondeur qui révèle la saturation de chlorures en surface et non pas la corrosion comme la cause de l'anomalie observée. La zone atténuée est suivie à droite par une section sans asphalte avec une forte visibilité du signal identifié comme un béton sain.

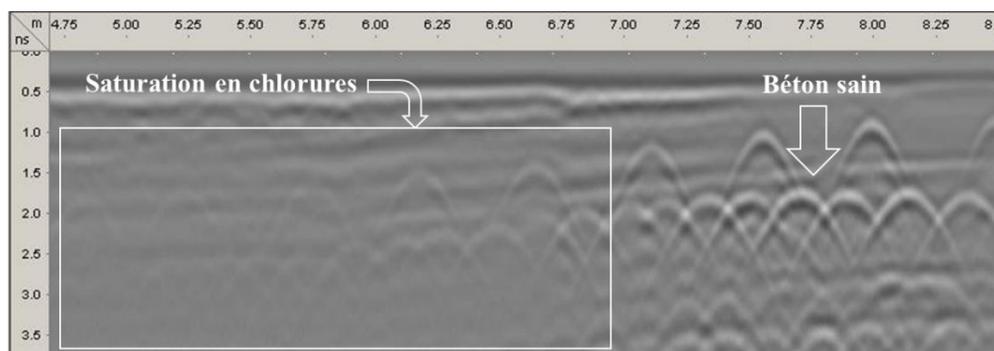


Figure 6: Atténuation du signal due à la présence du chlorure dans le béton

Dans la Figure 7, il semble y avoir une atténuation de signal dans deux endroits différents. Cependant, on remarque qu'à la partie gauche du premier endroit, le signal réfléchi est absent, tout

simplement parce qu'il y a une poutre de support en béton à cet endroit qui a été placé directement sous un autre béton de même paramètres électriques. Par conséquent, ces deux structures en béton agissent comme un seul milieu diélectrique, homogène, dont le signal de géoradar passe simplement à travers l'interface physique avec ou sans changement dans son énergie. Une certaine atténuation du signal peut être aussi due à l'effet 'de dispersion' de l'armature dans la poutre de support. D'autre part, dans la partie droite du deuxième endroit marqué, il existe une atténuation graduelle du signal caractérisée par un affaissement dans sa partie inférieure. Ceci indique que l'atténuation est due grâce au phénomène de corrosion. Enfin, le signal qui se trouve entre les deux endroits décrits précédemment présente d'après sa forme une partie de béton sain.

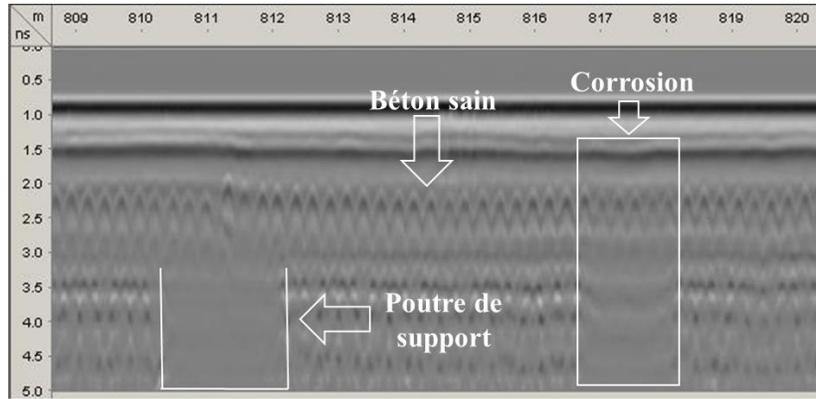


Figure 7: Profile de géoradar de poutre, par rapport à la corrosion

La Figure 8 représente à l'endroit marqué, le profil de géoradar d'une dalle de pont réparé. Il est intéressant de voir l'atténuation du signal au-dessous de la partie réparée qui indique l'existence d'une détérioration restante soit à cause de la réparation ou en raison d'une détérioration postérieure.

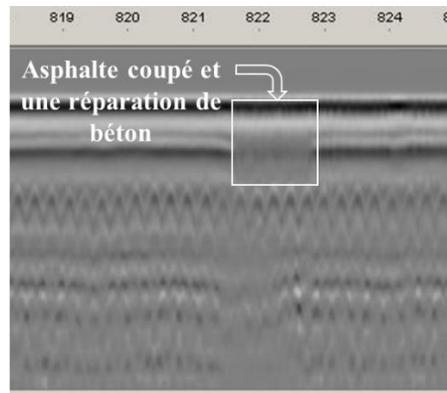


Figure 8: Ancienne réparation de pont; Certaines détériorations sont restantes (ou apparues plus tard) sous la partie réparée

La Figure 9 regroupe les différentes causes de l'atténuation de signal. La première partie marquée du signal atténué (à gauche) est due à l'existence du joint d'expansion en acier. La deuxième partie du signal atténué (au milieu) est provoquée par une coupure dans l'enrobé et une réparation dans

le béton. La déformation de la forme du signal dans la troisième partie marquée (à droite) indique une délamination et une corrosion probable.

