

Évaluation améliorée de la corrosivité des dalles de pont en béton

Thikra Dawood, Mona Abouhamad, Ahmad Jabri, 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

Les structures des ponts autoroutiers sont des constituants vitaux pour le système de transport d'un pays. Les conséquences d'une défaillance de ces structures sont catastrophiques et très coûteuses au niveau de vies humaines ainsi qu'au niveau de pertes économiques. Des statistiques ont révélé que 75,000 ponts autoroutiers au Canada ont des déficiences structurales ou fonctionnelles. De plus, ces structures ont une durée de vie limitée donc une évaluation précise de leur état est cruciale pour assurer la sécurité publique et leur durabilité. Au Canada et aux États-Unis, l'approche principale pour de tels problèmes est d'examiner visuellement la dalle du pont ainsi que ses autres composantes. Bien que les défauts externes comme des fissures et des écaillages peuvent être détectés à l'œil nu, des problèmes internes dont des délaminations ou de la corrosion d'armature restent invisibles. Le problème est encore plus difficile lorsque l'on traite des structures pavées comme la majorité des ponts du Québec. De plus, l'inspection visuelle demande plus de temps et elle est très coûteuse et intrinsèquement subjective. En conséquence, des techniques d'évaluation plus précises et efficaces sont nécessaires pour améliorer l'inspection des infrastructures en béton. Ces techniques vont éventuellement mener à d'énormes économies temporelles et monétaires. Notre recherche vise à améliorer un système d'évaluation de la corrosivité des dalles en béton par l'évaluation non-destructive (END). L'équipe de recherche de l'Université Concordia, avec l'aide financière du Ministère des transports du Québec (MTQ), avait pour but de franchir les limitations de l'inspection visuelle en développant des méthodes d'interprétation des données de la technique d'END sélectionnée et de développer un index de corrosivité de la dalle de pont (ICDP).

Le géoradar (GPR) est une technique efficace et appropriée pour examiner les dalles de ponts. Deux méthodes d'interprétation ont été proposées lors de cette recherche. La première est une combinaison des méthodes d'amplitude et d'analyse d'images avec un seuil d'étalonnage basé sur "K-means cluster". La deuxième méthode s'agit d'analyser des séries temporelles de données géoradar basée sur le coefficient de corrélation entre les mesures individuelles (A-scans). Cette dernière méthode détermine la détérioration du béton selon le changement des données de géoradar sur une période de temps. Des opinions d'experts, acquises avec un questionnaire précis, ont été utilisées pour développer et interpréter l'ICDP basés sur les données géoradar. Ensuite, la méthodologie proposée et les modèles utilisées ont été validés avec plusieurs cas d'études au Québec. L'étude a établi un outil d'aide qui facilitera les prises de décision pour les professionnels d'infrastructure et qui fournira de l'information plus précise et objective sur la probabilité de la corrosion de la dalle de pont et ainsi croître la sécurité publique. Le système proposé contribue à

améliorer la qualité de la prise de décision en dirigeant les agences de transport vers l'identification de déficiences critiques et à l'attribution des fonds restrictifs aux endroits le plus méritants. Par conséquent, les dalles de pont peuvent être préservés et entretenus plus efficacement, ce qui mènera à une réduction importante des coûts du cycle de vie des structures de pont.

1 INTRODUCTION

Bien que les statistiques ont révélé que 75 000 des ponts autoroutiers au Canada présentent des déficiences structurelles ou fonctionnelles et aussi une courte durée de service (Lounis 2013); le « National Bridge Inventory » a proclamé le même problème pour les 150 000 ponts aux États-Unis. Les coûts d'inspection, de l'entretien et de réhabilitation de ces ponts sont énormes. En 2008, plus de 140 milliards de dollars étaient nécessaires pour la réparation et l'entretien des ponts autoroutiers détériorés aux États-Unis (ASCE 2009).

L'évaluation de la condition des dalles de pont représente toujours une tâche cruciale et difficile pour assurer la viabilité de l'infrastructure en béton. Les techniques d'inspection visuelle sont considérées comme les principales méthodes utilisées dans l'évaluation de la condition des infrastructures. Ces méthodes sont efficaces pour trouver et localiser les défauts externes de la structure mais elles possèdent plusieurs limitations dans la détection des défauts internes de la structure, tels que les vides, la corrosion des armatures et la délamination. De plus, ces méthodes sont coûteuses, exigent beaucoup de temps et se basent sur des critères subjectifs. Les technologies d'évaluation non destructive (END) sont développées et présentées comme un complément pour l'inspection visuelle. Le géoradar a été considéré comme l'une des meilleures technologies d'END dans l'évaluation de l'état des ponts en béton. Malgré les nombreux progrès concernant la configuration matérielle du géoradar, cette technologie reste une pratique limitée en raison de l'inefficacité des méthodes d'analyse de données actuelles.

En conséquence, les objectifs de cette recherche sont les suivants: (1) étudier et sélectionner la meilleure technologie d'évaluation non-destructive; (2) étudier des méthodes d'analyse pour interpréter les données de la technologie sélectionnée; et (3) développer un index de corrosivité de la dalle du pont (ICDP) basé sur cette technologie.

2 CONTEXTE

2.1 Analyse numérique de la réflexion d'amplitude

La méthode d'analyse numérique de l'amplitude de réflexion est la méthode la plus utilisée pour interpréter les données de géoradar; elle est basée sur les mesures des amplitudes des signaux réfléchis sur les différentes interfaces d'un milieu. Ces signaux réagissent principalement avec les paramètres électriques du milieu tels que : la conductivité et la constante diélectrique. Ces deux paramètres augmenteront les signaux géoradar enregistrées avec la présence d'humidité, la teneur en chlorure et la rouille. Donc, l'analyste peut déterminer la condition d'une dalle de béton basée sur l'amplitude normalisée des signaux réfléchis à la surface de béton, sur la face inférieure de la dalle ou sur le quadrillage d'armature supérieure. Le mappage d'amplitude consiste à mesurer les

amplitudes des signaux réfléchis sur le quadrillage d'armature supérieure de toute la zone de surveillance et les tracés avec des lignes de contour.

Selon Parrillo et al. (2006), la quantité de la détérioration ne doit pas être déterminée ou basée uniquement sur les couleurs de contour de la carte. Il a souligné que même pour une nouvelle dalle, on observera une variation d'amplitude de réflexion sur les barres d'armature à cause de la variation de leurs profondeurs. Pour la même raison que précédemment, Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI) estime que la technique d'interprétation d'amplitude ne soit pas appropriée pour une dalle sans ou avec une détérioration quasi totale (GSSI 2012). De même, pour une dalle de pont avec une détérioration moyenne et en plus de la variation de la profondeur des barres d'armature, il existe encore plusieurs facteurs qui peuvent conduire à l'inefficacité de l'analyse de la réflexion d'amplitude (Tarussov et al. 2013). Ces facteurs incluent la variation de la profondeur et de l'espacement de barres d'armature, les propriétés de la surface, la configuration structurelle et la qualité de la construction. Jusqu'à ce jour, la variation de profondeur de l'armature est le seul facteur qui a été pris en compte pour régler la cartographie de la condition (Barnes et al., 2008).

Ainsi pour la détermination d'un seuil, Martino et al. (2014) ont proposé un modèle statistique pour la calibration de seuil dans lequel les données de géoradar ont été corrélées avec la technique du relevé de potentiel de corrosion (RPC). Le but du modèle était d'utiliser le géoradar comme un outil unique pour évaluer l'état des dalles de pont soumises à la corrosion. La Figure 1 présente précisément un exemple de résultat de leur modèle. Ce résultat implique que pour une dalle de pont sain, l'histogramme d'amplitude est compact, très symétrique et parfaitement normal, tandis que l'histogramme pour une dalle de pont corrodée est étalé et asymétrique.

