

Modélisation de l'état d'un pont en béton à l'aide d'un modèle non linéaire de prédiction de la détérioration

Abdoul Salam Bah abdoul-salam.bah.1@ulaval.ca, **Thomas Sanchez** thomas.sanchez@gci.ulaval.ca, **Yan Zhang** yan.zhang9@mail.mcgill.ca, **Kotaro Sasai** kotaro.sasai@mail.mcgill.ca, **David Conciatori** David.Conciatori@gci.ulaval.ca, **Luc Chouinard** luc.chouinard@mcgill.ca, **Gabriel John Power** gabriel.power@fsa.ulaval.ca, **Nicolas Zufferey** N.Zufferey@unige.ch

Résumé

Pour les ouvrages d'art (ponts et viaducs), les systèmes de gestion sont le plus souvent basés sur les résultats d'inspections visuelles et d'évaluations ciblées d'un nombre restreint de structures. Les auscultations visuelles de ponts dépendent du jugement de l'inspecteur et sont converties, selon une procédure prédéfinie, en une cote qui décrit qualitativement l'état des matériaux (cote des matériaux) et la capacité structurale (cote structurale). Dans les régions froides au climat sévère, la détérioration des infrastructures est principalement due à la corrosion des armatures par les ions chlorures provenant des opérations d'épandage de sel de déverglaçage pendant la saison hivernale. Dans le cas de structures vieillissantes, les détériorations internes et potentiellement cachées doivent être prises en compte dans l'évaluation de l'état d'un ouvrage. On propose donc dans cet article de raffiner la cote visuelle par une analyse des dégradations internes du matériau (dégradations invisibles). L'évaluation de l'état d'un pont en béton sera faite à l'aide d'un modèle de prédiction de détérioration non linéaire TransChlor[®]. Ce modèle prend en compte les conditions climatiques et d'expositions environnementales réelles du pont à l'étude. Les prédictions seront déduites à partir de tests non destructifs de l'état du pont. L'intégration du modèle dans l'évaluation permet de compléter les résultats des auscultations visuelles afin d'améliorer l'évaluation de l'état du pont. On peut déjà envisager d'étendre l'application de ce modèle à la gestion et la maintenance d'un réseau complet de ponts routiers pour une gestion encore plus efficace.

Mots clés : Béton, Pont, Détérioration, Évaluation, Cote.

1. Introduction

La plupart des ponts d'Amérique du Nord ont été construits dans les années 1950. Le design et la conception de ces ponts ne prenaient pas en considération les actions climatiques et environnementales. Ces structures ont une durée de vie moyenne de 68 ans pour les ponts routiers, 67 ans pour les artères et 66 ans pour les routes collectrices. Les ponts des routes locales (48 ans) et les passerelles pour piétons (51 ans) ont une durée de vie moyenne plus courte (SC, 2018). D'importants volumes de sels déglacant sont épandus chaque saison hivernale afin de garantir la disponibilité de la chaussée aux usagers et aux marchandises. L'application de ces sels est à l'origine de la détérioration des ponts en béton armé en corrodant les aciers d'armature du béton. Les ions chlorures contenus dans ces sels migrent dans le béton et détruisent la couche d'oxyde passive qui protège l'acier d'armature, rendant l'acier vulnérable à la corrosion (Figure 1) (Gode and Paeglitis, 2014; R. Wolofsky, 2011). Dans le cas des structures vieillissantes, les gestionnaires tiennent à protéger l'infrastructure par une planification élaborée de l'entretien grâce à une surveillance et des inspections régulières à

intervalles appropriés. Pour la durabilité de ces ouvrages, il est essentiel que les stratégies d'entretien et de réhabilitation soient planifiées le plus proche possible du point de bifurcation avec des moyens d'auscultation le plus raffiné possible. Ce point de bifurcation est le moment où la cinétique de détérioration de l'ouvrage passe d'une évolution lente et linéaire à une évolution rapide en exponentielle. La surveillance régulière comprend l'inspection, la réparation, la réhabilitation ou les travaux (incluant les fermetures du pont). Pendant ces interventions, le gestionnaire veille à ce que le trafic se poursuive sans interruptions majeures pendant les inévitables périodes d'entretien et de réparation.

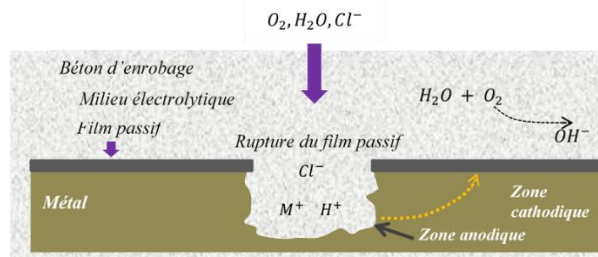


Figure 1. Mécanisme de la corrosion électrochimique en présence du chlore.