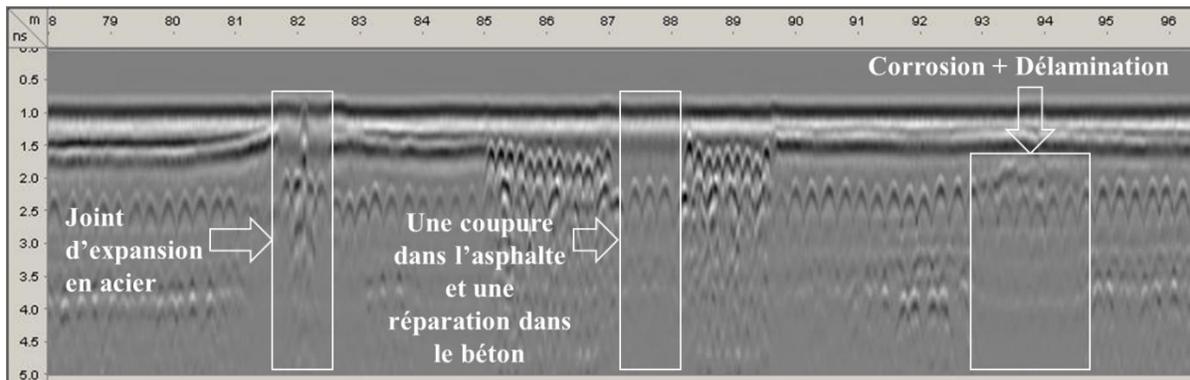


Figure 9: Atténuation de signal due à des différents anomalies et défauts

Sur la Figure 10, le signal est atténué deux fois dans le profil de géoradar due à une probable corrosion et délamination. La partie au milieu présente une forme solide de signal et il est interprété comme un béton sain.

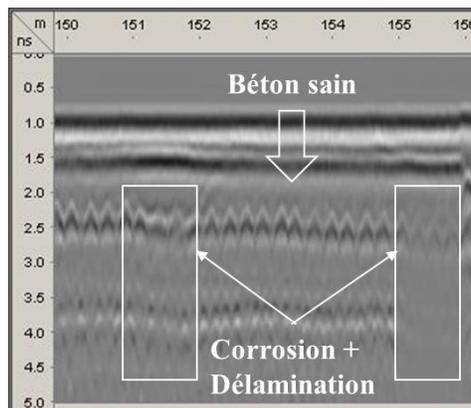


Figure 10: Atténuation du signal à cause de la délamination et de la corrosion

Dans la Figure 11, le rectangle de gauche illustre une perturbation dans le signal de géoradar à cause d'une coupure dans la couche de l'asphalte et une réparation dans le béton. Tandis que le rectangle à droite montre une atténuation du signal due à une accumulation d'eau sous l'enrobé décollé. Cette figure montre que l'atténuation du signal peut se faire en raison des différentes causes, qui ne sont pas nécessairement liées à des défauts provoqués par la corrosion dans le béton.

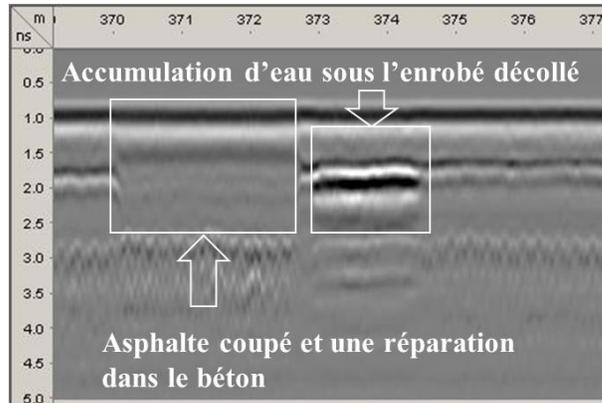


Figure 11: Atténuation du signal à cause des différentes anomalies dans le béton

La Figure 12 montre des barres d'armatures alignées et décalées qui provoquent une atténuation du signal de géoradar dans la structure en béton. Ce cas reflète aussi les différentes causes de l'atténuation d'un signal de géoradar, autres que des défauts dans le béton.

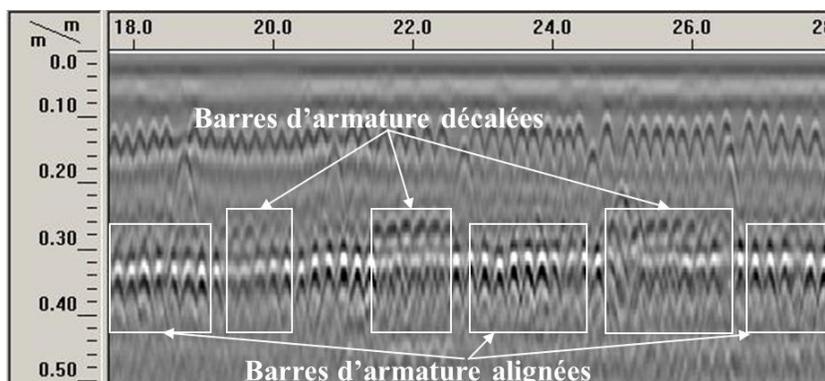


Figure 12: Atténuation de signal due à des barres d'armature décalées et alignées

Dans l'ensemble, les cas mentionnés ci-dessus expliquent les différents concepts de la méthode d'analyse d'image des profils scannés de géoradar. Ces profils sont appliqués directement et simplement intégrés dans un logiciel d'analyse appelé Radex, comme le montre la Figure 13.