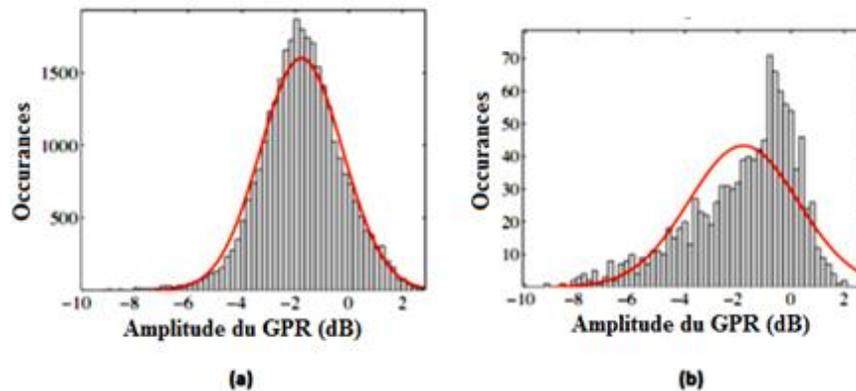


Figure 1: Histogramme d'amplitude: (a) pour une dalle de pont sain et (b) pour une dalle de pont corrodé (Martino et al. 2014)

Avec un échantillon de huit dalles de pont avec des résultats de relevé de potentiel de corrosion, les auteurs ont pu analyser plusieurs statistiques telles que la moyenne, l'écart-type, la variance, l'asymétrie et l'aplatissement dans le but d'évaluer la corrosion. En se basant sur cette analyse, ils ont déduit avec une formule de régression linéaire pour calculer la surface de la corrosion comme le montre la Figure 2. Ils ont conclu que le produit du coefficient d'asymétrie avec la valeur moyenne des amplitudes des données de géoradar fournit la meilleure performance de prédiction. Enfin, avec un pourcentage de la zone corrodée obtenu, le seuil de géoradar peut être trouvé à l'aide des essais interactifs et un processus d'erreurs.

2.2 Techniques de recherche dans l'évaluation de la condition

Dans la recherche bibliographique, il a été constaté que différentes techniques ont été appliquées avec succès pour évaluer la condition des infrastructures. Des techniques comme l'analyse de régression, le réseau de neurone artificiel (Artificial Neural Network ou ANN en anglais), le processus hiérarchique analytique (Analytical Hierarchy Process ou AHP en anglais), la théorie de l'utilité multi-attribut (ou Multi-Attribute Utility Theory, MAUT en anglais), le partitionnement de K-moyennes (ou K-means clustering en anglais) et la théorie des ensembles flous (ou Fuzzy theory en anglais). Deux techniques ont été choisies et étudiées parmi les techniques citées précédemment afin de les utiliser ultérieurement dans le développement du modèle d'analyse. Ces techniques sont la méthode de K-moyennes et la théorie des ensembles flous.

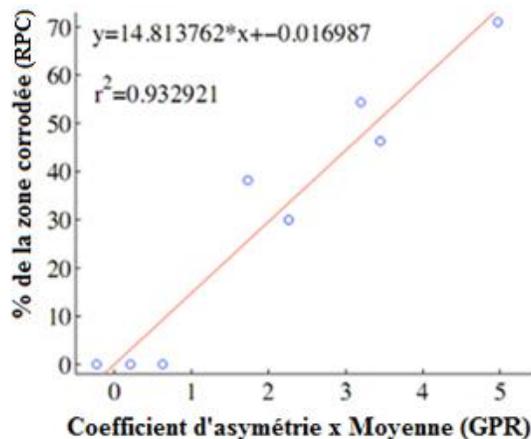


Figure 2: Le modèle de la prédiction de seuil pour les données de géordar (Martino et al. 2014)

2.2.1 « K-means Clustering »

Le « K-means Clustering » est une technique de regroupement (clustering) et de classification qui a été étudiée et appliquée largement dans le milieu universitaire et industriel. Cette technique utilise un algorithme simple et efficace même lorsque les tâches sont compliquées.

L'algorithme K-moyennes (K-means) effectue un test sur l'ensemble des données d'apprentissage pour trouver les plus proches k voisins parmi les données, ensuite il alloue x à la classe la plus fréquente parmi les k voisins (Polikar 2006). Cette technique consiste à choisir arbitrairement les centres de cluster initiales (c_j) des k , puis en les filtrant à plusieurs reprises selon les étapes suivantes: (1) chaque point des données est attribué à l'ensemble des données liées au centroïde le plus proche, et (2) chaque centre de cluster c_j est actualisé pour être la moyenne de ses points des données initiales. Cette méthode de clustering s'arrête quand les centroïdes et les points des données ne changent jamais ses positions (Wagstaff et al. 2001).

2.2.2 Théorie des ensembles flous ou (Fuzzy)

La théorie floue a été introduite pour la première fois par Zadeh (1965). Cette théorie a été développée rapidement et elle a été appliquée dans différents domaines. L'utilité de cette théorie

permet de résoudre plusieurs problèmes de processus décisionnel et du contrôle qui sont associés aux incertitudes et aux imprécisions du langage humain. En particulier, Tee (1988) présente l'un des efforts initiaux qui a appliqué la théorie des ensembles flous pour l'évaluation de la condition de pont. Kawamura et Miyamoto (2003) ont développé un système de classification qui utilise la méthode du neuro-fuzzy pour évaluer les ponts en béton. Tarighat and Miyamoto (2009) ont proposé un système d'inférence flou pour évaluer les dalles de pont en béton armé. En se basant sur le travail de Tee (1988) et en utilisant les opérations mathématiques floues, Sasmal et al. (2006) ont proposé un modèle d'évaluation de la condition pour classer les ponts en béton armé existants. De même, Sasmal and Ramanjaneyulu (2008) ont proposé un système de classement très compliqué pour l'évaluation de la condition de pont en béton armé.

3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

3.1 Méthodes END pour les structures en béton

Plusieurs technologies END ont été appliquées pour inspecter des structures en béton. Ces technologies comprennent principalement: (1) Le relevé de potentiel de corrosion; (2) La résistivité du béton; (3) La méthode de Polarisation; (4) Chaîne/marteau (5) La vitesse d'impulsion; (6) L'analyse du spectre de la surface d'ondes; (7) L'impact-écho; (8) La thermographie à infrarouge; et (9) Le géoradar.

Plusieurs techniques peuvent être appliquées sur la même dalle de pont afin de les comparer et ensuite éliminer les limitations de chacun de ces techniques; cependant, une telle solution exigerait beaucoup plus de temps et de ressources pour inspecter et interpréter les résultats que lorsqu'une seule méthode d'END est employée. Dans cette étude, la méthodologie utilisée pour sélectionner la technique d'END est présentée dans la Figure 3.

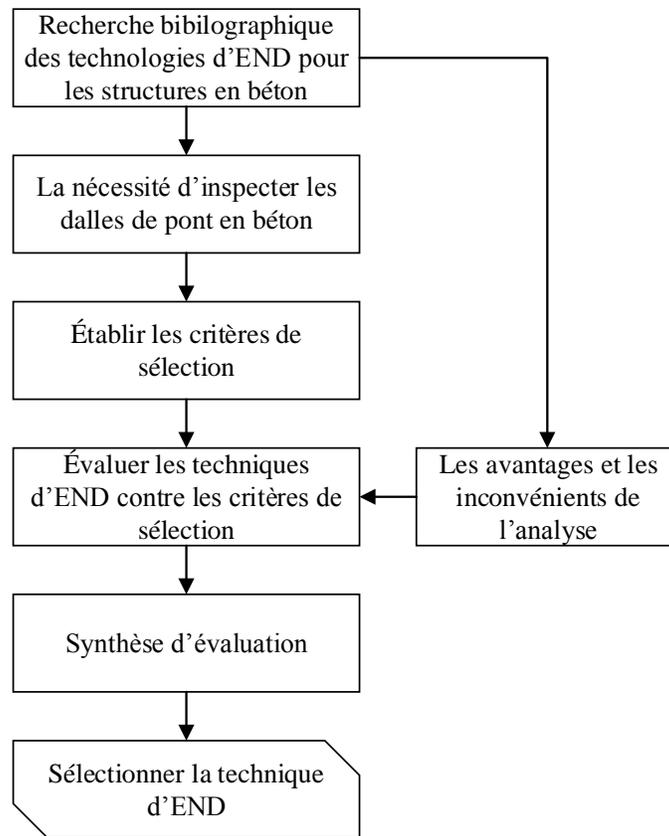


Figure 3: Méthodologie utilisée pour sélectionner la technique d'END

Suite à une recherche bibliographique approfondie des technologies de l'évaluation non destructive (END), chaque technologie est analysée en termes d'avantages et de limitations par rapport à son application sur les dalles de pont en béton, comme le montre le tableau 1.

Tableau 1 : Avantages et limitations des différentes techniques END

<i>Technique</i>	<i>Avantages</i>	<i>Limitations</i>
Relevé de potentiel de corrosion	Équipement léger et portable. Fournit une indication sur la probabilité de corrosion au moment de la mesure.	Exige une connexion pour les armatures noyées. Peut être considéré comme une technique semi-END. Besoin de connecter électriquement les armatures. Non applicable aux barres époxy. Besoin d'humidifier le béton. Ne donne aucune indication sur le taux de corrosion. Besoin d'un opérateur formé.
Résistivité du béton	Équipement léger et portable. Fournit une indication sur le taux de corrosion.	Généralement utilisée avec la méthode du relevé de potentiel de corrosion.

