

EFFICACITE DU GEORADAR EN HIVER POUR L'AUSCULTATION DES OUVRAGES EN BETON ARME

Bernard Giroux, ing., Ph.D.,
Professeur, Institut national de la recherche scientifique

bernard.giroux@ete.inrs.ca

François Saint-Pierre, ing., Ph.D.,
Ingénieur principal, Englobe corp.

Résumé

La corrosion des armatures d'ouvrages en béton armé est un des phénomènes principaux menaçant l'intégrité de ces ouvrages. L'expérience acquise au cours de la dernière décennie en auscultation des structures en béton armé par géoradar a montré que l'atténuation est le paramètre permettant le mieux de détecter et de localiser les défauts liés à la corrosion. Deux phénomènes principaux expliquent ce lien entre atténuation et corrosion. D'une part, on a montré en laboratoire que le coefficient de réflexion de barres corrodées est plus faible que celui de barres non corrodées. L'onde radar réfléchiée par une barre corrodée est donc de plus faible amplitude que l'onde réfléchiée par une barre non corrodée, ce qui fait que le béton semble plus atténuant. D'autre part, la corrosion se produit lorsque l'eau peut migrer jusqu'aux armatures, ce qui survient généralement lorsque le béton est fissuré. La présence de l'eau, chargée en ions, entraîne l'atténuation de l'onde radar en raison de l'augmentation de la conductivité électrique causée par la présence des ions en solution. Dans ce cas, l'atténuation n'est pas directement causée par la corrosion, mais y est fortement corrélée et l'expérience des dernières années indique que les anomalies d'amplitude peuvent servir comme un proxy efficace.

Or, la température a une influence importante sur la conductivité de l'eau, *a fortiori* en période de gel où la mobilité des ions est extrêmement réduite. L'atténuation des ondes radar est donc fonction de la température, et sera d'autant plus affectée lorsque la porosité et le volume d'eau sont plus importants. L'effet de la température a été observé lors de mesures de géoradar répétées sur deux ponts situés en Montérégie. Les premiers levés ont été réalisés en novembre 2014 à des températures de 1 et 5 °C et les deuxièmes en février 2015 à des températures de -12 et -15 °C. Le même équipement a été utilisé pour tous les levés, et un soin particulier a été apporté au traitement des données pour s'assurer de ne pas introduire un biais artificiel dans les résultats. Les résultats sur la partie coïncidente des levés montrent que le niveau de fond de l'atténuation est sensiblement le même, quoique légèrement plus faible en février, et surtout que trois anomalies d'amplitude importantes observées en novembre sont significativement réduites en février, au point de les déclasser de « très élevée » à « incertaine » dans l'échelle de risque. Il apparaît ainsi hasardeux d'effectuer des levés d'auscultation par géoradar en hiver, car l'anomalie d'amplitude perd son efficacité comme proxy pour localiser les défauts causant la corrosion des armatures, et des zones à risque sont susceptibles de ne pas être identifiées.

Introduction

L'expérience acquise au cours de la dernière décennie en auscultation des structures en béton armé par géoradar a montré que l'atténuation est le paramètre permettant le mieux de détecter et de localiser les défauts liés à la corrosion (Abouhamad *et al.*, 2017; Diamanti *et al.*, 2017). Deux phénomènes principaux expliquent le lien entre atténuation et corrosion : la faiblesse du coefficient de réflexion des aciers d'armature corrodés et la migration des eaux généralement chargées en ions chlorure à travers le béton. Aussi, l'eau chargée en ions entraîne à elle seule l'atténuation de l'onde radar en raison de l'augmentation de la conductivité électrique causée par la présence de ces ions en solution (Annan, 1996). Finalement l'atténuation est causée par une succession de différents phénomènes, mais étroitement reliés les uns aux autres et qui interviennent en chaîne. En effet, les ions chlorures causent la corrosion des aciers, puis ces derniers augmentent de volume (Baron, 1992). Ce gonflement engendre une fissuration dans le béton et cette nouvelle fissuration augmente l'espace spécifique de l'eau qui peut geler dans le matériau. Lorsque cette eau gèle, il y a à nouveau une fissuration qui accélère la pénétration des ions chlorures, ce qui accélère la corrosion, et ainsi de suite. Cette réaction en chaîne se traduit, dans tous les cas, par l'augmentation de l'atténuation des ondes géoradar traversant le béton, observable par la diminution des amplitudes des ondes radar.

Depuis le début des années 2000, le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports ausculte les tabliers en béton armé de ses ponts avec la méthode du géoradar. Parmi les campagnes d'investigations les plus exhaustives, on notera en 2009 et 2010 l'auscultation par géoradar de toutes les bretelles de l'ancien échangeur Turcot, puis entre 2015 et 2017 l'auscultation systématique de 55 ponts en Montérégie.

Il existe une norme (ASTM, 2008) qui traite de l'auscultation des ponts par géoradar de même qu'un devis spécifique du Ministère des Transports. Le devis du Ministère des Transports est plus restrictif que la norme ASTM, par exemple elle oblige l'utilisation d'antenne couplée au sol. Ce devis a aussi le mérite d'avoir fixé depuis le début des années 2000 de nombreux paramètres, ce qui permet maintenant de comparer facilement les résultats des différentes campagnes d'investigation réalisées ces quinze dernières années.