Cet article présente une modélisation de l'état d'un pont à l'aide d'un modèle de détérioration permettant d'évaluer la probabilité d'initiation de la corrosion à partir d'essais non destructifs. Ces outils sont destinés à être utilisés afin d'estimer la détérioration d'un pont pendant son cycle de vie, de manière proactive plutôt que réactive. L'évaluation des dégradations internes du matériau d'une structure en complément aux auscultations périodiques de l'inspection visuelle permet d'améliorer l'évaluation des structures vieillissantes d'un réseau routier. Cette stratégie contribue à l'optimisation de la performance du réseau.

La méthodologie proposée est démontrée pour un pont en béton armé vieillissant de plus de 60 ans, situé au Québec. Une illustration (Figure 2) du pont soumis à l'étude met en évidence les différentes conditions d'expositions aux ions chlorures : Brouillard (B-Cl); Direct (D-Cl) et éclaboussures (E-Cl). Les zones au-dessous du pont exposées au brouillard et aux éclaboussures sont délimitées par une hauteur maximale H_{max} (Keserle et al., 2021). Cette approche a permis de lier l'importance du microclimat dans l'évaluation en vue de prédire l'évolution des détériorations des éléments de la structure et également de la structure entière.

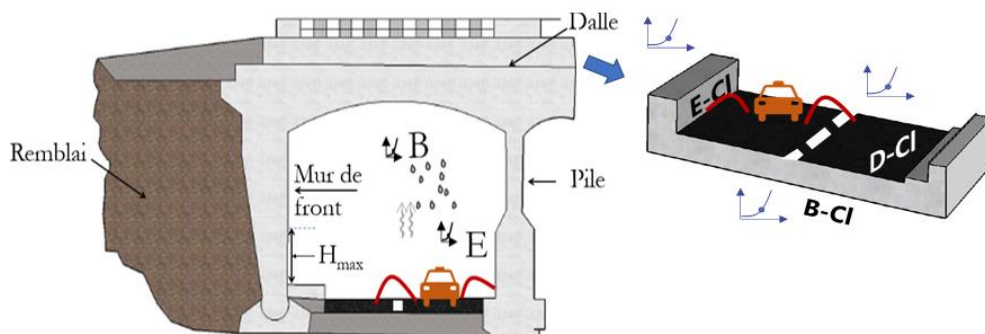


Figure 2. Demi-profil du pont à l'étude.

Le modèle de transport (TransChlor[®]) est utilisé pour le transport non linéaire unidimensionnel des ions chlorure dans le béton. Il prend en compte la diffusion thermique, le transport de l'eau par diffusion et par capillarité, la diffusion des ions chlorures et la carbonatation. Le modèle

utilise des éléments finis pour résoudre les équations de transport des ions chlorures en fonction de la profondeur et du temps par différences finies (Conciatori et *al.*, 2008).

2. Conditions de bord du modèle TransChlor®

Le modèle considère le lieu géographique du pont et les conditions climatiques à partir des données horaires provenant de stations météorologiques, c.-à-d. la température, l'humidité externe et les précipitations (Figure 3). La cinétique des véhicules permet de définir les zones d'exposition aux produits salants. Le degré et le type d'exposition au microclimat environnant sont évalués pour chaque élément du pont. Le moment de passage de la saleuse et la concentration épanchée sont des paramètres importants pour connaître les concentrations de chlorure à l'interface du béton. Une intervention (passage de la saleuse) dépend des conditions microclimatiques, c.-à-d. des précipitations ou d'un haut taux d'humidité relative dans l'air reliées à une température de l'air en-dessous de 0°C (obtenue par itération). Cette itération se fait sur le nombre de passage de la saleuse qui est estimé par la consommation annuelle de sel dans une région (quantité de sel déposée par la saleuse lors de son passage) (Conciatori et *al.*, 2010).