Technique	Avantages	Limitations
Méthode de polarisation	<p>Equipement léger et portable.</p> <p>Fournit une indication instantanée du taux de corrosion au moment de la mesure.</p>	<p>Exige une connexion pour les armatures noyées,</p> <p>Besoin de connecter électriquement les armatures.</p> <p>Non applicable aux barres époxy.</p> <p>Aucune norme pour l'interprétation des résultats des tests.</p> <p>La profondeur du recouvrement doit être inférieure à 100 mm.</p> <p>La surface de béton doit être lisse et sans fissure.</p> <p>Besoin d'un opérateur formé.</p> <p>Exige beaucoup de temps.</p>
Chaîne/marteau	<p>Equipement léger, simple et portable.</p> <p>Méthode efficace pour détecter les zones délaminiées sur les dalles de pont en béton armé exposés.</p>	<p>Pas efficace pour les dalles de pont en béton recouvert d'asphalte.</p> <p>Sous réserve de la technique et l'interprétation de l'opérateur.</p> <p>Impossible de détecter la corrosion des armatures.</p> <p>Détection limitée à une profondeur de 1 à 3 pouces.</p>
Vitesse d'impulsion	<p>Equipement léger et portable.</p> <p>Relativement facile à utiliser.</p> <p>Fournit d'excellents moyens pour examiner l'homogénéité des structures en béton.</p>	<p>Généralement nécessite l'accès aux deux côtés de la structure.</p> <p>Impossible de détecter la corrosion des armatures.</p> <p>Utilisation limitée dans la détection de délamination (selon la recherche bibliographique).</p>
Analyse du spectre de la surface d'ondes	<p>Permet de déterminer les propriétés élastiques des systèmes en couches.</p> <p>Utiliser pour vérifier la qualité de couches à différentes positions dans un système structurel en couches.</p>	<p>Besoin d'un opérateur expérimenté.</p> <p>Impossible de détecter la corrosion des armatures.</p> <p>Difficulté d'obtenir des informations sur la délamination.</p> <p>Exige une méthode de traitement de signal complexe.</p>
Impact-écho	<p>Capacité de détecter des différents défauts comme les vides, les fissures et la délamination.</p> <p>Accès à une seule face de structures est nécessaire.</p>	<p>Besoin d'un opérateur expérimenté.</p> <p>Impossible de détecter la corrosion des armatures.</p> <p>Exige beaucoup de temps pour inspecter une grande surface.</p>
Thermographie infrarouge	<p>Apte à détecter la délamination à la proximité de la surface des structures en béton.</p> <p>Méthode rentable et rapide.</p>	<p>Exige une condition environnementale favorable.</p> <p>Equipement dispendieux.</p> <p>Impossible de détecter la corrosion des armatures.</p> <p>Difficulté de mesure la profondeur et l'épaisseur du défaut détecté.</p> <p>Difficulté de détecter les défauts localisés dans la structure.</p> <p>Besoin d'un opérateur formé.</p>
Géoradar	<p>Capable de balayer rapidement avec une antenne sans contact.</p> <p>Très sensible aux objets métalliques, à l'humidité et à la conductivité électrique.</p> <p>Peut facilement pénétrer à travers la couche d'air et d'asphalte.</p> <p>Résultat de l'inspection reproductible.</p> <p>Equipement commercial et logiciels d'application sont bien développés.</p>	<p>Impossible de détecter directement les fissures fines et la délamination.</p> <p>Nécessite un opérateur formé pour effectuer l'inspection et interpréter le résultat.</p>

Afin de sélectionner la technologie la plus appropriée, les exigences d'inspecter les dalles de pont en béton sont identifiées. Ces exigences, à leurs tours, sont utilisées pour établir les critères de sélection. Finalement, en se basant sur la comparaison de la capacité de chaque technologie END par rapport aux critères établis, on identifie et on adopte la meilleure technique d'END dans cette

recherche. Le tableau 2 illustre une comparaison des techniques d'évaluation non destructive par rapport aux critères de sélection.

Tableau 2: Comparaison des techniques d'évaluation non destructive par rapport aux critères de sélection

Techniques END	Critère de sélection							
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Relevé de potentiel de corrosion		√			√		√	√
Résistivité du béton	√	√			√		√	√
Polarisation		√			√		√	
Chaîne/Marteau			√	√				√
Vitesse d'impulsion					√		√	√
Analyse de spectre de la surface d'onde					√	√	√	√
Impact-écho			√		√	√	√	√
Thermographie à infrarouge			√	√			√	√
Géoradar	√	√		√	√	√	√	√

Comme on peut le constater d'après le tableau 2, la technique du géoradar semble être la technologie d'END la plus appropriée pour inspecter les dalles de pont en béton. Il est noté que même si le critère n°3 n'a pas été validé pour le géoradar (voir tableau 2), Scott et al. (2001) ont constaté que cette technologie peut détecter la délamination directement quand elle est assez grande ou remplie d'eau.

3.2 Méthodes d'interprétation des données de géoradar

De nombreux chercheurs ont étudié les méthodes d'interprétation des données de la technologie de géoradar, et plus particulièrement pour les dalles de pont en béton armé. En général, les méthodes d'interprétation des données se répartissent en deux catégories: la méthode d'analyse d'amplitude (numérique) et la méthode d'analyse visuelle (image). Malgré que l'analyse d'amplitude fournisse une échelle des décibels objective et détaillée, la sélection subjective de la valeur de seuil reste une grande limitation. Ce seuil peut être obtenu en utilisant le modèle développé par Martino et al. (2014) mais le modèle lui-même n'a pas été bien validé. En revanche, l'interprétation visuelle des données de géoradar fournit une cartographie de condition avec des catégories de conditions spécifiques qui sont utiles pour les gestionnaires de pont, par contre la détermination de la frontière de la condition reste subjective. Afin d'éliminer la subjectivité des deux méthodes, une technique d'analyse améliorée est proposée dans cette recherche.

3.2.1 Regroupement (clustering) basé sur la calibration de seuil

L'idée de base est que tout plan d'atténuation détaillé à l'échelle de décibels peut être utilisé pour déterminer le niveau relatif de la détérioration par rapport aux signaux enregistrés, et que des informations de l'interprétation visuelle des données de géoradar seront utilisées pour déterminer le nombre des catégories de condition du pont.

La méthode proposée fonctionne comme ceci. Une fois que les amplitudes des données sont obtenues pour tous les signaux réfléchis des barres d'armature à l'aide du processus classique de l'analyse d'amplitude. Les analystes se demandent en se basant sur l'analyse visuelle des profils géoradar: combien de catégories de condition seraient appropriée pour décrire la condition de la dalle de pont. Ensuite, les amplitudes des données seront regroupées dans le même nombre de « clusters », à l'aide de K-moyenne (K-means), la technique de clustering la plus couramment utilisée. En se basant sur le résultat du cluster, la valeur de seuil pour chaque catégorie de condition sera déterminée et tracée.

La procédure pour déterminer le nombre de catégories (K) sur l'état est proposée de la manière suivante: (1) Si l'âge de la dalle de pont est inférieur à 10 ans, alors K sera égal à 1, ce qui signifie une dalle en béton sain. (2) Si l'âge de la dalle de pont est supérieur à 10 ans, et ne montre pas des signes de corrosion, même après avoir été scanné par le GPR, alors K sera aussi égal à 1. (3) Si l'âge de la dalle de pont est supérieur à 10 ans et montre un faible signe de corrosion, alors K sera égal à 2, ce qui signifie une probabilité de corrosion modérée. (4) Si l'âge de la dalle de pont est supérieur à 10 ans et montre une sévère signe de corrosion, alors K sera égal à 3, ce qui signifie une probabilité de corrosion modérée à sévère.

Selon les catégories de condition antérieure, une stratégie d'intervention a été suggérée, comme l'indique le Tableau 3.

Tableau 3: Les catégories des conditions et les interventions correspondantes

Zone de béton sain probable	Zone de corrosion modérée probable	Zone de corrosion sévère probable
Bonne condition, pas d'intervention à prévoir.	Existence d'une corrosion active et peut se développer à des dommages réels à court terme (corrosion sévère).	Probablement un béton endommagé qui doit être réparé / remplacé.