Au Québec une question est fréquemment posée par les gestionnaires de pont, à savoir s'il est possible d'effectuer des relevés géoradar l'hiver alors que la température extérieure est négative. Un raisonnement physique simple nous amènerait à répondre que ce n'est pas conseillé. En effet le béton contient de l'eau et en hiver une partie de cette eau, l'eau libre, gèle et par conséquent les propriétés électriques du béton sont différentes. De plus la température a aussi une influence importante sur la conductivité de l'eau en période de gel, car la mobilité des ions est extrêmement réduite, ce qui affecte la résistivité du béton (Elkey et Sellevold, 1995). Un autre raisonnement pourrait laisser penser que l'effet des températures négatives pourrait, au contraire, être faible puisque qu'une autre partie de l'eau dans le béton situé dans des vides de très petite dimension, l'eau liée, ne gèle pas. Dans la littérature on ne retrouve pas vraiment de consensus sur le sujet. Une validation expérimentale s'impose afin de vérifier s'il est possible ou non de réaliser des essais géoradar en plein hiver et c'est l'objet du présent article.

Traitement des données

La norme ASTM D6087-8 décrit plusieurs façons de traiter les résultats. Cependant cette norme demeure peu précise sur la façon d'établir la valeur dite moyenne caractéristique du tablier à

partir de laquelle on définit les intervalles associés au degré de corrosion dans la dalle. Dans ce paragraphe nous décrivons la technique retenue pour traiter les données géoradar.

L'atténuation de l'onde radar est en général bien décrite par une loi exponentielle exprimée par (Giroux *et al.*, 2007)

$$A_t = A_1 e^{-\alpha d} \frac{\Theta_{Tx}\Theta_{Rx}}{d} \quad (1)$$

où α est le coefficient d'atténuation (Np/m) et d est la distance (m) parcourue par l'onde entre le point où l'onde a une amplitude A_1 et le point où l'amplitude est A_t . Θ_{Tx} et Θ_{Rx} sont les diagrammes de rayonnement des antennes (invariants dans le cas présent). Le terme en $1/d$ permet de tenir compte de la divergence géométrique (causée par l'étalement de l'énergie sur une surface de plus en plus grande au fur et à mesure que l'onde progresse). Dans le cas qui nous concerne, l'équation (1) ne tient pas compte de la réflexion à l'interface asphalte-béton et de la réflexion à l'armature. À ce dernier sujet, Hasan et Yazdani (2016) ont montré en laboratoire que l'amplitude réfléchie diminue linéairement avec le degré de corrosion. L'effet des barres corrodées est ainsi cumulé à l'atténuation causée par la présence des chlorures dans le béton.

La norme ASTM D6087-8 stipule d'utiliser l'amplitude réfléchie (en dB) pour évaluer le degré d'endommagement. Dans la procédure suivie ici, on normalise cette amplitude par l'amplitude de l'onde directe (également en dB), pour réduire l'effet des variations des conditions de surface qui peuvent affecter le couplage électromagnétique des antennes. On note l'anomalie d'amplitude en dB par

$$\Delta A = 20 \log_{10} A_t - 20 \log_{10} A_1 \quad (2)$$

Pour cette étude, les données sont traitées avec le Logiciel Radan de la compagnie GSSI. Avec ce logiciel, qui permet de cibler les mesures de position et d'atténuation, nous identifions par pointé A_t (l'amplitude aux armatures) et A_1 (l'amplitude de l'onde directe, prise comme référence). La Figure 1 montre un exemple.

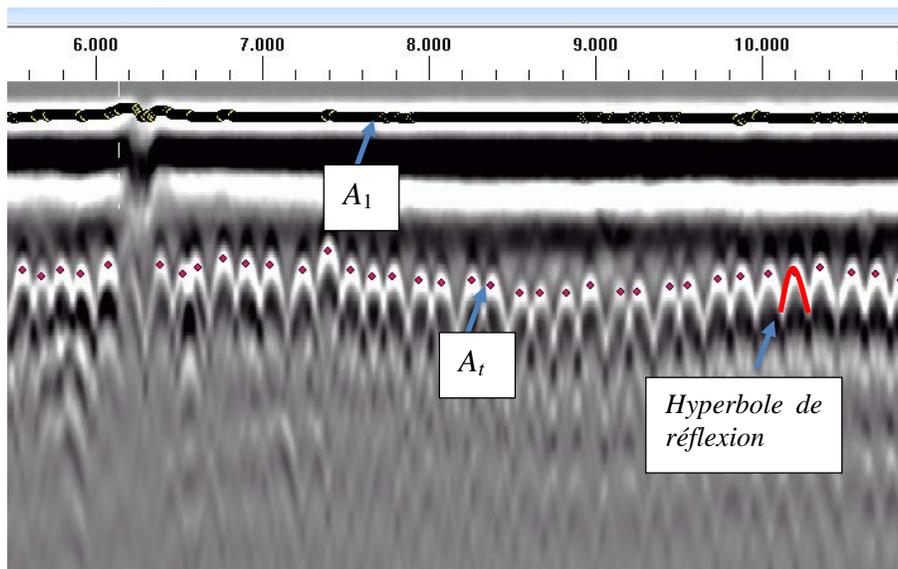


Figure 1 – Identification des paramètres A_1 , et A_t pour le calcul de l'anomalie d'amplitude.