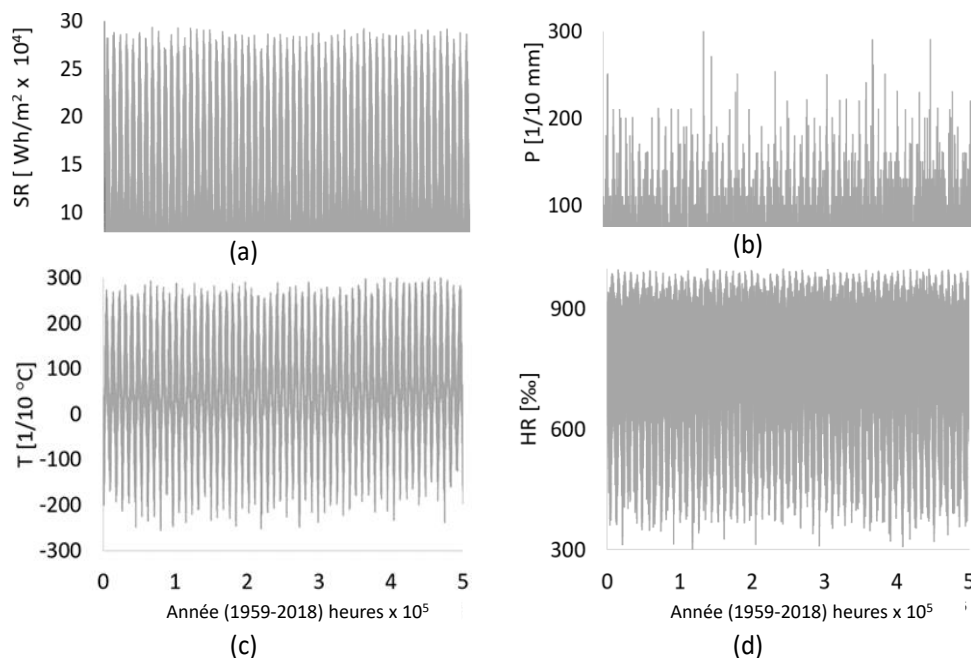


Figure 3. Données climatiques horaires : a) Rayonnement Solaire, b) Précipitations, c) Température de l'air, d) Humidité Relative.

Des tests non destructifs ont permis de caractériser les propriétés de perméabilité du béton. Le transport de d'ions, de gaz et d'eau dans le béton dépend directement de sa perméabilité. La perméabilité à l'air du béton et sa résistivité ont été mesurées sur le béton de peau de différents éléments structuraux du pont (dalle, mur de front et au niveau des murs de soutènement). Ces mesures sont sensibles à la teneur en eau dans le réseau de pores : la teneur en eau réduit la perméabilité à l'air et la résistivité du béton. Si un béton est totalement saturé, soit une résistivité électrique inférieure à $\rho = 1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, la mesure de perméabilité à l'air est impossible. Le coefficient de perméabilité à l'air k_T est obtenu avec l'appareil de perméabilité Torrent® (Denarié, et *al.*, 2005; Torrent, 1997). La résistivité électrique ρ du béton est mesurée avec l'appareil Wenner® (Conciatori, 2006; Gowers et Millard, 1999). Un graphique permet de représenter les mesures (corrigées à 20°C) afin de déterminer la perméabilité du béton d'enrobage (Figure 4). Les données du modèle TransChlor®, comme le coefficient de diffusion

de l'eau, des chlorures et le coefficient de capillarité, sont directement déduites de ces résultats d'essai de perméabilité à l'air.

Propriété de la couverture du béton	Indice
Grande perméabilité	5
Permeable	4
Moyen perméable	3
Perméabilité faible	2
Perméabilité très faible	1

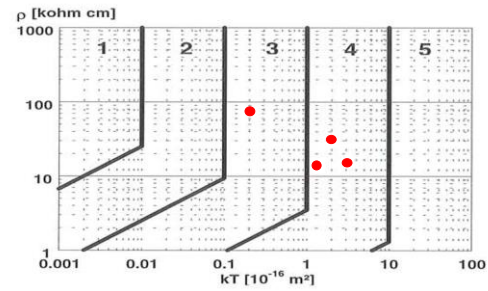


Figure 4. Qualité du béton (1-5) selon les mesures de perméabilité à l'air et de résistivité. (Torrent, 1997)

3. Simulation avec le modèle TransChlor®

Les simulations avec le modèle de détérioration TransChlor® sont validées avec des mesures provenant de carottes prélevées sur la face inférieure et supérieure de la dalle (Figure 5). Pour le dessous de la dalle, le modèle suppose une exposition au brouillard chargé de sel, tandis qu'une exposition directe protégée par le bitume est prise en compte pour le dessus de la dalle. La dalle du pont étudié ne comporte pas de membrane de protection. Les profils de pénétration des chlorures dans la dalle obtenue avec le modèle de détérioration TransChlor® corrélient avec les tests expérimentaux. La variabilité observée sur les carottes est due au fait qu'elles ont été prélevées de manière dispersée sur la dalle où certaines carottes étaient situées à des expositions plus sévères aux chlorures (Keserle et *al.*, 2021).