3.2.2 Analyse de corrélation

Le moyen le plus idéal pour détecter la détérioration de béton d'une dalle de pont lors de l'inspection est de comparer les signaux mesurés actuellement avec les signaux mesurés par le géoradar du même pont lors de sa construction. En d'autres termes, au lieu d'interpréter la différence relative entre les amplitudes des signaux d'un seul balayage, une manière plus appropriée doit être analysée selon la différence entre l'ensemble de données des séries chronologiques. Le flux de travail global proposé pour le suivi à long terme des dalles de pont en béton en utilisant les données de géoradar des séries chronologiques est présenté dans la Figure 4 (Dinh et al., 2014).

Comme on peut le voir, quand une dalle de pont est encore en bon état, une référence des données de géoradar avec un balayage de l'endroit, doit être enregistrée et stockée dans la base de données. Périodiquement, à chaque fois pendant la phase d'opération et de maintenance ou à chaque fois que le pont a besoin d'être inspecté, des nouvelles données de géoradar aux mêmes lignes de balayage utilisant le même type d'équipement seront collectées. Ensuite, une comparaison sera effectuée pour chaque paire de signaux individuels de géoradar (A-scans) collectés au même endroit en utilisant le modèle développé dans cette étude. Enfin, en se basant sur le résultat de la comparaison, la condition à l'endroit inspecté sera évaluée.

En conséquence, si les signaux comparés sont avérés similaires les uns aux autres, cela signifie que l'état du béton à l'endroit inspecté est toujours bon. De cette manière, on élimine le besoin de chercher des zones de béton sain sur le pont pour obtenir des signaux de référence quand la méthode d'analyse d'image est appliquée. De plus, les signaux déformés à cause de la variation structurelle peuvent être facilement observés et différenciés avec des défauts provoqués par corrosion en les comparant avec les signaux de référence.

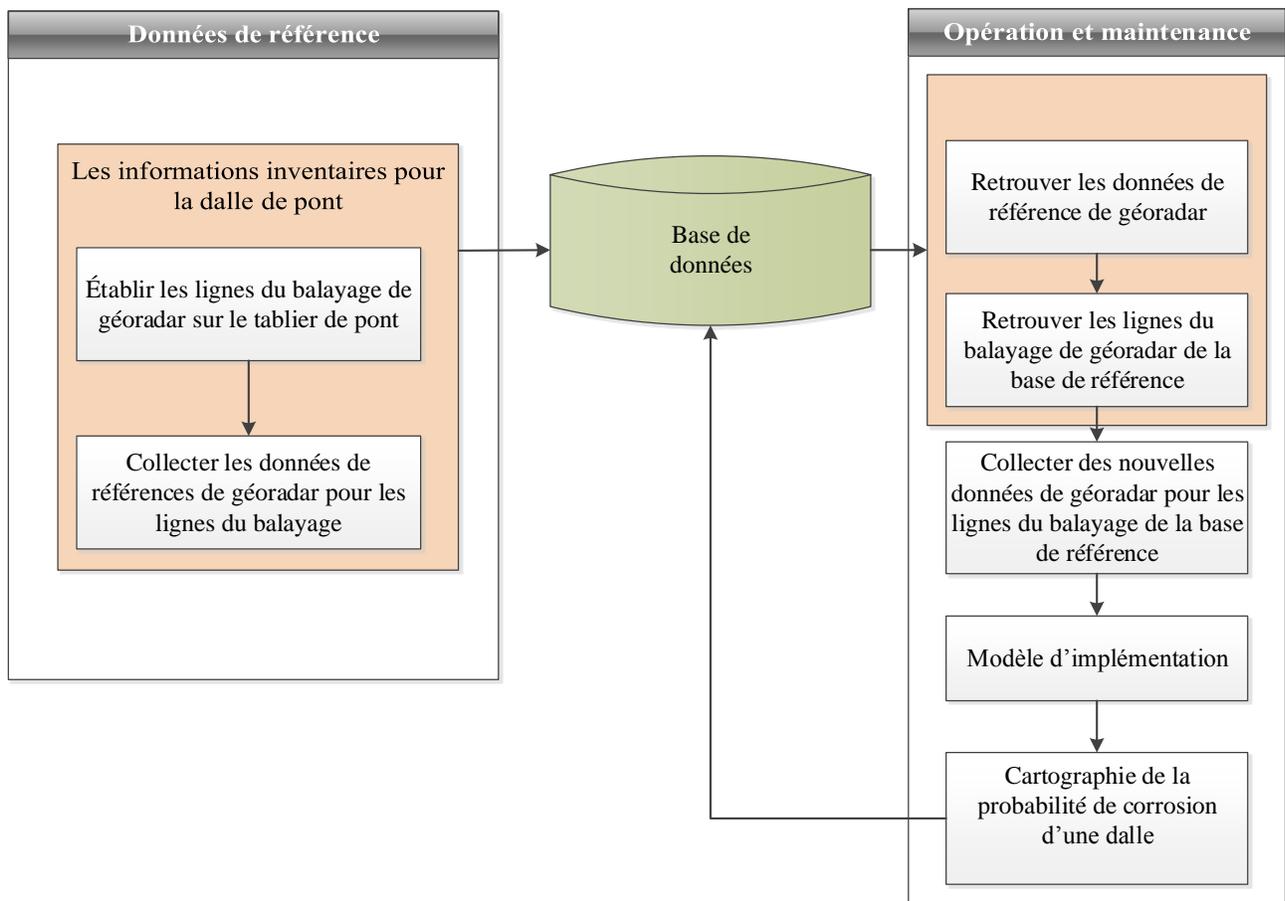


Figure 4: Flux de travail à long terme pour évaluer la condition des dalles de ponts en béton en utilisant le géoradar

3.2.3 Indice de la corrosivité de la dalle de pont (ICDP)

Le modèle de la corrosivité de la dalle du pont commence en effectuant une enquête en utilisant un questionnaire. Son but principal, est de solliciter les opinions des experts de pont et de géoradar pour créer des fonctions d'appartenance qui seront utilisées finalement pour convertir la cartographie de condition de géoradar à en format numérique de l'indice de la corrosivité de la dalle de pont. Des experts ont été invités à fournir des valeurs spécifiques pour P1, P2, T1, T2 comme le montre la Figure 5, où:

P1: est le point de transition entre un béton ayant une probabilité de corrosion modérée et le béton sain.

P2: est le point de transition entre une probabilité de corrosion modérée et une probabilité de corrosion sévère de béton.

T1: est le seuil de P1 si le pourcentage de chaque état de condition est trouvé par le géoradar.

T2: est le seuil de P2 si le pourcentage de chaque état de condition est trouvé par le géoradar.

Vu que le plan linguistique est très flou, les avis d'experts sont utilisés plus tard pour les convertir à des nombres nets.

