

# Inhibition de la corrosion causée par les chlorures dans les ponts en béton armé

Par Daniel Cusson et Shiyuan Qian

**Les sels de déglacage ont un impact significatif sur la durée de vie des infrastructures routières en béton armé. Ce numéro propose des recommandations sur le contrôle de la corrosion des armatures. Ces recommandations sont le fruit d'une étude décennale qui visait à évaluer l'efficacité de huit systèmes inhibiteurs de corrosion commerciaux sur un pont autoroutier.**

Les sels de déglacage que l'on utilise en hiver sous les climats froids pour assurer la sécurité du réseau routier sont également responsables de la corrosion prématurée des armatures métalliques des infrastructures routières en béton armé. En règle générale, les ions chlorure des sels de déglacage se mélangent à l'eau pour pénétrer dans le béton à travers les pores et les fissures, s'accumuler près des armatures et initier leur corrosion. La corrosion qui se développe au voisinage de l'armature métallique exerce alors une pression supplémentaire sur le béton, jusqu'à provoquer de nouvelles fissures qui affaibliront davantage l'infrastructure et réduiront ainsi sa longévité. En Amérique du Nord, la conséquence pratique de la corrosion des armatures des infrastructures routières se traduit tous les ans par des milliards de dollars<sup>1</sup> qui sont ainsi dépensés à réparer ponts, garages de stationnement et autres ouvrages exposés aux sels de déglacage.

De nombreuses technologies permettent aujourd'hui de contrôler ou de retarder la corrosion des infrastructures routières. C'est le cas des systèmes dits « inhibiteurs de corrosion », qui se basent sur des revêtements d'armature, des adjuvants organiques ou inorganiques ou des revêtements de surface du béton. Or, bien qu'ils soient utilisés depuis plus de 20 ans, ces inhibiteurs de corrosion ont rarement fait l'objet d'une évaluation *in situ* systématique, ni d'une étude suffisamment documentée qui permettrait aux concepteurs d'ouvrages de préconiser les produits appropriés avec assurance.



Figure 1. Le Pont Vachon, Laval (Québec), pendant sa réhabilitation, en 1996.

Les chercheurs de l'Institut de recherche en construction du Conseil national de recherches du Canada (IRC-CNRC) ont ainsi étudié pendant 10 ans l'efficacité de huit systèmes inhibiteurs de corrosion commerciaux sur le Pont Vachon, à Laval, au Québec (figure 1). L'étude a démarré en 1996, lorsque Transports Québec envisagea une réhabilitation majeure du pont et la reconstruction de ses parapets. Long de 714 m, le Pont Vachon est composé de 6 voies de 21 travées de poutres en béton précontraint qui soutiennent une dalle en béton armé.

Profitant du projet de réhabilitation, l'IRC-CNRC et Transports Québec décidaient d'effectuer une étude exhaustive sur les systèmes inhibiteurs de corrosion des structures en béton armé. Les chercheurs choisirent les parapets du pont comme centre d'étude, en raison notamment de leur