Le devis technique du Ministère demande aussi que les résultats soient présentés selon quatre intervalles de probabilité de corrosion associés à aux couleurs suivantes : noir, rouge, jaune et vert. D'autre part, la norme ASTM D6087-08 mentionne qu'il faut soustraire 6 dB et 8 dB à

partir de la valeur dite moyenne, que nous définissons comme étant la valeur d’anomalie d’amplitude la plus fréquemment rencontrée. Le Tableau 1 décrit l’échelle de probabilité de corrosion et la Figure 2 montre un exemple de la manière dont nous représentons les intervalles de probabilité des corrosions afin de satisfaire à la fois les recommandations de la norme ASTM et celle du devis du ministère.

Tableau 1 – Échelle de probabilité de corrosion

ΔA	Interprétation
Faible	Correspond aux valeurs <u>inférieures</u> à la valeur de l’atténuation la plus fréquente
Moyenne	Correspond aux valeurs se situant entre <u>0 dB et 6 dB</u> par rapport à l’atténuation la plus fréquente
Élevée	Correspond aux valeurs se situant entre <u>6 dB et 8 dB</u> par rapport à l’atténuation la plus fréquente
Très élevée	Correspond aux valeurs supérieures de <u>plus de 8 dB</u> par rapport à l’atténuation la plus fréquente

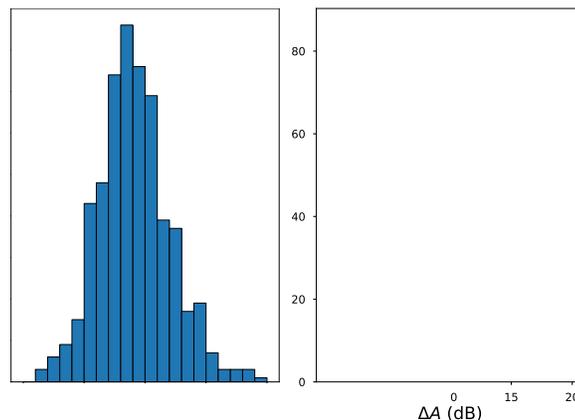


Figure 2 – Répartition des intervalles de probabilité de corrosion en fonction de la distribution des anomalies d’amplitude.

Fiabilité des mesures

Les premiers relevés géoradar se faisaient traditionnellement au moyen d’une ou deux antennes montées sur un charriot poussé en marchant par un opérateur. Cette technique nécessite des fermetures de voies de circulation et la présence de signaleurs. Par la suite, la quantité de tabliers de ponts à investiguer par géoradar devenait de plus en plus importante. Ainsi pour augmenter la cadence des relevés il était requis de ne plus avoir recours à un opérateur qui marche sur les voies de circulation. De plus, sans opérateur sur les voies, il est possible de réaliser les levés en utilisant une signalisation pour travaux mobiles qui s’apparente aux dispositifs de signalisation requis, par exemple, pour les travaux de peinture des voies. La signalisation pour travaux mobile étant moins couteuse et beaucoup plus facile à mettre en place.

Cependant, cette adaptation de la technique ne doit pas se faire au détriment de la qualité des mesures de relevés géoradar que l’on obtenait avec l’ancienne technique. Par exemple, si on accrochait les antennes directement à un véhicule, celui-ci induirait des vibrations qui se traduiraient par du bruit visible sur les profils géoradar.

La solution retenue est donc celle d'un charriot à quatre roues sans amortisseur accroché à un véhicule au moyen de deux barres de métal muni de pivots. L'idée du pivot étant d'empêcher les vibrations verticales du véhicule d'être transmises au charriot à quatre roues (Figure 3). De plus nous avons installé pour les quatre antennes, le même système de bac que celui du charriot original à trois roues. Les bacs sont en téflon couplés au sol et équipé d'un système facilitant les mouvements verticaux.

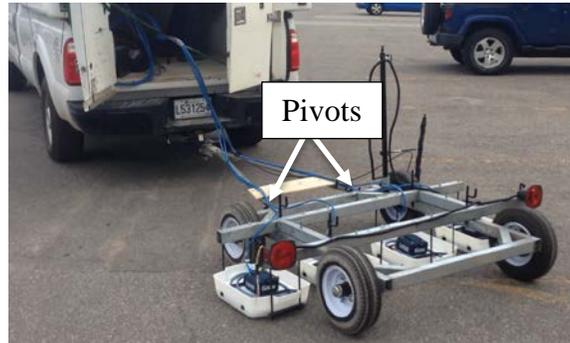


Figure 3 – Géoradar muni de quatre antennes 1,5 GHz et monté sur un charriot à quatre roues et tracté par un véhicule.