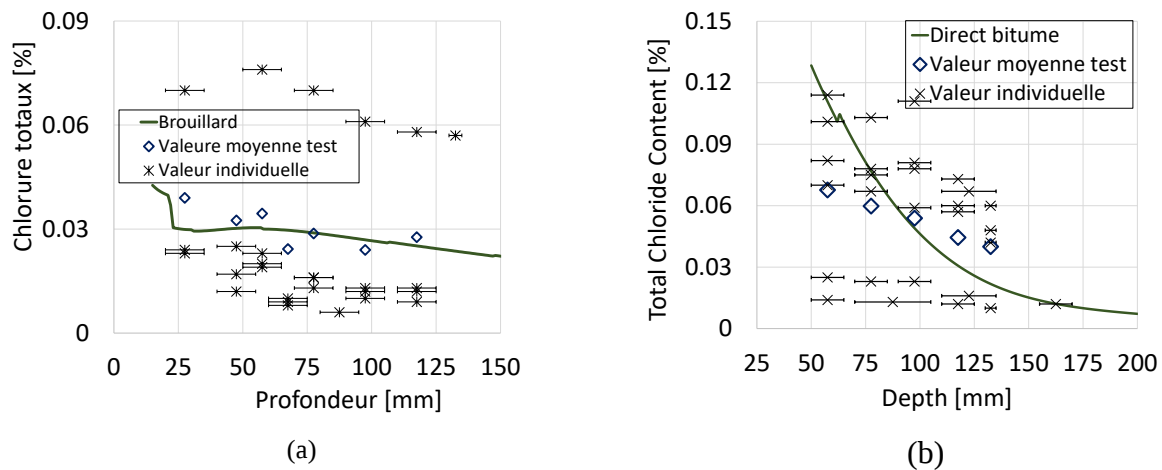


Figure 5. Teneur totale en ions chlorure (a) dessous de la dalle, (b) dessus de la dalle.

Le bitume est perméable à l'eau et l'absence de membrane d'étanchéité permet aux chlorures de s'infiltrer depuis le dessus de la dalle de béton en présence de sel de déverglaçage (Glanville, 1962). Le transport des ions chlorures est accentuée à la fin de l'hiver et au début du printemps par le mouvement de l'eau lors des cycles de gel-dégel, la circulation routière et le poids des camions et des véhicules conduisant aux fissurations du bitume (Hobeda, 2000). Le bitume protège partiellement le béton des cycles de mouillage-séchage et réduit l'exposition à l'eau stagnante.

L'eau se déplace par diffusion vers l'interface bitume-granulat sous l'influence de l'énergie libre négative de Gibbs d'adsorption de l'eau provenant d'une humidité de 99% (Curtis et al., 1992). En plus, à l'interface bitume-agrégat, l'infiltration d'eau augmente après même une année de service en raison de la fissuration de la couche de bitume (Brown et Kuntze, 1972). Comme les propriétés de transport ionique et d'eau dans le bitume sont inconnues et, qu'il n'existe aujourd'hui aucun essai destructif pour quantifier ces propriétés, l'exposition Directe-Bitume est déduite d'un état d'exposition intermédiaire entre une exposition à l'eau stagnante et une exposition au brouillard salin (Tableau 1). Cette déduction est obtenue par optimisation corrélée des résultats des simulations avec TransChlor® et les carottes prélevées dans cette zone (Figure 5b).

Tableau 1. Exposition de la face supérieure de la dalle en béton : (a) exposition directe et (b) exposition directe au bitume.

Expositions	Précipitation hivernale (jours)	Nombre de cycles de mouillage-séchage
Exposition directe (a)	8 807	23627
Exposition directe avec bitume (b)	123	234

La variation temporelle de la teneur en chlorure totaux est présentée à différentes profondeurs dans le béton (Figure 6). Le seuil de concentration des ions chlorures nécessaire à l'initiation de la corrosion est entre 0,025 et 0,030% par poids de béton et est basé sur les données de la Federal Highway Administration (FHWA). Cette évolution est très rapide à 25 mm d'enrobage, car la succion capillaire domine les processus de transport. À des profondeurs plus importantes (> 50 mm), le profil de concentration en ions chlorures augmente plus lentement avec le temps puisque le transport diffusif domine. La diffusion est également prédominante pour la partie supérieure de la dalle.

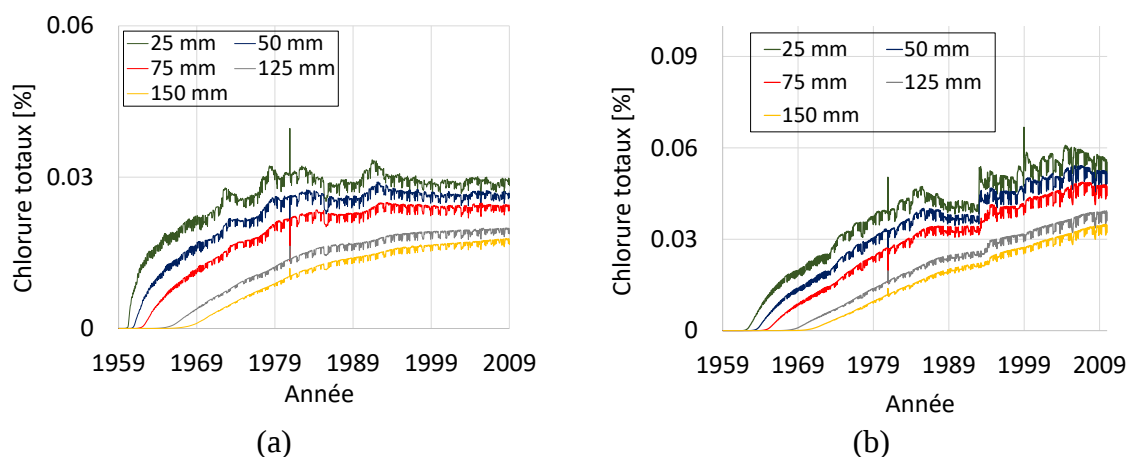


Figure 6. Profils des ions chlorures totaux (a) intrados (exposition brouillard) (b) extrados (exposition direct bitume).