**Table 1.** Description des systèmes inhibiteurs de corrosion installés dans les travées d'essai

Section d'essai	Description†	Mécanisme d'inhibition de la corrosion
A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revêtement d'armature (mélange à base d'eau, de ciment Portland et de sable siliceux fin)</li> <li>• Revêtement pour béton (mélange liquide à base de polymère, de ciment Portland et de granulats)</li> </ul>	Agit comme une barrière physique pour réduire la migration des ions chlorure vers les armatures métalliques.
B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adjuvant organique pour béton (alcanolamines)</li> <li>• Revêtement appliqué à l'armature d'ancrage de la dalle (mélange d'époxyde et de ciment Portland)</li> </ul>	Bloque les réactions électrochimiques en déposant une couche protectrice physique sur les armatures métalliques.
C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adjuvant organique/inorganique pour béton (dérivés d'amine et nitrite de sodium)</li> </ul>	Stabilise la couche passive d'oxyde <sup>++</sup> sur les armatures métalliques. Réduit la mobilité des ions chlorure en augmentant la densité du béton.
D	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revêtement d'armature (mélange d'époxyde et de composants cimentaires)</li> </ul>	Agit comme une barrière physique pour réduire la migration des ions chlorure vers les armatures métalliques.
E	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adjuvant organique pour béton (amines et esters)</li> </ul>	Favorise la formation d'une barrière physique contre les ions chlorure sur les armatures métalliques et réduit la perméabilité du béton.
F	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adjuvant organique pour béton (amines et leurs sels, plus acides organiques/inorganiques)</li> </ul>	Migre dans le béton et adsorbe à la surface des armatures métalliques pour former une pellicule qui bloque les réactions électrochimiques.
G	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adjuvant organique pour béton (alcanolamines, éthanolamines et phosphate)</li> <li>• Revêtement appliqué à l'armature d'ancrage de la dalle (mélange d'époxyde et de ciment Portland)</li> <li>• Scellant pour béton (silane hydrofuge pénétrant)</li> </ul>	Bloque les réactions électrochimiques en déposant une couche protectrice physique sur les armatures métalliques.
H	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adjuvant inorganique pour béton (nitrite de calcium)</li> </ul>	Augmente la couche passive d'oxyde <sup>++</sup> sur les armatures métalliques et réagit avec les produits de corrosion anodique qui concurrencent avec les ions chlorure.
Contrôle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Armature en acier ordinaire</li> <li>• Aucun inhibiteur de corrosion</li> </ul>	Sans objet
Epoxyde	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Armature revêtue d'époxyde</li> <li>• Aucun inhibiteur de corrosion</li> </ul>	Sans objet

† Tel que demandé, le nom commercial a été volontairement omis pour respecter l'anonymat des fabricants.  
†† La couche passive est le produit d'oxydation qui se forme initialement sur les armatures métalliques non-revêtues sous l'effet de l'humidité et de l'oxygène. Une fois formée, cette couche peut, à la faveur de l'alcalinité élevée de l'environnement interne du béton, empêcher le métal de se corroder davantage.

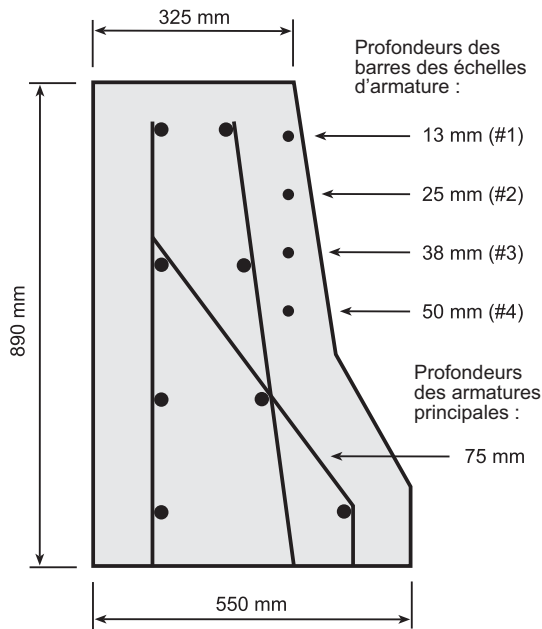
forte exposition aux sels de déglçage et de leur facilité d'accès à la mesure et à l'évaluation de l'ampleur de la corrosion qui se développerait pendant les dix ans de l'étude. Ils décidèrent de considérer l'étude comme représentative de toute structure en béton armé exposée à des sels de déglçage et à des conditions climatiques rigoureuses, au vu des différences de température, -25 °C (-15 °F) à 35 °C (95 °F), des cycles de gel/dégel et des cycles répétés de mouillage/séchage du béton auxquels le pont était soumis.

Les chercheurs choisirent pour l'étude dix travées contiguës de 34 m sur le parapet situé côté Est. Pour l'étude, huit travées d'essai ont été construites avec le même mélange de béton et la même armature en

acier ordinaire (barres 15M). Le mélange de béton présentait un rapport eau/ciment de 0,36 et une teneur en ciment de 450 kg/m<sup>3</sup> (760 lb/yd<sup>3</sup>) (CSA, Type GU, semblable à ASTM, Type I), avec une résistance à la compression à 28 jours qui dépassait les 35 MPa requis. Dans chacune de ces huit travées d'essai, les chercheurs firent installer un système inhibiteur de corrosion différent par leur fabricant respectif (A à H, tableau 1).

Les deux dernières travées d'essai ont été construites sans système inhibiteur de corrosion : une travée à armature d'acier ordinaire (Contrôle, tableau 1) et une travée à armature revêtue d'époxyde (Epoxyde, tableau 1).