Dans le logiciel d'analyse Radex, les principales étapes d'analyse d'image sont appliquées et les zones potentiellement détériorées sont marquées et identifiées comme dans le tableau 1. Les zones en couleur jaune indiquent une corrosion modérée probable et les zones en rouge présentent une forte probabilité des zones sévèrement corrodées. Les zones marquées sont alors allouées sur la carte de pont pour montrer les zones de corrosion probables qui constituent la cartographie de l'ensemble de pont.

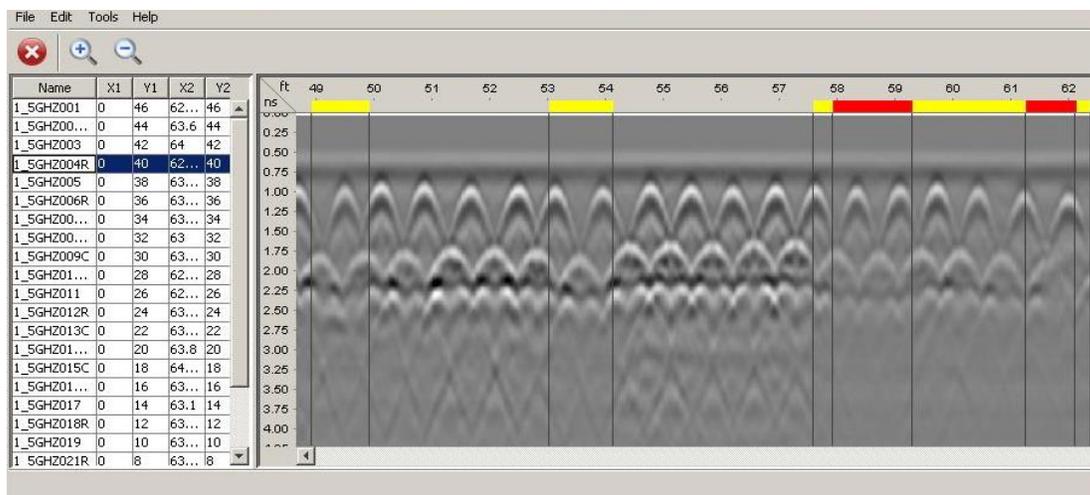


Figure 13: Exemple du logiciel pour l'analyse d'image

6 ÉTUDES DE CAS

La méthodologie d'analyse d'image proposée a été utilisée pour évaluer la condition d'une dalle de pont en béton. Les résultats de l'analyse d'image et l'analyse numérique sont à la fois présentés et comparés pour deux principales études de cas, un à Montréal (l'autoroute 40) et un dans le New Jersey (NJ), aux États-Unis.

6.1 Le pont de l'autoroute 40, Montréal, Canada

Ce pont possède une sévère corrosion sur les barres d'armature et des effritements de béton qui sont observable à plusieurs endroits dans le côté inférieur de la dalle. Les chercheurs ont scanné l'ensemble du pont avec le géoradar et ils ont cartographié l'activité de la corrosion probable. Pour chaque direction, 34 lignes d'arpentage ont été mis en place à 0,3m d'espacement. Le pont a été scanné par le GSSI, système de radar couplé au sol (SIR-3000 et le modèle d'antenne 5100-1,5GHz). Les données collectées sont ensuite traitées en utilisant les deux méthodes d'analyse, c'est-à-dire, l'analyse numérique et l'analyse d'images de profils de géoradar.

Comme pour l'analyse d'amplitude, la Figure 14 présente les différents problèmes auxquels l'analyste est confronté lors du traitement des données de géoradar. Tout d'abord, due à des réflexions chaotiques causées par des défauts réels ou par des configurations structurelles/matérielles, les réflexions des barres d'armature ne peuvent pas être sélectionnées à de nombreux endroits, même si pour certaines zones cette réflexion est visible. Par conséquent, pour ces endroits, l'analyste a été obligé de décider si l'armature doit être sélectionnée ou laissée. Plus précisément, si les barres d'armature ne sont pas retenues, il est évident que l'information d'amplitude est perdue à cet endroit. Tandis que si les barres d'armature sont sélectionnées, l'amplitude et le temps d'aller-retour des signaux ne restent pas précis. Aucune des deux options ne reflètent avec certitude la condition précise à cet endroit.