Afin de s'assurer que le nouveau système à quatre antennes présente la même qualité d'acquisition de données que le précédent, il y avait lieu de s'assurer que le fait d'utiliser quatre antennes différentes ne crée pas d'erreur de mesure (biais) causée par les légères différences de propriété de construction de chacune des antennes.

Les sources d'erreurs possibles, pouvant entraîner un biais dans l'interprétation des données de quatre antennes différentes, sont :

1. Une erreur de positionnement ;
2. Une erreur sur le pointé des temps d'arrivée ;
3. Une erreur sur le pointé des amplitudes.

Pour vérifier cela, nous avons placé les antennes les unes derrière les autres (en série) afin de mesurer la réponse de chacune des antennes positionnées au-dessus d'un même acier d'armature enfoui au même endroit dans une dalle de tablier de pont (Figure 4).

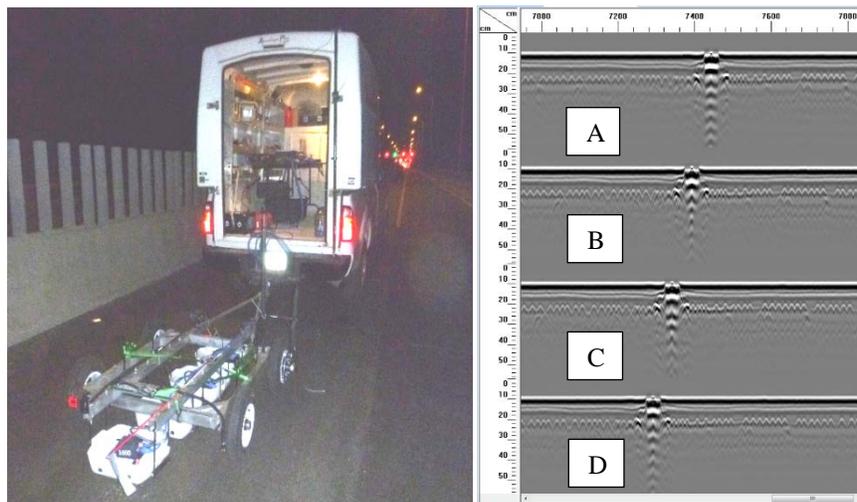


Figure 4 – Dispositif de vérification de la répétabilité des mesures prise par chaque antenne (gauche) et exemple de mesures (droite).

Pour mesurer les écarts de positionnement, des cibles ont été calculées pour les six combinaisons possibles de profils, soit Δx_{A-B} , Δx_{A-C} , Δx_{A-D} , Δx_{B-C} , Δx_{B-D} , Δx_{C-D} . La Figure 5 montre que l'écart est nul pour 70,6% des cas, de 1,2 cm pour 5,9% des cas, de 1,5 cm pour 23,4% des cas et de 3 cm pour 0,1% des cas. Ici, les écarts sont probablement attribuables au pointé des hyperboles pour l'essentiel, car les antennes étant solidaires sur le chariot pendant les mesures et l'ancienne technique, avec une ou deux antennes, induisait des écarts encore plus élevés. Les écarts sur les temps aller-retour ont aussi été calculés pour toutes les combinaisons de profils et sont également présentés à la Figure 5. On note que 89 % des écarts se situe en deçà de 0,07 ns, ce qui signifie un écart sur la profondeur estimée qui serait inférieur à 3,5 cm pour un milieu où la constante diélectrique est de 9 (i.e. pour une vitesse de 0,1 m/ns).

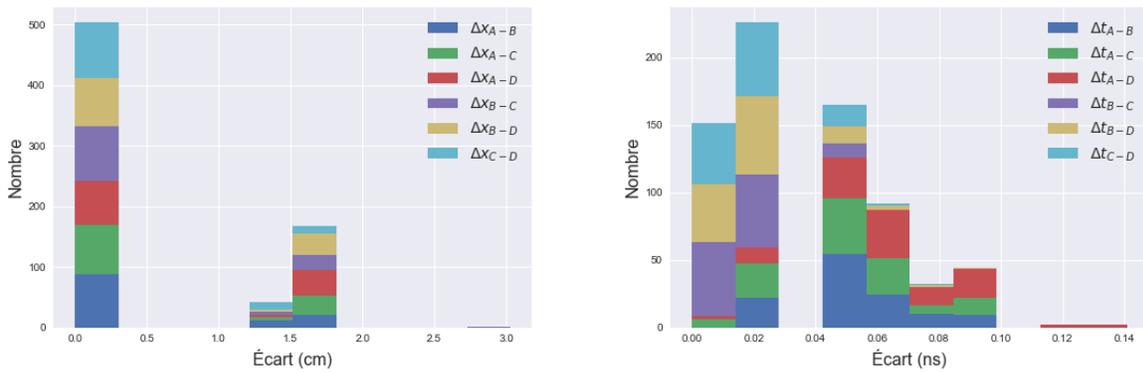


Figure 5 – Distribution des écarts de positionnement (gauche) et sur les temps aller-retour (droite).