4. Modèle probabiliste et cotes des éléments du pont

4.1 Introduction au modèle probabiliste

La probabilité d'initiation P_f de la corrosion est obtenue par le produit de convolution entre les distributions de probabilité de la concentration en chlorure au niveau des aciers d'armature f_s et la distribution de probabilité cumulée de la résistance des aciers aux chlorures F_R pour initier la corrosion à une profondeur x dans le béton :

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} (f_s(x, t) \cdot F_R(x)) dx \quad (1)$$

Cette équation peut être représentée par la Figure 7, où pour une profondeur donnée x , f_s représente la longueur interceptant la fonction $f_s(x)$ sur l'ordonnée à la position x et F_R représente la surface hachurée. Les bornes de l'intégration $\pm\infty$ peuvent changer selon les types de distribution probabiliste utilisées, toutefois valides pour des lois probabilistes normales.

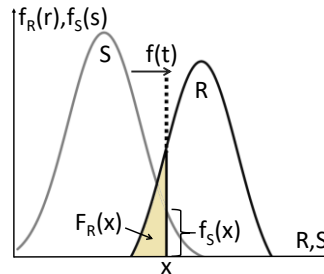


Figure 7. Probabilité d'initiation de la corrosion.

4.2 Cotation d'un élément structural

Cote matériau. L'état du matériau m_i d'un élément structural i est une fonction probabiliste représentant la possibilité de corrosion de l'acier d'armature P_f (en %), (2).

$$m_i = [100 - \sum_{k=1}^N \frac{S_{k,i}}{S_{T,i}} \cdot P_{f,k,i}] * 4 \quad (2)$$

où N est le nombre de zones d'expositions pour un élément donné, $S_{k,i}$ est la surface de l'élément exposée au type d'exposition i , S_T est la surface totale de l'élément et P_f est la probabilité que la corrosion ait commencé pour le type d'exposition k . Par exemple, le mur de front sur la Figure 2 est exposé aux éclaboussures dues au trafic et à leur vitesse de circulation. La partie supérieure, quant à elle, est exposée au brouillard salin. La hauteur maximale H_{max} a été considérée pour déterminer les différentes surfaces exposées (Keserle *et al.*, 2021). Ces deux zones d'exposition sont dissociées en deux éléments distincts ayant la même sensibilité face aux sollicitations climatique et environnementale.

Cote comportement. L'évaluation du comportement d'un élément c_i dépend de l'incidence de ses défauts. La note de comportement quantifie l'impact d'un élément structural sur la fonctionnalité de la structure. Une cote de comportement 4 correspond à un élément dont les défauts n'affectent aucunement ou conduisent seulement à une légère incidence sur son comportement. Lorsqu'elle est égale à 1, cette cote représente un élément dont les défauts ont une incidence très importante sur son comportement. Les éléments de pont sont classés en deux catégories : principaux et secondaires. Le Tableau 2 présente les critères généraux permettant d'évaluer la diminution de l'aptitude d'un élément à jouer son rôle dans le comportement global d'une structure. L'importance d'un élément dans la structure et l'incidence des défauts sur sa fonctionnalité ont été identifiées selon le manuel d'inspection des structures du Ministère des Transport du Québec.

Tableau 2. Critères généraux d'évaluation du comportement des éléments (MTQ, 2017).

Diminution de la capacité d'un élément à remplir son rôle		
c_i	Élément Principal	Élément Secondaire
4	0 à 10 %	0 à 10 %
3	10 à 20 %	10 à 30 %

2	20 à 30 %	30 à 50 %
1	>30 %	> 50 %

4.3 Cotation de la structure

L'approche du « principe parent-enfant », basée sur l'analyse de l'arbre de décision, permet d'identifier le lien entre la performance de l'élément à l'échelle locale et la performance globale du pont. Par exemple, une défaillance du sol se répercute sur la fondation de la culée (Figure 8a), qui se répercute à son tour sur l'assise du pont, puis sur la dalle, etc. Cette approche permet de considérer, dans la cotation de la structure, l'incidence d'une défaillance d'un élément sur les autres éléments auquel il est lié. Aussi, cette démarche permet de pondérer plus massivement les éléments qui ont un impact important sur l'ensemble de l'ouvrage.