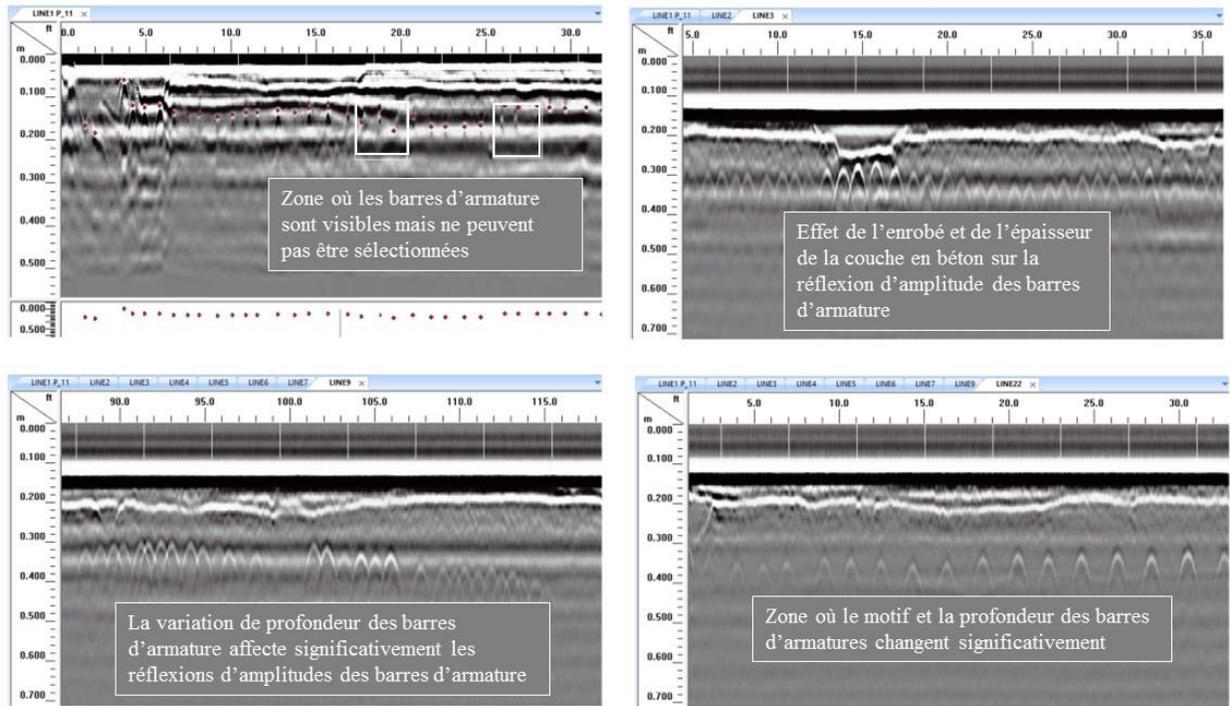
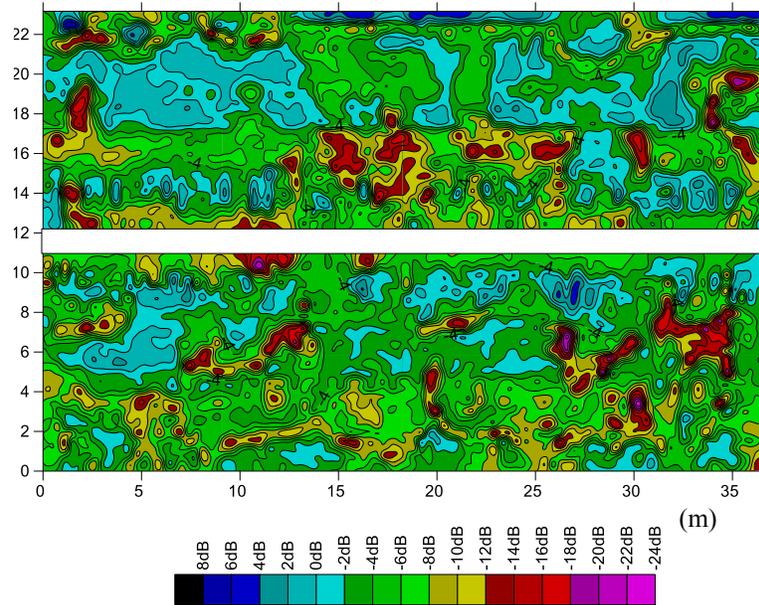


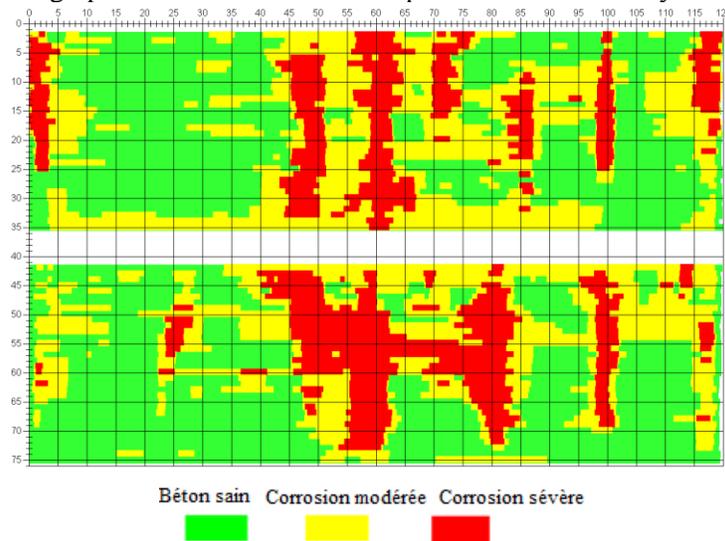
Figure 14: Les différents facteurs qui influent sur la réflexion d'amplitude de la barre d'armature