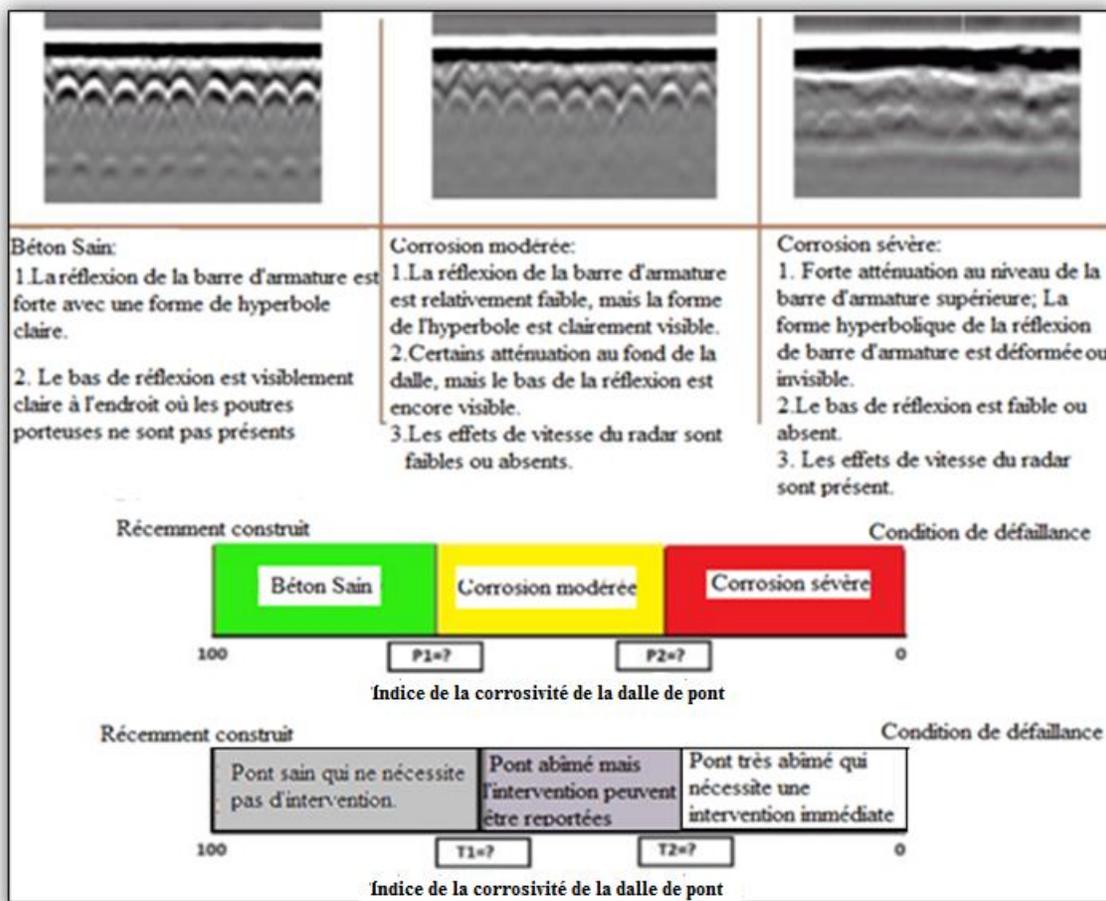


Figure 5: Explication de l'enquête

4 MODÈLE DE CALIBRATION ET D'ANALYSE

Après la collecte de résultats de l'enquête, l'analyse est réalisée sur les données pour calibrer la fonction d'appartenance. Tout d'abord, les consistances de jugement entre P1, P2 et entre T1, T2 sont contrôlées en traçant un histogramme et en assumant une distribution normale. Ensuite, les valeurs incohérentes sont éliminées, les réponses sont réorganisées et la régression linéaire est appliquée pour déterminer les limites des appartenances comme le montre la Figure 6, puis ces fonctions sont tracées comme le montre la Figure 7 et la Figure 8, respectivement.

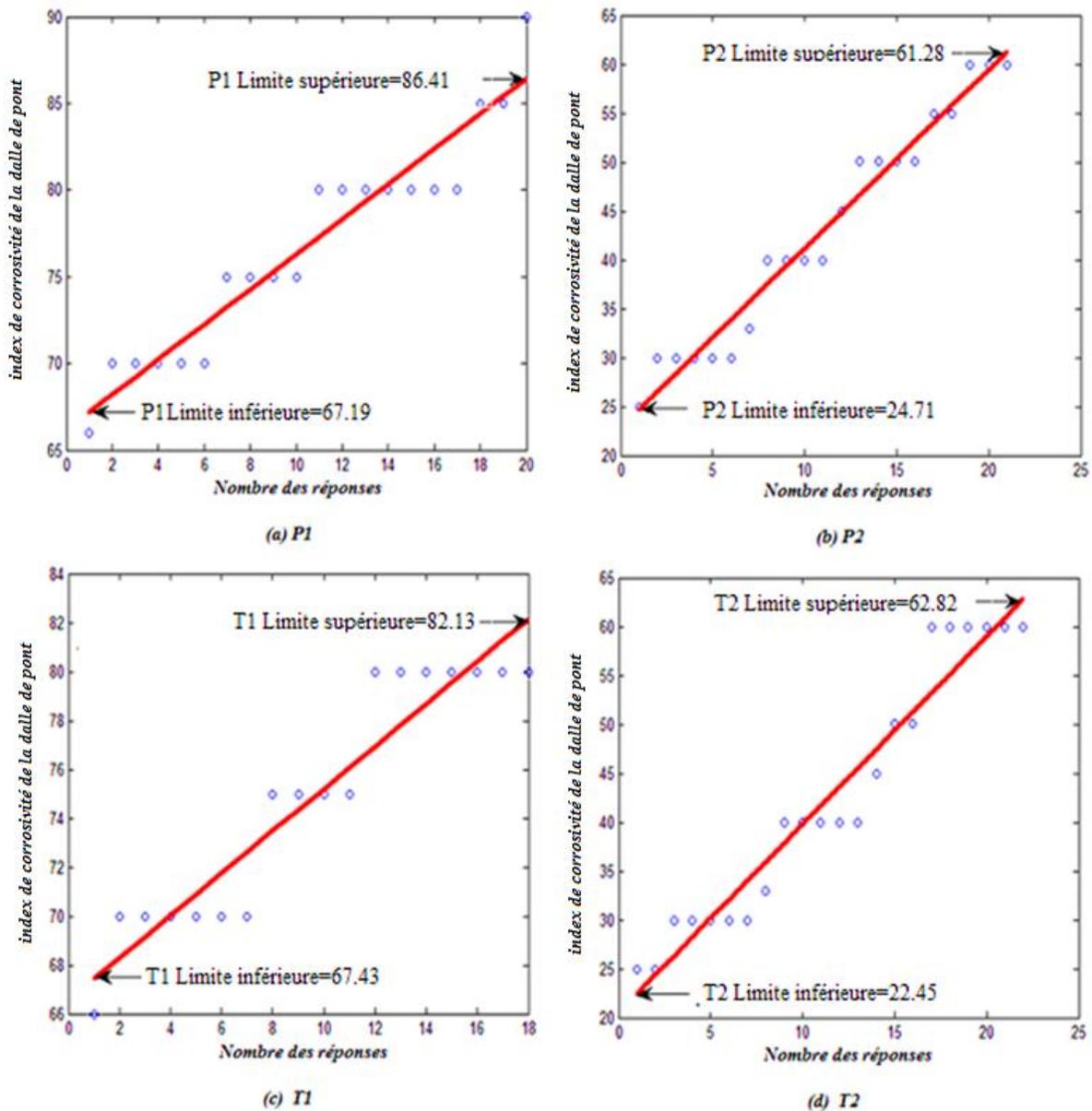


Figure 6: Régression linéaire pour la calibration de la fonction d'appartenance

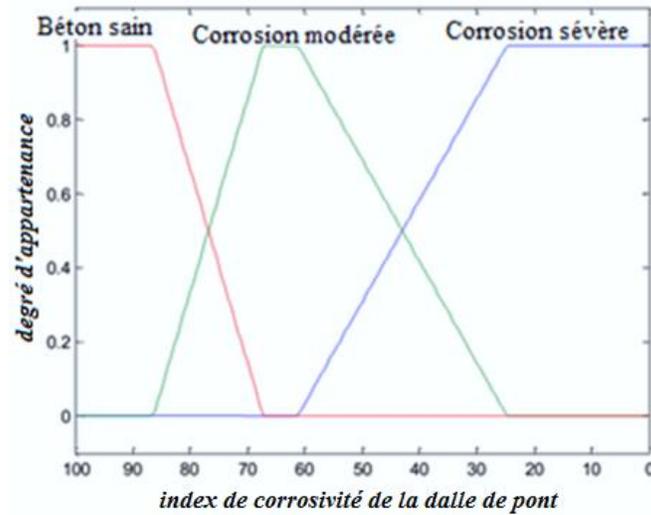


Figure 7: Fonctions d'appartenance calibrées sur la base de P1 et P2

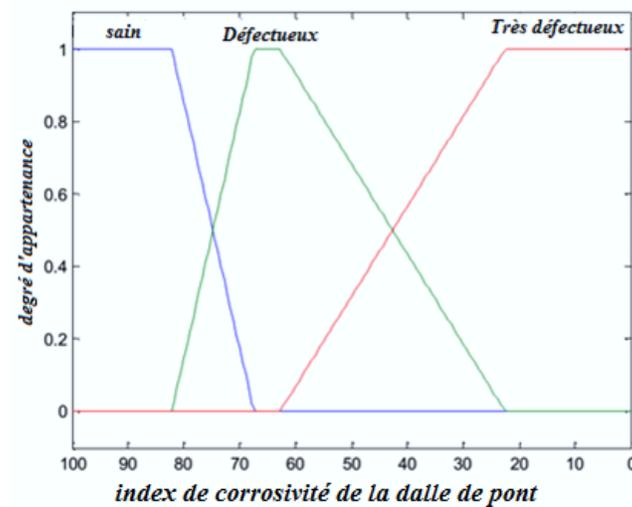


Figure 8: Fonctions d'appartenance calibrées sur la base de T1 et T2

La dernière étape de l'analyse est la « défuzzification » de l'ensemble flou résultant. Idéalement, l'ICDP doit avoir une gamme de 100 à 0; Toutefois, en raison d'informations floues fournies par la carte de la corrosion de géoradar, cette gamme ne peut jamais être atteinte par l'ICDP calculé à partir du modèle. Par conséquent, entre les méthodes de centroïde et de bissectrice de la défuzzification de l'ensemble flou résultant, on choisit la stratégie qui offre une gamme maximale de l'indice dans cette recherche. La comparaison entre les résultats de ces deux méthodes (voir Figure 9), nous a permis d'identifier la meilleure technique qui est la bissectrice de la défuzzification.