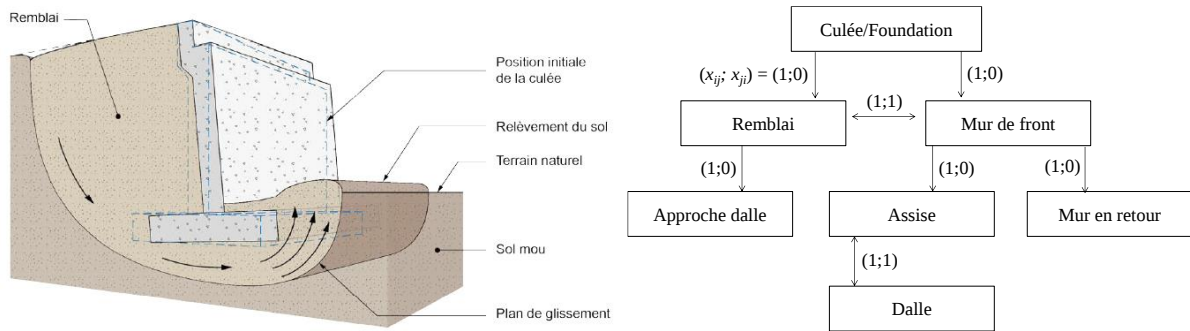


Figure 8. a) Exemple de liens de rupture de la culée. (MTQ, 2017). b) Liens de défaillance $(x_{ij}; x_{ji})$ pour la culée du pont.

Cette façon de quantifier la cotation permet de d'aboutir à une cote qui représente un état de service ou de sécurité global, en rassemblant respectivement les cotes matériaux et les cotes comportement de chaque élément. Cette approche se démarque de celle habituellement utilisées, comme l'approche du maillon faible, trop sécuritaire, ou l'approche de la moyenne des cotes des éléments, qui perd tout lien avec un indicateur physique comme l'état limite de service ou l'état limite ultime. Pour résumer, la cotation au niveau de la structure permet d'avoir une idée sur l'état limite de service et l'état limite ultime pour l'entièreté de la structure.

Soit la relation de dépendance x_{ij} entre deux éléments locaux i et j du pont:

- $x_{ij} = 1$ si la dégradation de l'élément i affecte l'élément j ;
- $x_{ij} = 0$ si la dégradation de l'élément i n'affecte pas l'élément j .

De cette façon, $(x_{ij}; x_{ji}) = (1; 0)$ lorsque la dégradation de l'élément i affecte l'élément j (mais la situation inverse n'est pas vraie). $(x_{ij}; x_{ji}) = (1; 1)$ signifie une situation de réciprocité entre les éléments i et j . Un exemple des liens entre les défaillances dues à un tassement de la fondation de la culée est présenté à la Figure 8b.

Les indices à l'échelle globale du pont considèrent les liens des défauts entre les éléments à l'échelle locale en termes de matériau I_M et de comportement I_C dérivé de la cote locale m_i et C_i calculés pour chaque élément i :

$$I_M(\%) = 100 * \left(1 - \left[\frac{R_M - R_{M_{meilleur}(\forall i, m_i=4)}}{R_{M_{pire}(\forall i, m_i=1)} - R_{M_{meilleur}(\forall i, m_i=4)}} \right] \right) \quad (3)$$

$$I_C(\%) = 100 * \left(1 - \left[\frac{R_C - R_{C_{meilleur}(\forall i, c_i=4)}}{R_{C_{pire}(\forall i, c_i=1)} - R_{B_{meilleur}(\forall i, c_i=4)}} \right] \right) \quad (4)$$

Ces indices d'état du pont I_M et I_C sont calculés en considérant les conditions d'état limite relatives de la structure, lorsqu'elle est dans son meilleur état et son pire état :

- R_M (meilleur) et R_C (meilleur) représentent la meilleure condition pour la structure, lorsque toutes les notes b_i et m_i sont égales à 4 ;
- R_M (pire) et R_C (pire) représentent le pire état de la structure, lorsque toutes les notes c_i et m_i sont égales à 1.

Les équations intermédiaires R_M et R_C définissent l'évaluation du matériau et du comportement structural du pont définies comme suit :

$$R_M = \sum_{i \in W} A^{m_i} \sum_{j \in W \setminus i} x_{ij} \quad \text{et} \quad R_C = \sum_{i \in W} A^{c_i} \sum_{j \in W \setminus i} x_{ij} \quad (5)$$

W représente le nombre de liens d'affectation globale, A est un facteur représentant l'évolution de la dégradation en fonction des coûts de réparation. Dans cet article, on suppose que les coûts de réparation augmentent d'un facteur 5. Cette hypothèse est basée sur l'évolution des coûts de réparation suggérée par Sitter (1984).

5. Évaluation locale du pont

Dans un système de gestion, l'évaluation locale requiert une évaluation par élément. Le gestionnaire peut ainsi cibler quel(s) élément(s) doit(vent) être réparé(s). La Figure 9 présente les cotes matériaux et comportement des éléments à l'échelle locale comparé à une auscultation visuelle. On constate que la méthode traditionnelle d'inspection visuelle note les éléments du pont entre 3 et 4. Cela indique que les éléments locaux sont dans un état satisfaisant. Seuls les trottoirs T(N) du pont pour les deux travées sont dans un état de dégradation avancé (avec une note de 2).