Ensuite, cette structure est considérée comme étant difficilement interprétable par le géoradar, en raison d'une épaisse couche d'asphalte (15 à 17 cm) sur le dessus de la dalle en béton de 30 à 35 cm d'épaisseur. Le dessous de la dalle n'est pas très reconnaissable dans les données collectées par le géoradar à partir de cette structure. De plus, avec l'épaisseur de l'enrobé et la variation de la profondeur des barres d'armature, il est apparu que l'analyse des amplitudes de réflexion des barres d'armature ne serait pas très fiable, même avec une correction de la profondeur. La raison est que la méthode de correction de profondeur, proposé par Barnes et al. (Barnes et al., 2008), dépend en grande partie sur le temps de vol de l'information pour ajuster l'amplitude. Cette méthode fonctionne bien lorsque le matériel est relativement homogène; cependant, pour une dalle en béton couvert d'asphalte, l'onde électromagnétique doit traverser à la fois l'asphalte et le béton avec des propriétés diélectrique et conductrices différentes. Par conséquent, la variation d'épaisseur de l'enrobé agirait comme un gain variable appliqué le long du profil et affecterait ensuite les amplitudes de réflexion des barres d'armature.

Pour comparer les résultats obtenus, une carte de la détérioration a été réalisée en utilisant les deux méthodes (l'analyse d'amplitude et l'analyse visuelle d'image) comme on le voit dans la Figure 15. Avant de procéder à l'analyse de l'amplitude et de produire la carte, une correction de profondeur a été appliquée (log-linéaire, avec une normalisation en dB sur l'axe vertical et la durée de parcours aller/retour sur l'axe horizontal). Pour la carte qui a été fournie par l'analyse d'images, il faut noter que la condition trouvée dans chaque profil est utilisée pour déduire la condition à sa zone adjacente (c'est-à-dire, la moitié de l'espacement de ligne scannée à partir de ligne scannée dans les deux côtés). La précision de chaque carte de condition est alors évaluée sur la base de signes de détérioration observée sur la face inférieure du pont.



(a) La cartographie d'atténuation obtenue par la méthode d'analyse d'amplitude



(b) La cartographie de corrosion obtenue par la méthode visuelle d'analyse d'image.

Figure 15: Comparaison entre les deux cartes de la condition de la dalle de pont pour l'autoroute 40 obtenues à l'aide des deux méthodes différentes.

La Figure 16 montre une bonne corrélation entre les conditions prévues par l'analyse d'image des profils géoradar et la réelle détérioration observée au-dessous de la dalle. Par contre, ce n'est pas le cas pour la carte d'atténuation obtenue par l'analyse d'amplitude, où il n'y a aucune similitude apparente avec le résultat de la méthode d'analyse d'image. La non uniformité de la structure de la dalle du pont, ainsi que d'autres facteurs discutés précédemment, peuvent affecter la précision des résultats de la méthode d'analyse d'amplitude dans cet étude de cas.