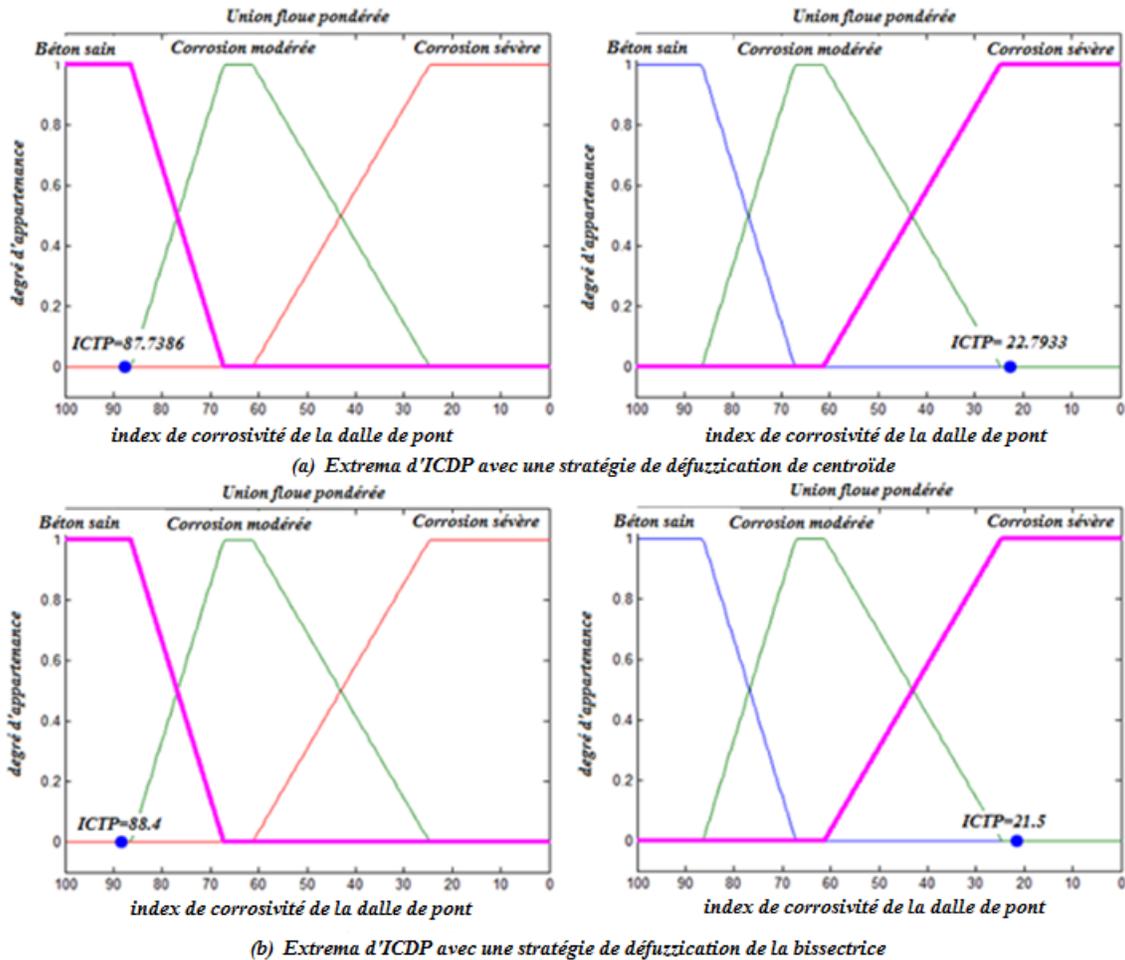


Figure 9: Comparaison entre deux méthodes de défuzzification

5 IMPLÉMENTATION ET MODÈLE DE VALIDATION

Dans cette section, le pont Pohatcong dans le New Jersey sera utilisé pour tester la méthode d'analyse d'amplitude ainsi que d'illustrer la mise en œuvre du système développé.

L'idée de base est qu'avec les données de séries chronologiques collectées pendant la période d'étude de 5 ans, on suppose qu'une progression de la détérioration sur le pont devrait être en quelque sorte observée avec la technique d'évaluation de la condition. Cette hypothèse permet aux différents résultats d'analyse d'être vérifiée ou validée. La Figure 10 représente les cartes d'atténuation de quatre ensembles de données après une correction de profondeur entre Mai 2008 et Septembre 2013. Il est clairement démontré que l'analyse d'amplitude offre une amélioration illogique de l'état du pont, donc cette technique n'est pas appropriée pour l'interprétation des données de géoradar.

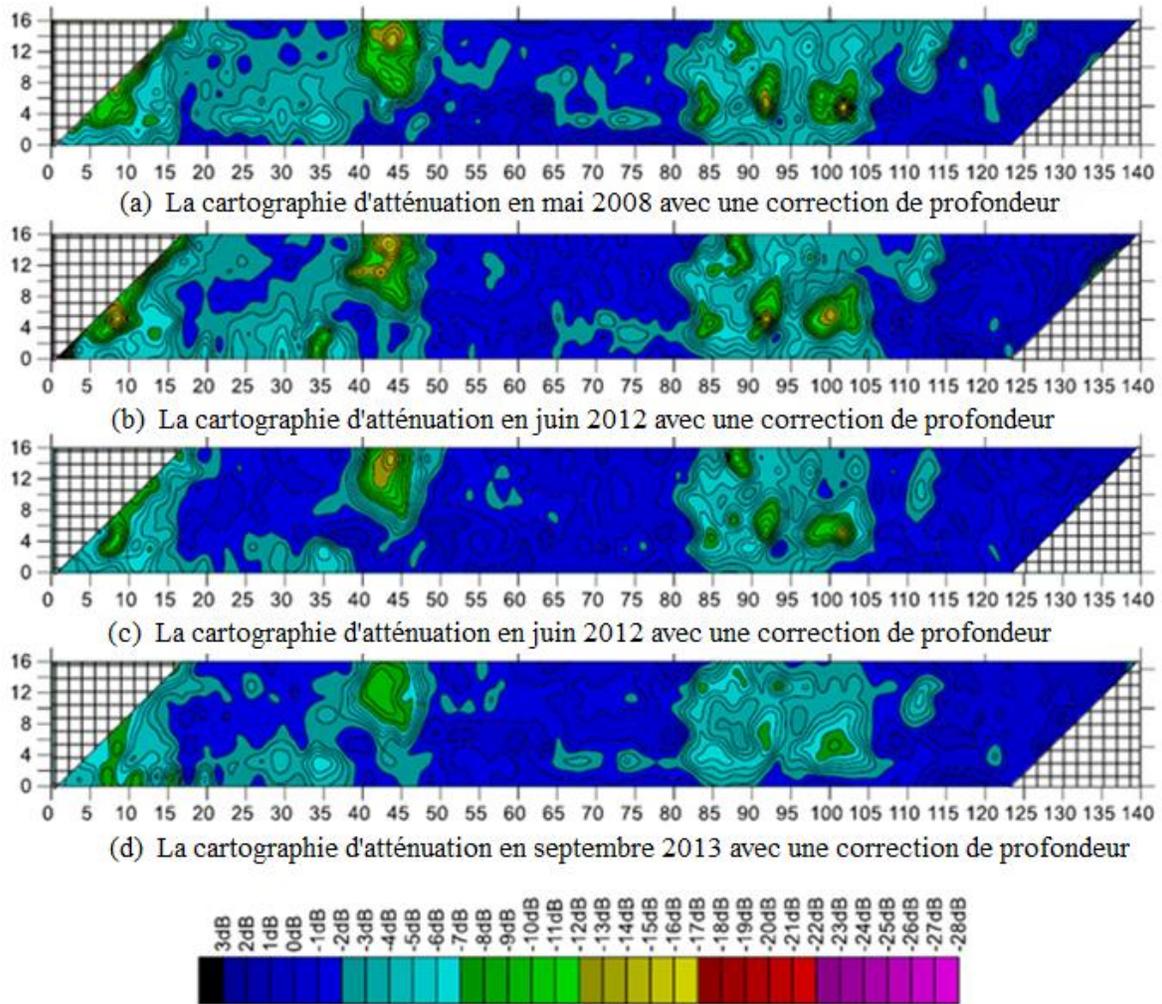


Figure 10: Carte d'atténuation pour quatre ensembles de données avec une correction de profondeur