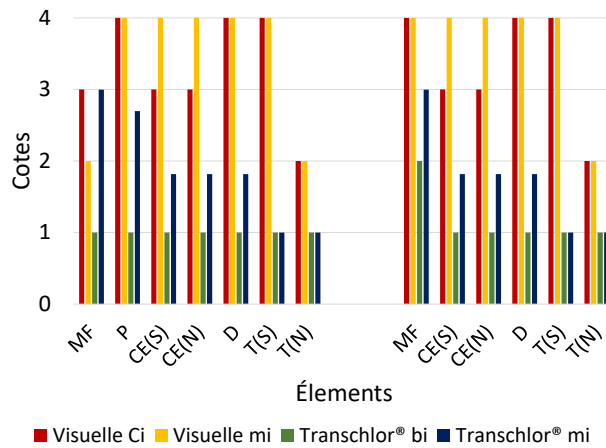


Figure 9. Cote matériaux et comportement des éléments. MF : Mur frontal, P : Pile, CE(S) : Côté extérieur (Sud), CE(N) : Côté extérieur (Nord), D : Dalle, T(S) : Trottoir (Sud), T(N) : Trottoir (Nord).

Cependant, contrairement à l'inspection visuelle, les résultats de l'évaluation du modèle de détérioration (TransChlor®) suggèrent des réparations sur tous les éléments évalués. En effet,

l'apparence de la surface ne présentent aucun signe de dégradation ou de dégradation légère par inspection visuelle. Cette méthode aura donc tendance à surévaluer la bonne condition de l'ouvrage. Une investigation plus approfondie serait donc nécessaire afin de corriger les problèmes internes non visible du matériau.

Pour décider un calendrier d'intervention, la plupart des gestionnaires d'infrastructures souhaite utiliser une évaluation globale des structures. L'état du pont évalué par inspection visuelle est en termes de matériau $I_M = 78,76\%$ et de comportement structural $I_C = 79,9\%$ (Figure 10). L'inspection visuelle indique donc que la structure est dans un état relativement satisfaisant et son état est proche d'une transition dans la zone (B). En revanche, le modèle de détérioration (TransChlor[®]) évalue les cotes matériau $I_M = 44,45\%$ et comportement $I_B = 43,55\%$ plus basses car il y a un développement de la corrosion non visible à l'œil nu.

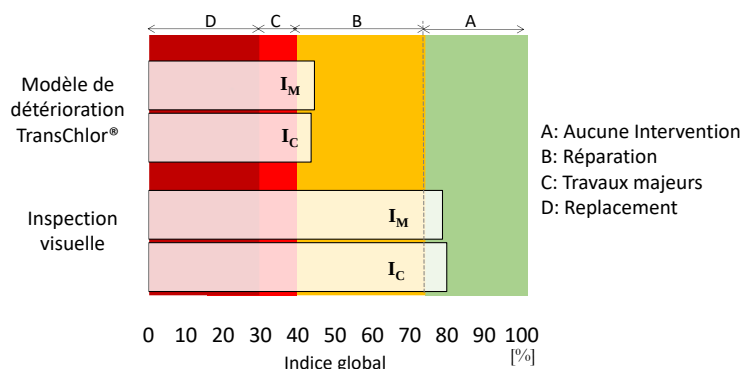


Figure 10. Comportement et état de matériau du pont par inspection visuelle et modèle de détérioration TransChlor[®].

Ainsi, le modèle de détérioration montre que le pont est en train de dépasser le seuil limite admissible de l'état de service caractérisé par la phase C. Cependant, cette dégradation n'a pas été observée par inspection visuelle. Cela peut expliquer pourquoi certains effondrements de ponts ont été observés récemment alors qu'une campagne d'inspection visuelle avait été menée (Bazzucchi, et al., 2018). Les preuves non observables de dommages et/ou de détérioration associées à l'inspection visuelle n'ont pas permis une interprétation complète de l'état de dégradation de ces structures construites, il y a plus de 50 ans.

6. Conclusions

Les résultats sur un pont québécois en béton montrent que l'introduction d'un modèle de détérioration par corrosion dans l'évaluation de l'état d'un pont permet d'affiner sa cote et de détecter l'apparition de dégradation invisible à l'œil nu. Ce raffinement, en complément à l'auscultation visuelle, permet de développer une stratégie intéressante pour l'auscultation des structures. Si les défauts détectés sont graves (mauvais état), le gestionnaire peut directement planifier une maintenance majeure après un examen visuelle. Dans le cas contraire, si seuls des défauts mineurs sont détectés (bon état) et ne nécessitent pas d'intervention de maintenance, l'état de la structure peut alors être vérifié à l'aide du modèle de détérioration.