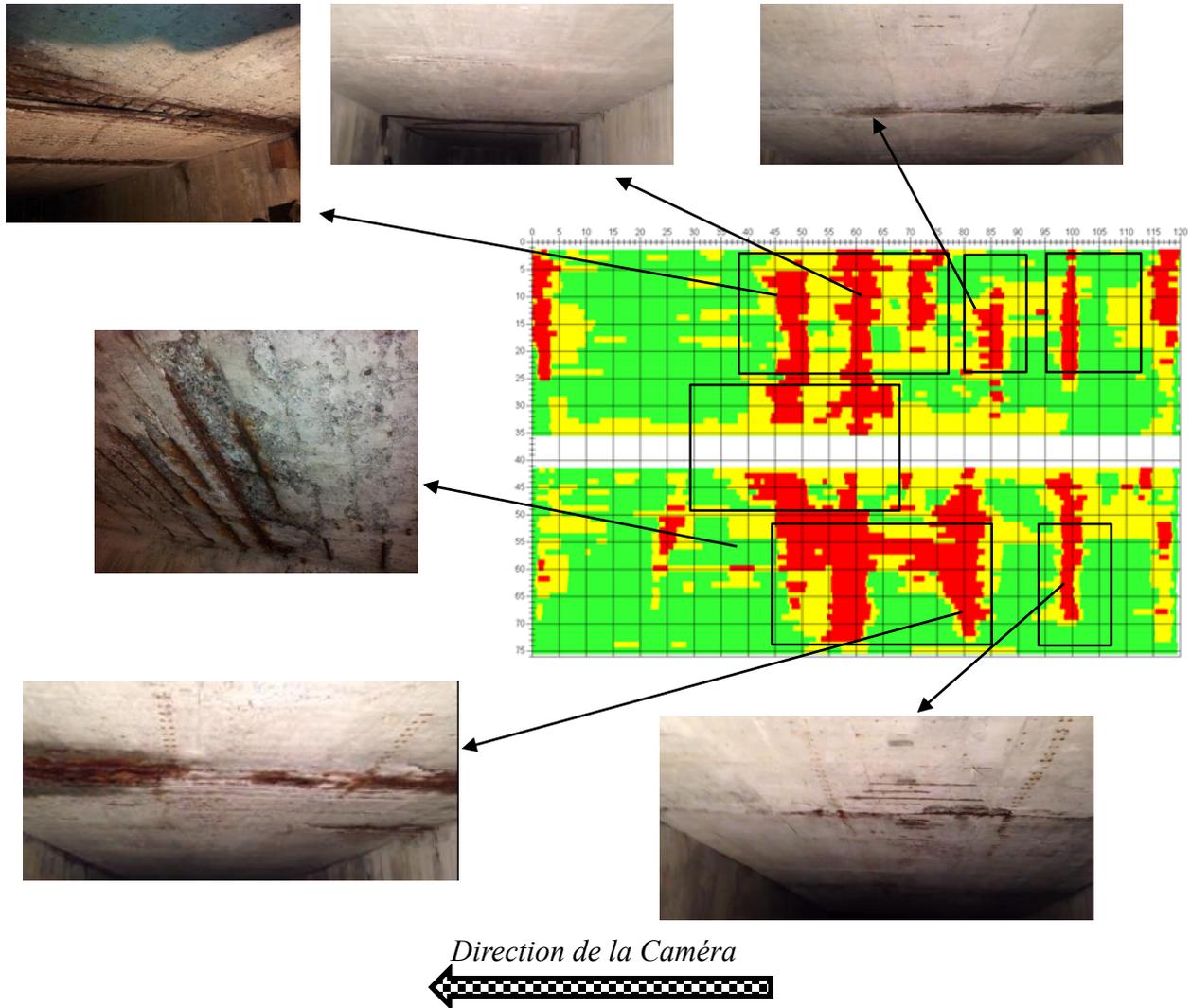


Figure 16: Corrélation entre l'analyse d'image des profils de géoradar et la réelle détérioration en bas de la dalle

6.2 Pohatcong Bridge, New Jersey, États-Unis

Le pont Pohatcong au New Jersey, a été construit en 1978 avec une dalle de béton apparente. La dalle de ce pont a été surveillée en utilisant le géoradar entre 2008-2013. Quatre ensembles de données de géoradar ont été collectées pour cette dalle en mai 2008, Juin 2012, Décembre 2012 et Septembre 2013, respectivement. Ces ensembles de données ont été collectées sur les mêmes lignes d'arpentage utilisant le même système GSSI (système de radar couplé au sol). Cependant, les trois premiers ensembles de données ont été collectées sur la base de la même machine prêtée par l'Université Rutgers, la quatrième a été collectée par l'équipe de recherche de l'Université Concordia en utilisant l'équipement prêtée par Détection Radex. Chaque ensemble de données contient 8 lignes de balayage avec un espacement de 0.6m (2pi) la première ligne est décalée de 10.3m (1pi) par rapport à la bordure. Ensuite, les données collectées ont été traitées en utilisant la méthode d'analyse numérique d'amplitude et la méthode d'analyse d'images de profils de géoradar. L'idée de base est qu'avec les données de séries chronologiques collectées durant la période 5 ans

d'étude, il est supposé que la progression de la détérioration sur le pont devrait être en quelque sorte observé comme une augmentation de corrosion. Cette hypothèse permet à partir des différents résultats d'analyse d'être vérifiée ou validée.

La Figure 17 illustre les cartes d'atténuation avec une correction de profondeur des quatre ensembles de données obtenues par la méthode d'analyse d'amplitude. Comme on peut le voir, les cartes indiquent une certaine détérioration entre Mai 2008 et Juin 2012, ensuite ironiquement la condition de pont semble s'améliorer. Plus précisément, la carte en Septembre 2013 est beaucoup mieux que toutes les précédentes cartes et sa gamme de réflexion en amplitude (spectre de couleurs) est beaucoup plus petite que celles des autres cartes.