De plus, la méthode de calibration de seuil proposé dans cette recherche sera validée contre le modèle développé par Martino et al. (2014). La validation se fait en comparant la zone de corrosion estimées par chaque méthode. Le pourcentage de la zone de corrosion basée sur le modèle de Martino et al. (2014) a été calculée pour chaque ensemble de données en utilisant la formule de l'équation (1). Les résultats sont présentés dans le tableau 4. Comme on peut voir, il existe une réduction illogique d'environ 25% de la zone corrodée entre juin 2012 et septembre 2013.

$$\text{Pourcentage corrodée} = (14.813762 * \text{coefficient d'asymétrie} * \text{Moyenne}) - 0.016987 \quad (1)$$

Où :

- Le coefficient d'asymétrie est la mesure de l'asymétrie de la distribution autour de sa moyenne.
- La Moyenne est la mesure de la tendance centrale de la distribution ou de la variable aléatoire caractérisée par cette distribution.

Tableau 4: Zone de corrosion basée sur le modèle de Martino et al. (2014)

Ensemble de données	Mai. 2008	Jun. 2012	Déc. 2012	Sep. 2013
Pourcentage de la zone corrodée	59.61%	79.25%	64.89%	54.58%

Cependant, avec la méthode proposée, trois catégories de condition seront utilisées pour regrouper automatiquement les données d'amplitude. Les seuils et les pourcentages de la zone de chaque catégorie de condition basée sur les résultats de regroupement (clustering) de K-Moyenne sont présentés dans la Figure 11, tandis que les cartographies de condition pour les quatre ensembles de données basés sur ces seuils sont présentées dans la Figure 12. La méthode proposée fournit des résultats beaucoup plus stables comme le montre la Figure 12. On remarque sur cette figure la présence d'une corrosion modérée en jaune et une corrosion sévère en rouge (voir Figure 12). D'après ce résultat, on démontre l'efficacité de la méthode proposée.

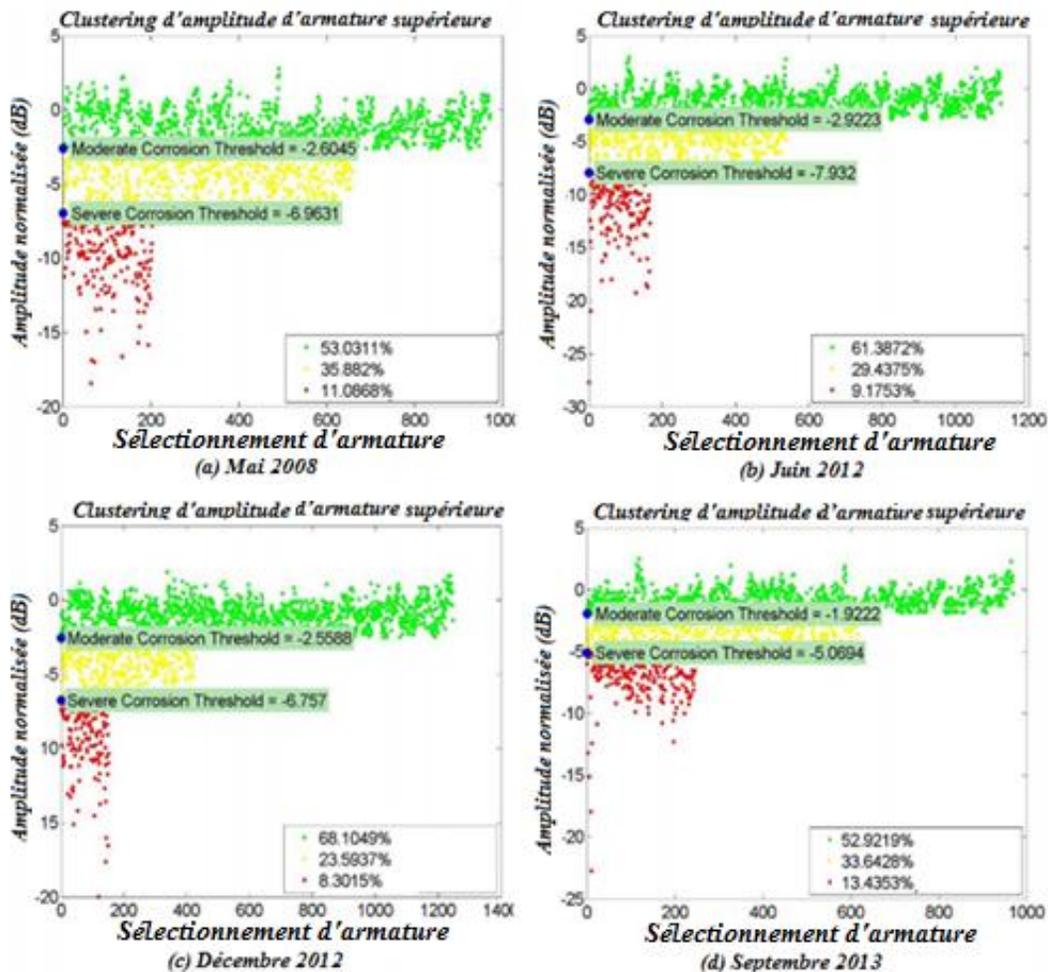


Figure 11: Regroupement (clustering) d'amplitude pour les quatre ensembles de données

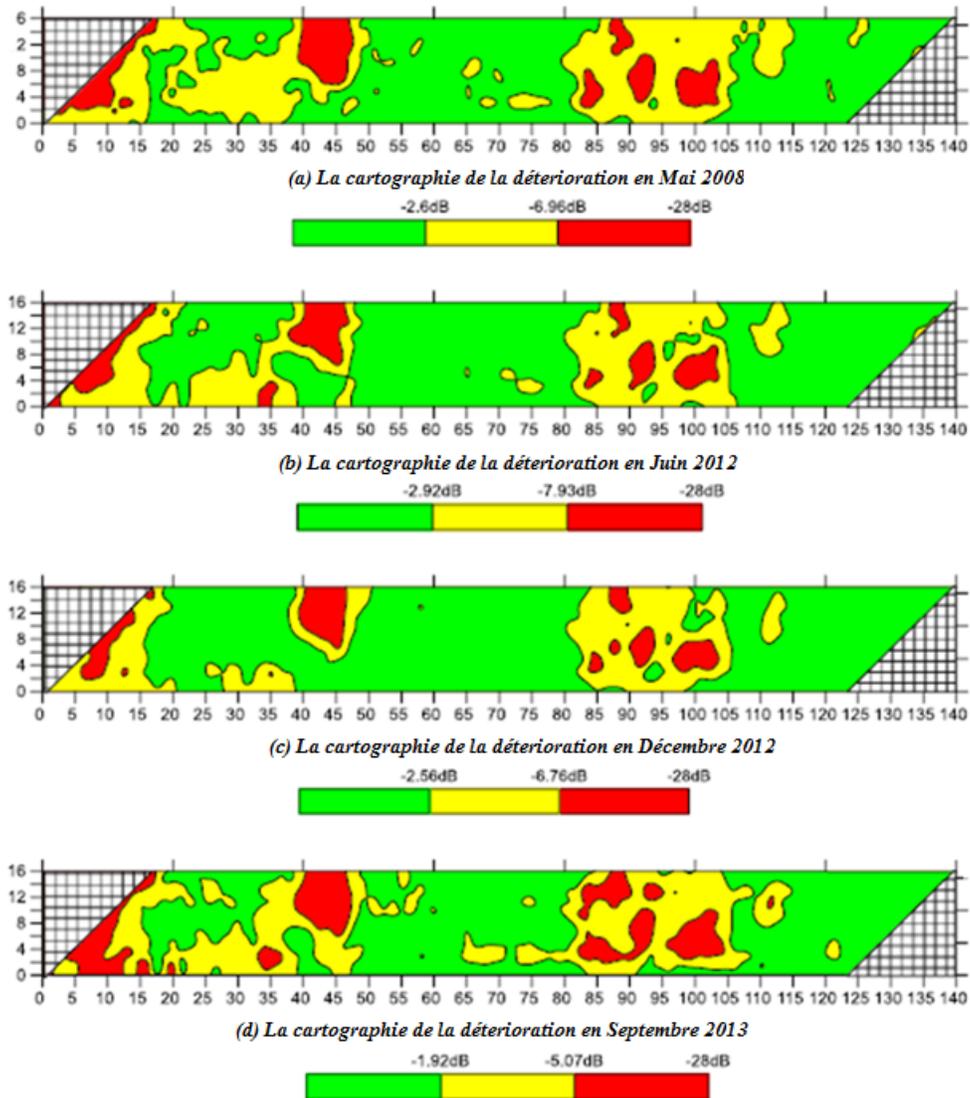


Figure 12: La cartographie de la détérioration pour quatre ensembles de données basées sur la calibration de seuil