En première approche, le modèle de détérioration peut être exécuté sans carottage (pour ne pas endommager la structure) afin d'obtenir seulement une approximation de l'état de la structure. Si l'évaluation du modèle de prédiction est également bonne, la structure ne nécessite pas

d'intervention. Dans le cas contraire, le modèle de prédiction peut être validé avec des extractions de carottes. Le gestionnaire peut planifier une intervention mineure dans le cas où les résultats indiquent une détérioration. Cette approche peut être utilisée pour éviter une intervention majeure sur la structure et peut être rentable sur les finances publiques. Le modèle gagne en précision si la structure est caractérisée par des essais non-destructif, si les conditions climatiques sont données par une station météorologique, ou encore si la politique d'épandage de sel sur la structure est connue.

La cotation au niveau de la structure présente l'état limite de service vs le niveau de sécurité structurale. Ces deux cotes permettent de comparer les structures d'un réseau afin d'établir un calendrier à court et moyen terme des interventions sur la structure.

Actuellement nos recherches s'orientent sur l'influence des coûts d'intervention qui permettront de donner une meilleure optimisation de l'utilisation des modèles de détérioration dans les évaluations de l'état des ponts routiers et structures en béton. Un troisième niveau de cotation est également à l'étude afin de prendre en considération la fiabilité du réseau. Ainsi, à terme, il sera possible d'évaluer l'état du réseau à plusieurs échelles :

- Élément de la structure ;
- Structure globale ;
- Une partie du réseau ;
- Réseau entier.

Ceci permettra de donner une indication de la pérennité du réseau, des structures selon les interventions planifiées et de réaliser ainsi des optimisations sur ces réalisations.

Remerciements

Les auteurs remercient la Banque islamique de développement et le Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies pour leur soutien financier. Les auteurs souhaitent également remercier le Service des infrastructures, de la voirie et des transports de la ville de Montréal et le Ministère des Transports du Québec pour leur précieuse collaboration.

Références

- Brown, E. C., and Kuntze, R. A. (1972). A study of stripping in asphalt pavements, Ontario, Departement of Transportation and Communications, rapport no RR177, 38 p.
- Conciatori, D. (2006). Effet du microclimat sur l'initiation de la corrosion des aciers d'armature dans les ouvrages en béton armé [Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne]. <http://infoscience.epfl.ch/record/56049>
- Conciatori, D., Brühwiler, E., and Gysler, R. (2010). Brine absorption in concrete at low temperature : Experimental investigation and modeling. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(6), 846-851. <https://doi.org/10/fwgg7p>
- Conciatori, D., Sadouki, H., and Brühwiler, E. (2008). Capillary suction and diffusion model for chloride ingress into concrete. *Cement and Concrete Research*, 38(12), 1401-1408. <https://doi.org/10/b3gvv4>
- Curtis, C. W., Lytton, R. L., and Brannan, C. J. (1992). Influence of aggregate chemistry on the adsorption and desorption of asphalt *Transportation Research Record*, no 1362. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1362/1362-001.pdf>

- Denarié, Emmanuel, Maître Michael, Conciatori, David, and Brühwiler, Eugen. (2005). Air permeability measurements for the assessment of the in situ permeability of cover concrete, Rehabilitation and Retrofitting. International Conference on Concrete Repair, 6 p.
- Glanville, W. H. (1962). Bituminous materials in road construction, London, Her Majesty's Stationery Office, 611 p.
- Gode, K., and Paeglitis, A. (2014). Concrete Bridge Deterioration Caused by De-Icing Salts in High Traffic Volume Road Environment in Latvia. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 9(3), 200-207. <https://doi.org/10/ghhpg5>
- Gowers, K. R., and Millard, S. G. (1999). Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique. ACI Materials Journal, 96(5). <https://doi.org/10/ggr6zp>
- Hobeda, P. (2000). Testing the durability of asphalt mixes for severe winter conditions, Swedish National Road and Transport Research Institute SE-581 95 Linköping. Proceedings of Euroasphalt & Eurobitume Congress Barcelona.
- Keserle, G. C., Sanchez, T., Conciatori, D., & Chouinard, L. (2021). Monitoring Environmental and Climatic Exposure Conditions for Structures in Cold Regions. Journal of Cold Regions Engineering, 35(2), 04021007. <https://doi.org/10/gh37hg>
- MTQ. (2017). Manuel d'inspection des structures. [www3.publicationsduquebec.gouv.qc.ca > guides > guide24.fr.html](http://www3.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/guides/guide24.fr.html)
- R. Wolofsky. (2011). Corrosion Initiation of Concrete Bridge Elements Exposed to De-icing Salts—ProQuest. <https://search.proquest.com/openview/ff8f1f90d05c3a32392269308c72b12b/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- SC. (2018). Statistique Canada, Enquête sur les infrastructures publiques essentielles du Canada : Actifs routiers, et actifs routiers sous forme de ponts et de tunnels, 2016. 11, 8.
- Torrent. (1997). Proceq, TORRENT Permeability Tester—Mode d'emploi, Proceq SA, Zürich.