Enfin, la Figure 6 montre la distribution des écarts de valeurs d'anomalie d'amplitude pour toutes les combinaisons de profil. Dans le cas des écarts de l'anomalie d'amplitude, 97 % des valeurs sont inférieures à 1 dB. La probabilité de mal classer les anomalies d'amplitude dans l'échelle de risque est ainsi très faible.

Finalement, cette brève analyse indique que la répétabilité des mesures est très bonne et que le risque l'introduire un biais dans l'interprétation des anomalies est faible et cela même si l'on utilise quatre antennes simultanément.

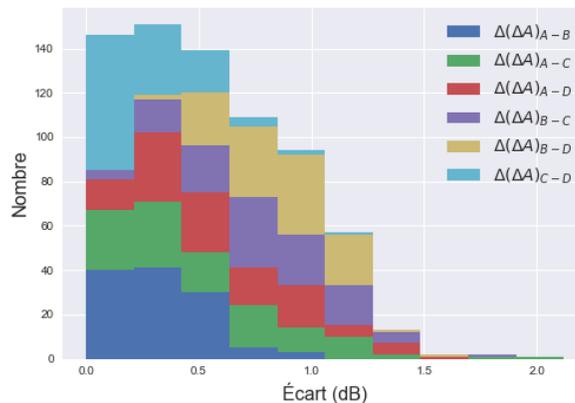


Figure 6 – Distribution des écarts de valeurs d'anomalie d'amplitude.

Effet du gel sur les données géoradar

Pont 1

Les résultats sont d'abord présentés pour un premier pont, où les températures entre les levés ont varié de 1 à -12 °C. La Figure 7 montre la différence entre les anomalies d'amplitude pour ces deux levés. On peut remarquer sur les histogrammes que l'anomalie moyenne est légèrement plus faible l'hiver (7,7 vs 9,2 dB) et que la distribution est moins étalée (variance de 5,9 vs 8,7 dB²). Spatialement, on remarque que l'anomalie d'amplitude élevée dans le coin inférieur gauche observée à 1 °C disparaît à -12 °C. Cette différence est encore plus frappante sur la carte de probabilité de corrosion (Figure 8), où les anomalies « élevée » et « très élevée » disparaissent complètement.

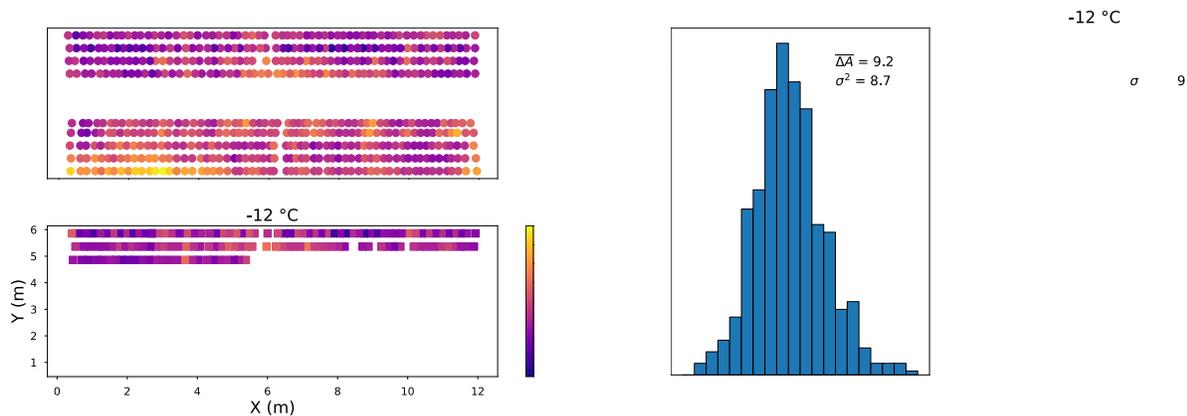


Figure 7 – Carte (gauche) et distribution (droite) de l'anomalie d'amplitude au Pont 1.

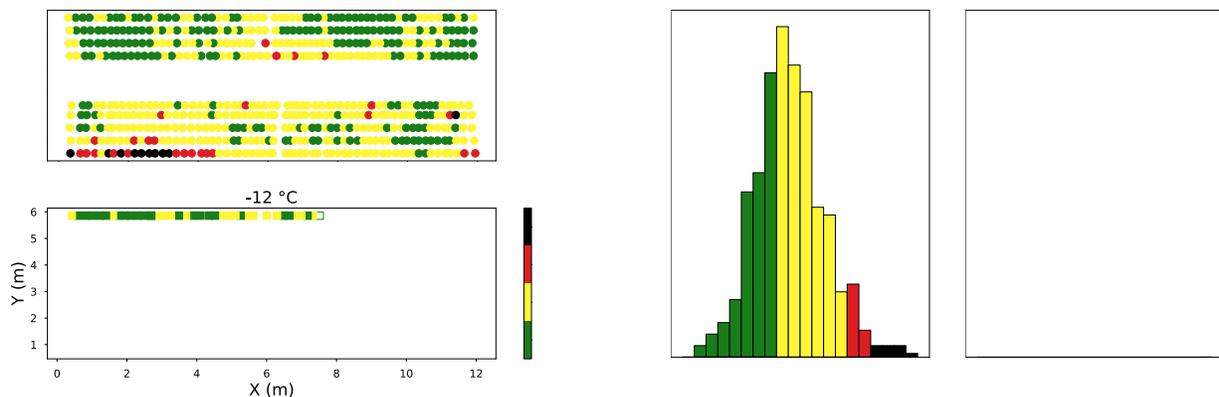


Figure 8 – Carte (gauche) et distribution (droite) de la probabilité de corrosion au Pont 1.