Un autre exemple de validation est présenté dans la Figure 12. Les cartographies de cette figure corréleront parfaitement avec la cartographie fournie par l'analyste expert de géoradar présentée dans la Figure 13 où les valeurs de seuil ont été choisies subjectivement. En outre, le résultat de géoradar est également validé puisqu'il présente une bonne corrélation avec le résultat du test de résistivité du béton présenté dans la Figure 14. Les deux cartographies ont été développées par le Centre d'Infrastructure et des Transports Avancés à l'Université de Rutgers en 2012.

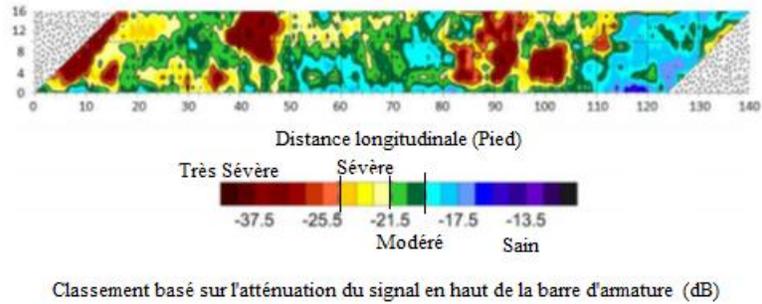


Figure 13: La cartographie de condition de géoradar basée sur la sélection subjective des valeurs de seuil (La et al. 2013)

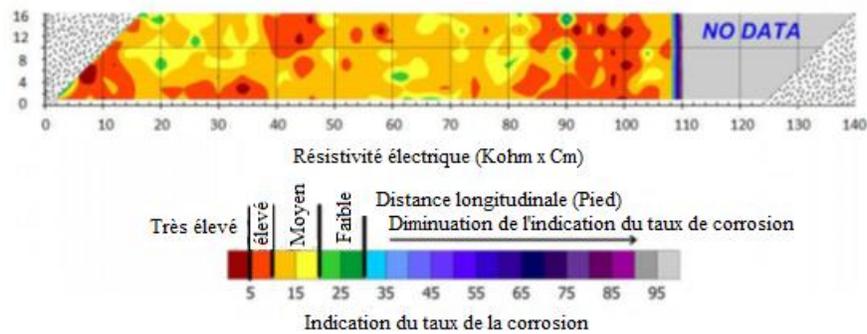


Figure 14: Résultat du test de la résistivité du béton (La et al. 2013)

6 CONCLUSION

Basé sur les résultats de l'implémentation du modèle, certaines conclusions importantes peuvent être résumées. Premièrement, parmi les différentes technologies existantes de l'évaluation non-destructive (END), le géoradar (GPR) est la technique la plus appropriée pour inspecter les dalles de ponts en béton. Deuxièmement, bien que l'analyse d'amplitude soit la méthode la plus couramment utilisée pour interpréter les données de géoradar pour les dalles de pont en béton, elle possède deux limitations dans le choix subjectif de la valeur de seuil et la fausse indication de l'état de la structure. Troisièmement, la technique d'étalonnage de seuil développé dans cette étude sur la base de K-Moyennes résout non seulement le problème de la subjectivité dans le choix de la valeur de seuil, mais elle facilite également le calcul automatique du pourcentage de zone pour chaque catégorie de condition. Ces pourcentages sont utilisés ultérieurement pour calculer l'index de corrosivité de la dalle de pont. Quatrièmement, l'analyse de corrélation des séries chronologiques de données du GPR développées dans cette recherche peut être utilisée à la fois pour l'évaluation des conditions et pour le suivi des conditions de la dalle en béton. Contrairement à l'interprétation d'amplitude, l'analyse de corrélation fournit un résultat attendu, où la moyenne du coefficient de corrélation du pont diminue avec le temps. Finalement, la collecte de l'opinion des experts s'avère être une approche efficace pour résoudre le problème de la classification de la condition puisque leurs jugements ont été utilisés pour la calibration des fonctions d'appartenance des floues.

7 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.

8 RÉFÉRENCES

- ASCE. 2009 Report Card for Americas Infrastructure. Technical report, American Society of Civil Engineers, 2009.
- Barnes, C., Trottier, J. F., and Forgeron, D. (2008) "Improved Concrete Bridge Deck Evaluation Using GPR by Accounting for Signal Depth-Amplitude Effects." *NDT & E International*, Vol. 41, No. 6, September, pp. 427-433.
- Dinh, K., Zayed, T., Romero, F., and Tarussov, A. (2014). "Method for Analyzing Time-Series GPR Data of Concrete Bridge Decks." *ASCE Journal*.
- GSSI. RADAN 7 Manual. Geophysical Survey Systems, Inc. (2012).
- Kawamura, K., and Miyamoto, A. (2003). "Condition state evaluation of existing reinforced concrete bridges using neuro-fuzzy hybrid system." *Computers & Structures*, Elsevier, Vol. 81, Iss. 18–19, August, pp. 1931-1940.
- La, H. M., Lim, R. S., Basily, B., Gucunski, N., Yi, J., Maher, A., and Parvardeh, H. (2013). "Autonomous robotic system for high-efficiency non-destructive bridge deck inspection and Devaluation." *Automation Science and Engineering (CASE)*, IEEE International Conference, August, pp. 1053-1058.
- Lounis, Z. (2013). "Critical concrete infrastructure: extending the life of Canada's bridge network." *Construction Innovation*, Vol. 18, No. 1.
- Martino, N., Birken, R., Maser, K., and Wang, M. (2014). "Developing a deterioration threshold model for assessment of concrete bridge decks using ground penetrating radar." *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting* (No. 14-3861).
- Parrillo, R., Roberts, R. and Haggan, A. (2006). "Bridge Deck Condition Assessment using Ground Penetrating Radar." *ECNDT Conference Proceeding*, Berlin, Germany, pp. 25-29.
- Sasmal, S., Ramanjaneyulu, K., Gopalakrishnan, S., and Lakshmanan, N. (2006). "Fuzzy Logic Based Condition Rating of Existing Reinforced Concrete Bridges," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 20, No. 3, August, pp. 261-273.
- Sasmal, S., and Ramanjaneyulu, K. (2008). "Condition evaluation of existing reinforced concrete bridges using fuzzy based analytic hierarchy approach." *Expert Systems with Applications*, Vol. 35, Iss. 3, October, pp. 1430-1443
- Scott, M., Rezaizadeh, A., and Moore, M. (2001). "Phenomenology Study of HERMES Ground Penetrating Radar Technology for Detection and Identification of Common Bridge Deck Features," FHWA-RD-01-090, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
- Polikar, R. (2006). "Pattern Recognition". *Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering*, John Wiley & Sons, Inc.

- Tarighat, A., and Miyamoto, A. (2009). "Fuzzy concrete bridge deck condition rating method for practical bridge management system." *Expert Systems with Applications, An international Journal*, Elsevier Ltd, pp. 12077-12085.
- Tarussov, A., Vandry, M. and De La Haza, A (2013). "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, pp. 1246–1254.
- Tee, A.B. (1988). "The Application of Fuzzy Mathematics to Bridge Condition Assessment," Ph.D thesis, Purdue Univ., West Lafayette, Ind, US.
- Wagstaff, K., Cardie, C., Rogers, S., and Schrödl, S. (2001). "Constrained k-means clustering with background knowledge." In *ICML*, June, Vol. 1, pp. 577-584.
- Zadeh, L.A. (1965). "Fuzzy Sets." *Information and Control*, Vol. 8, No. 3, pp. 338-353.