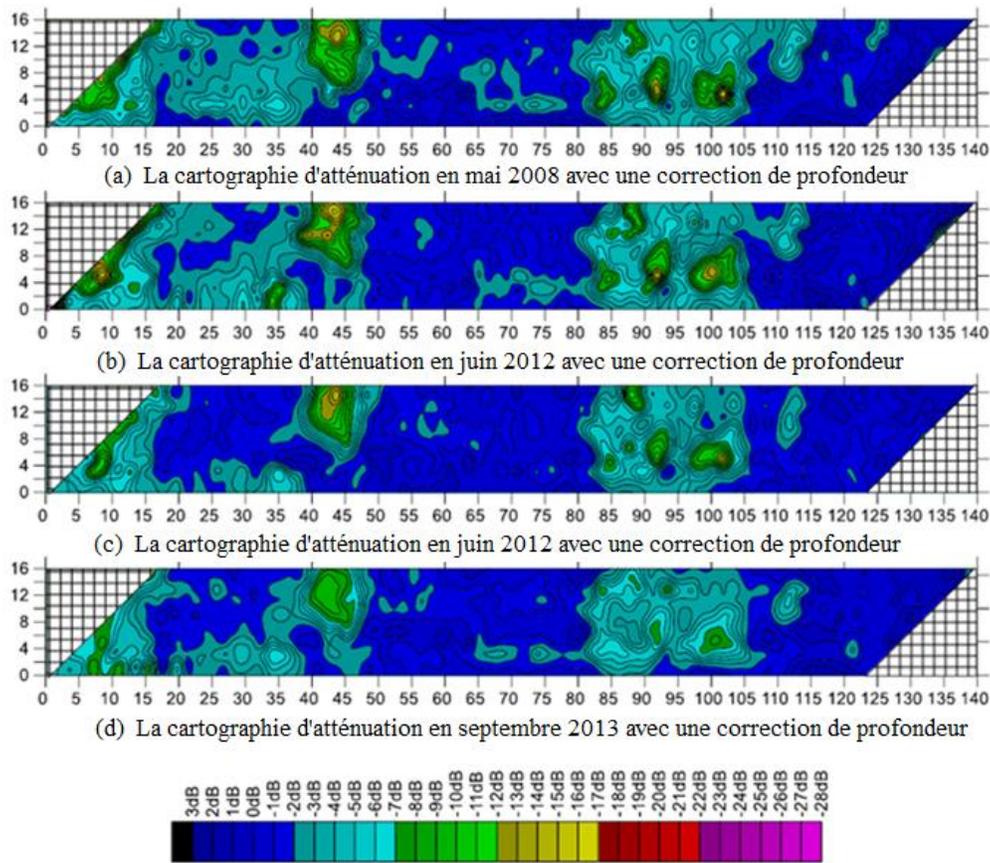


Figure 17: La cartographie d'atténuation pour quatre ensembles des données avec une correction de profondeur

Inversement à la méthode précédente, l'analyse d'image pour cette dalle de pont montre une augmentation progressive de la corrosion entre mai 2008 et septembre 2013, comme le montre la Figure 18. Cette méthode d'analyse fournit des résultats beaucoup plus raisonnables et stables puisqu'elle a présenté les progrès de la détérioration au cours du temps.

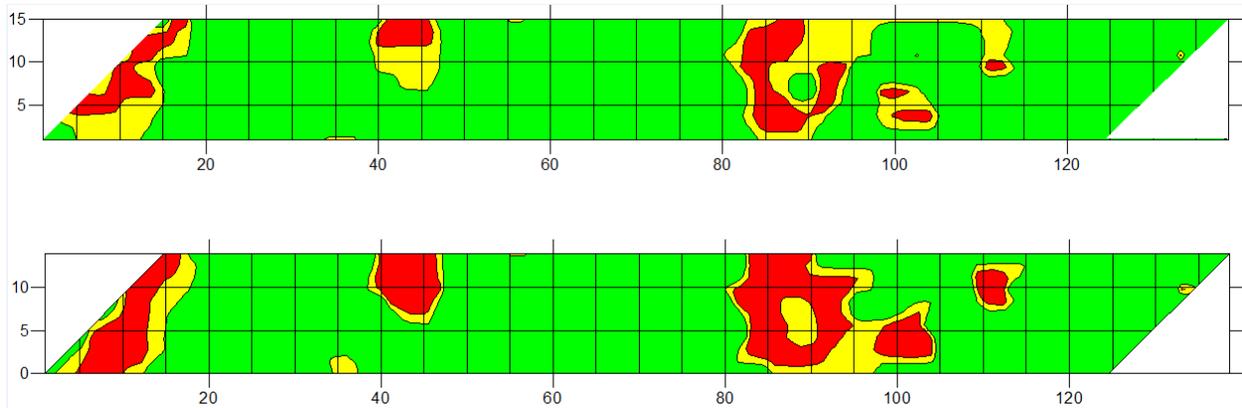


Figure 18: Analyse d'image des profils de géoradar entre mai 2008 (en haut) et septembre 2013 (en bas)

7 CONCLUSION

Dans la précédente publication de Tarussov et al. (Tarussov et al., 2013) , les auteurs ont présenté le concept et les avantages théoriques de la méthode d'analyse d'image sans explication comment les zones de corrosion sont identifiées dans les profils de géoradar ni validation expérimentale. Dans cet article, la méthode d'analyse d'image des profils de géoradar est détaillée et validée par des études de cas. La méthodologie a été présentée étape par étape afin d'identifier et de cartographier les problèmes de la corrosion dans les profils de géoradar pour une structure en béton. Les études de cas démontrent la précision accrue et l'efficacité de la méthode de l'analyse d'image par rapport à la méthode d'analyse d'amplitude. Dans la première étude de cas, une cartographie de probabilité de corrosion a été obtenue avec la méthode d'analyse d'image qui correspond beaucoup mieux à la réalité de terrain. Les résultats obtenus par la méthode d'amplitude ne présentent aucune corrélation par rapport à cette structure compliquée.