Pont 2

Les résultats sont comparables pour le deuxième pont, où les températures entre les levés ont varié de 5 à -15 °C. Comme le montre la Figure 9, la moyenne est réduite de 7,3 à 6,2 dB et la variance passe de 9,0 à 5,6 dB². Les anomalies élevées de probabilité de corrosion sont également réduites, comme on peut l'observer à la Figure 10. Une seule anomalie (coin inférieur droit) est plus élevée pour le levé hivernal. Des valeurs élevées sont visibles à cet endroit pour le levé d'automne. Cependant, compte tenu du court laps de temps entre les levés (4 mois), il est peu probable qu'il s'agisse d'un défaut qui aurait empiré et cette différence est plutôt attribuée à

la présence de débris de surface, lors du deuxième relevé, qui auraient eu un effet sur l'acquisition des données.

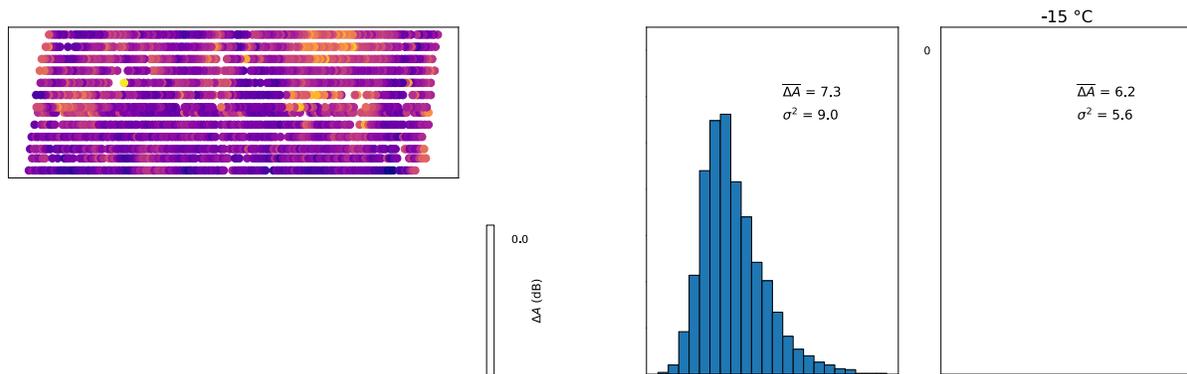


Figure 9 – Carte (gauche) et distribution (droite) de l'anomalie d'amplitude au Pont 2.

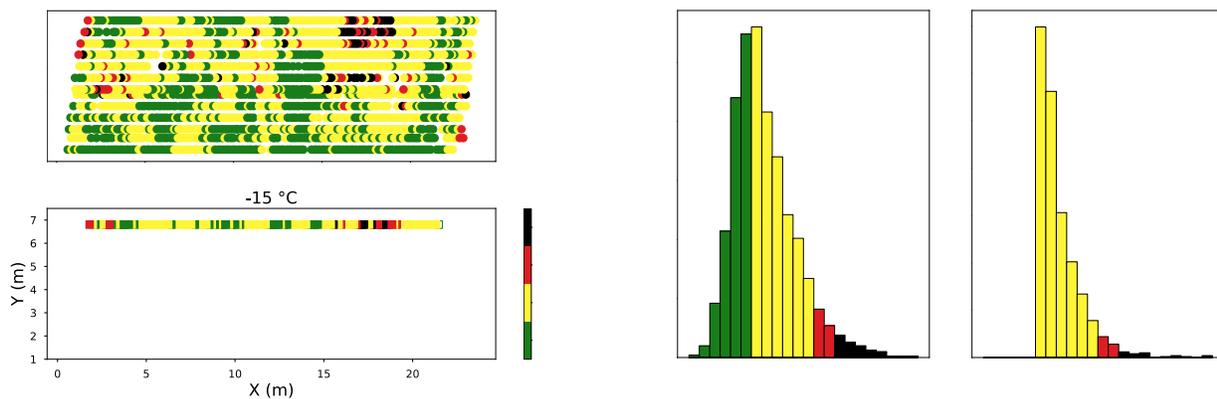


Figure 10 – Carte (gauche) et distribution (droite) de la probabilité de corrosion au Pont 2.

Perspectives de recherche

L'observation des données a permis de constater que la vitesse de propagation de l'onde radar varie également en fonction de la température, comme l'indique la variation de la distribution des temps de parcours de la réflexion aux armatures en fonction de la température (Figure 11). À partir de ces données et en considérant une vitesse constante (0.1 m/ns), on peut calculer un ordre de grandeur pour la profondeur des armatures. Il est intéressant d'examiner la relation entre l'anomalie d'amplitude et la profondeur. La Figure 12 montre en effet un lien linéaire entre ces deux variables, avec des coefficients de corrélation de l'ordre de 0,75 pour 3 des 4 cas. Il est ainsi possible que certaines anomalies soient classées à tort comme « élevée » ou « très élevée », l'anomalie étant plus élevée simplement parce que l'armature est plus profonde, et non parce que le béton est endommagé. Ce résultat est accord avec Abouhamad *et al.* (2017), qui soulignent aussi l'importance d'appliquer une correction de la profondeur des barres d'armature avant l'interprétation des amplitudes. Nous croyons néanmoins qu'une étude plus approfondie, où la vitesse de propagation serait évaluée, devrait être considéré pour quantifier avec plus de précision cet effet. Il est à noter qu'une telle étude ne nécessiterait pas l'acquisition de nouvelles données, la vitesse pouvant être estimée à partir de l'hyperbole de réflexion (Figure 1) générée par l'armature. En modifiant localement la vitesse pour ajuster chaque hyperbole, il est ainsi possible

de dresser une carte de la distribution des vitesses qui pourrait, en plus de permettre de calculer les profondeurs d'armature, servir de complément à la carte de l'anomalie d'amplitude pour le diagnostic de l'ouvrage. En combinant vitesse et atténuation, l'évaluation des propriétés du béton est également plus précise (Giroux et Chouteau, 2008).

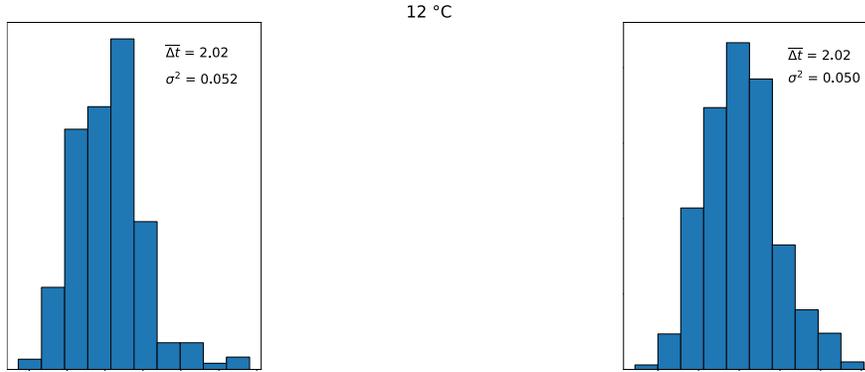


Figure 11 – Distribution de temps de parcours aller-retour de l'onde radar aux armatures.

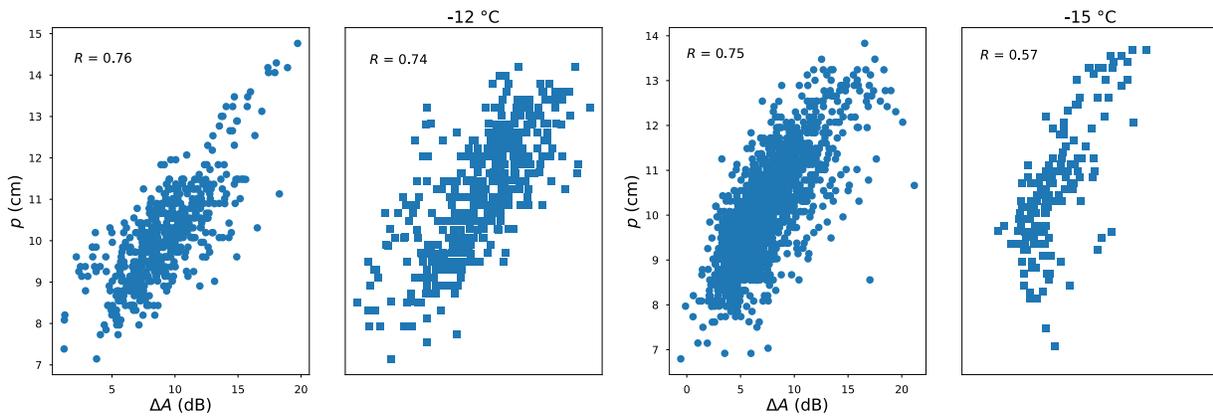


Figure 12 – Relation entre l'anomalie d'amplitude et la profondeur des armatures.