Dans la deuxième étude de cas, la méthode d'analyse d'image a présenté une bonne similitude entre les cartes de 2008 et 2013 ainsi que la précision d'analyse suffisante pour détecter la propagation de corrosion dans une période de seulement cinq ans. Ces résultats nous ont montré grâce aux cartographies de détérioration de séries chronologiques une augmentation constante de la corrosion, contrairement aux résultats de l'analyse d'amplitude qui montrent une amélioration étrange dans l'état du pont le long des années.

L'analyse d'image utilise le contenu entier de l'information d'un profil de géoradar, par contre la plupart des informations sont ignorées par l'analyse d'amplitude qui présente à la fin des erreurs d'analyse. La cartographie de corrosion par analyse d'images de géoradar offre donc des résultats plus clairs et plus précis que la méthode standard par analyse d'amplitude, surtout dans les cas complexes. Elle élimine et évite les points faibles de l'analyse numérique d'amplitude. Ceci permet d'obtenir une preuve solide du fait que l'analyse d'image de géoradar assistée par ordinateur offre une cartographie précise de la probabilité de corrosion des structures en béton pour l'évaluation de la condition non-destructive complète. La procédure de cartographie de corrosion par analyse d'image peut servir de base pour le développement futur d'une procédure automatisée et peut être incluse dans les normes et devis d'inspection des ouvrages d'art.

8 REMERCIMENTS

Les auteurs de ce rapport tiennent à remercier le ministère des Transports du Québec (MTQ) pour leurs soutiens financiers de la présente étude. Plus précisément, ils apprécient la coordination serviable de M. Louis Bélanger du bureau central des ponts et de tout le personnel du MTQ qui ont facilité l'enquête du géoradar sur le terrain. En outre, les auteurs aimeraient également remercier Détection Radex Inc., pour son soutien en équipement et en expertise.

9 REFERENCES

- American Society of Civil Engineers, ASCE, 2013, Report Card for America's Infrastructure, www.infrastructurereportcard.org/2013, surfed on 26th June 2014.
- Barnes, C., and Trottier, J.F. Effectiveness of Ground Penetrating Radar in Predicting Deck Repair Quantities, ASCE Journal of Infrastructure Systems, Vol. 10, No. 2, June, 2004, pp. 69-76.
- Barnes, C., Trottier, J.F., and Forgeron, D. Improved Concrete Bridge Deck Evaluation Using GPR by Accounting for Signal Depth-Amplitude Effects. NDT & E International, Vol. 41, Issue 6, 2008. 427-43.
- Belli, K., Wadia-Fascetti, S. and Rappaport, C. Model Based Evaluation of Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 23, Issue 1, 2008, pp. 3-16.
- Canadian Urban Transit Association, CUTA, 2013, Integrated Urban Mobility. From Here to There, www.cutaactu.ca, surfed on 26th June 2014.
- Chung, T., Carter, C.R., Masliwec, T., and Manning, D.G. Impulse Radar Evaluation of Asphalt-Covered Bridge Decks, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 28, No. 1, January 1992, pp. 125-137.
- Chung, T., Carter, C.R., Reel, R., Tharmabala, T., and Wood, D. Impulse Radar Signatures of Selected Bridge Deck Structures. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol. 1, September 1993, pp. 59-62.
- Dinh, K., Zayed, T., and Tarussov, A. GPR Image Analysis for Corrosion Mapping in Concrete Slabs. Presented at CSCE Conference, Montreal, Quebec, Canada, May 29 – June 1, 2013.
- Dinh, K., and Zayed, T., Innovative Method for Interpreting Ground-Penetrating Radar (GPR) Data from Concrete Bridge Decks. Transportation Research Board 93rd Annual Meeting. 2014. No. 14-1384.
- GSSI. RADAN 7 Manual. Geophysical Survey Systems, Inc. (2012).
- Jain, K. K., and Bhattacharjee, B. Application of Fuzzy Concepts to the Visual Assessment of Deteriorating Reinforced Concrete Structures. Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 138, Issue 3, 2011, pp. 399-408.
- Parrillo, R., Roberts, R. and Haggan, A. (2006). "Bridge Deck Condition Assessment using Ground Penetrating Radar." ECNDT Conference Proceeding, Berlin, Germany, pp. 25-29.
- Saint-Pierre, F., Houde, G., Carrier, M. and Philibert, A. Évaluation de L'état Des Ponts

Autoroutiers par Méthode RADAR : Corrélation Entre Les Méthodes de Traitements Qualitatives et Normalisées. Retrieved from the Ministry of Transportation of Quebec website:

http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/Librairie/Publications/fr/ministere/recherche/17e_colloque/10_mai_15h45.pdf , 2010.

Tarussov, A., Vandry, M. and De La Haza, A. Condition Assessment of Concrete Structures Using a New Analysis Method: Ground-Penetrating Radar Computer-Assisted Visual Interpretation. *Journal of Construction and Building Materials*, Elsevier Vol. 38, 2013, pp. 1246–1254.

Ulriksen, P., *Application of Impulse Radar to Civil Engineering*, PhD Lund University of Technology, Lund, Coden, Lutvdg (TVTG-1001), Sweden, 1982.