Pour éviter les biais dus aux profondeurs d'armature et améliorer le diagnostic, il serait possible de calculer à partir de l'équation (1), une *atténuation apparente* qui tient compte de la profondeur. Partant de l'hypothèse qu'on peut estimer la vitesse de propagation à partir des hyperboles de réflexion, et donc la profondeur des armatures (notée p), il est en effet possible d'inclure une correction (une correction en $1/d$ serait une première approximation). En incluant cette correction, l'atténuation apparente α_a est

$$\alpha_a = \frac{\ln A_1 - \ln A_t - \ln 2p}{2p} \text{ [Np/m]} = \frac{20}{\ln 10} \frac{\ln A_1 - \ln A_t - \ln 2p}{2p} \text{ [dB/m]} \quad (3)$$

Il faut noter que cette équation est valide pour dans antennes *ground-coupled* et néglige l'écartement entre les antennes, i.e. on assume que la propagation est verticale, à l'aplomb de l'armature. Une telle approche comporte cependant son lot de défi sur le plan pratique car l'estimation de la vitesse pour chacune des armatures est une procédure longue et fastidieuse. À ce sujet, une approche par apprentissage automatique (Goodfellow *et al.*, 2016) semble tout indiquée car la tâche est répétitive, mais d'une complexité relativement limitée. Kaur *et al.* (2016) ont d'ailleurs présenté des résultats convaincants d'une telle méthode pour détecter la

signature des barres d'armature. L'efficacité des méthodes d'apprentissage automatique repose sur la disponibilité de données d'entraînement, et dans le cas présent, les levés effectués pour le ministère constituent un formidable jeu de données pour ce faire. Des travaux supplémentaires sont néanmoins nécessaires pour pousser cette idée jusqu'à l'application de la correction proposée.

Conclusion

Des levés répétés l'automne et l'hiver sur deux ouvrages en Montérégie ont révélé que le gel a pour effet de réduire la moyenne et la variance de l'anomalie d'amplitude. Ces changements ont pour conséquence de masquer des anomalies de probabilité de corrosion « élevé » et « très élevé ». Il apparaît ainsi inapproprié d'effectuer des levés d'auscultation par géoradar en hiver, car l'anomalie d'amplitude perd son efficacité comme proxy pour localiser les défauts causant la corrosion des armatures, et des zones à risque sont susceptibles de ne pas être identifiées.

L'étude des données a aussi permis de mettre en lumière une relation linéaire entre l'anomalie d'amplitude et la profondeur des armatures, qui pourrait faire en sorte que des anomalies d'atténuation soient classées à tort dans le groupe des probabilités de corrosion « élevé » ou « très élevé ». Il est ainsi proposé d'apporter une correction pour tenir compte de la profondeur des armatures, mais des travaux supplémentaires sont nécessaires pour rendre cette approche praticable dans un contexte de production.

Remerciement

Les auteurs tiennent à remercier le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports et en particulier Amar Belarbi, Christian Harvey et Cédric Duhaime. Nous souhaitons aussi remercier nos collègues qui ont participé grandement aux succès des projets : Julien Thibeault, Stéphanie Constance Blanchard, Louis Philippe Duquette et Sacha Dumeignil. Finalement, le potentiel de l'apprentissage automatique pour le traitement des données géoradar nous a été révélé suite à des discussions avec Erwan Gloaguen (INRS), ainsi que Lorenzo Perozzi et Martin Blouin (Geolearn).

Références

- Abouhamad, M., Dawood, T., Jabri, A., Alsharqawi, M. et Zayed, T., 2017. Corrosiveness mapping of bridge decks using image-based analysis of GPR data, *Automation in Construction*, 80, 104-117. doi:10.1016/j.autcon.2017.03.004
- Annan, A.P., 1996. Transmission Dispersion and GPR, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 0, 125-136. doi:10.4133/JEEG1.B.125
- ASTM, 2008. Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar. D 6087 – 08.
- Baron, J., 1992. *La durabilité des bétons*, edn, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées.
- Diamanti, N., Annan, A.P. et Redman, J.D., 2017. Concrete Bridge Deck Deterioration Assessment Using Ground Penetrating Radar (GPR), *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 22, 121-132. doi:10.2113/Jeeg22.2.121
- Elkey, W. et Sellevold, E.J., 1995. Electrical resistivity of concrete. Norwegian Road Research Laboratory, Rapport de recherche 80.
- Giroux, B. et Chouteau, M., 2008. Validity of the low-loss approximation in the estimation of dielectric constant and water content from borehole radar data. *Papier présenté à Proceedings of the 12th International Conference on Ground-Penetrating Radar*.

- Giroux, B., Gloaguen, E. et Chouteau, M., 2007. bh_tomo - A Matlab borehole georadar 2D tomography package, *Computers and Geosciences*, 33, 126-137. doi:10.1016/j.cageo.2006.05.014
- Goodfellow, I., Bengio, Y. et Courville, A., 2016. *Deep Learning*, edn, MIT Press.
- Hasan, M.I. et Yazdani, N., 2016. An experimental study for quantitative estimation of rebar corrosion in concrete using ground penetrating radar, *Journal of Engineering*, 2016. doi:10.1155/2016/8536850
- Kaur, P., Dana, K.J., Romero, F.A. et Gucunski, N., 2016. Automated GPR rebar analysis for robotic bridge deck evaluation, *IEEE transactions on cybernetics*, 46, 2265-2276. doi:10.1109/TCYB.2015.2474747