Pour détecter rapidement la corrosion, les chercheurs ont fait placer, dans chacune des



**Figure 2.** Dimensions et détails de l'armature du parapet d'essai, montrant l'armature principale, les barres transversales espacées de 230 mm et, sur la droite, une échelle de barres d'armature.

### Collecte de données

L'évaluation annuelle de la corrosion dans les travées du pont comprenait :

- Un relevé de potentiel électrochimique (un indicateur du *risque de corrosion*), verticalement, à 110 mm, 345 mm et 550 mm du sommet du parapet et, horizontalement, le long des 15 m de la partie centrale des travées, à des intervalles de 300 mm.
- Une mesure de la densité du courant de corrosion par la méthode de polarisation linéaire (un indicateur du *taux de corrosion*), sur des barres verticales et horizontales choisies, à des endroits fissurés ou non fissurés, pour chacune des travées d'essai.
- Un carottage d'échantillons de béton, pour mesurer la concentration en chlorures, la perméabilité et la résistance du béton dans chacune des travées d'essai.

travées d'essai (figure 2), des échelles de barres d'armature 10M sous des enrobages de béton qui varient de 13 mm à 50 mm. Par contre, l'armature principale du parapet comporte un recouvrement de béton de 75 mm d'épaisseur.

Des fissures verticales distantes d'environ 800 mm sont apparues sur les parapets quelques jours après la mise en œuvre du béton. Pour les chercheurs, qui décidèrent nonobstant de poursuivre l'étude et de surveiller son impact sur la corrosion, cette fissuration précoce était principalement due aux effets thermiques non contrôlés et au retrait endogène empêché du béton, deux caractéristiques typiques du béton à forte teneur en ciment et à faible rapport eau/ciment.



**Figure 3.** Travée typique du parapet après reconstruction.

### Résultats

#### Pénétration des chlorures dans le béton

En général, la teneur en chlorures des parapets a augmenté avec le temps et diminué avec l'épaisseur de l'enrobage, tel que prévu. En 2001 (an 5), dans toutes les travées d'essai, la teneur totale en chlorures était, à une profondeur de 13 mm à 25 mm, largement supérieure à la valeur critique généralement admise<sup>2</sup> (1,4 kg/m<sup>3</sup>), valeur au-delà de laquelle les chlorures peuvent initier la corrosion des armatures métalliques. (Note : La valeur-seuil de la teneur critique en chlorures varie en fonction de plusieurs paramètres : le type d'armature, la formulation du béton, la carbonatation et les conditions environnementales. Les bétons contenant des inhibiteurs de corrosion peuvent probablement tolérer des valeurs critiques plus élevées avant le début de la corrosion.)

En 2006 (an 10), dans toutes les travées d'essai, la teneur en chlorures était, à une profondeur de 50 mm à 75 mm, légèrement inférieure à la valeur-seuil critique, ce qui laisse penser que la corrosion de l'armature principale était sur le point de se développer dans les parties non fissurées du parapet.

Le système inhibiteur de corrosion de la section G, cependant, s'est montré très efficace. En 1997, les chlorures n'avaient pas pénétré dans le béton, grâce au scellant hydrofuge appliqué à la surface du parapet qui faisait partie du système. Au cours des années suivantes, les chlorures finirent par pénétrer dans le béton, mais moins rapidement que dans les autres travées.

#### Corrosion des échelles de barres d'armature

La surface du parapet de chacune des travées d'essai fut inspectée en juin 2006, pour évaluer la sévérité des dommages causés par la corrosion au voisinage de la barre n° 1 de chacune des échelles d'armature (enrobage de béton de 13 mm, figure 2). La corrosion y était évidente dans toutes les travées. Les travées D et H démontrèrent le moins de dommages, comme elles ne présentaient que des fissures horizontales mineures au-dessus

des barres d'armature n° 1. Par contre, dans les travées A, C, E et F, des fissures horizontales, de légères délaminations et des zones effritées pouvaient être observées au-dessus des barres plus faiblement enrobées.

Les carottes de béton qui échantillonnent la barre n° 2 (enrobage de béton de 25 mm) furent prélevées dans chacune des échelles d'armature en juin 2006. Bien que la présence d'ions chlorure sur cette barre eût pu indiquer en 2001 l'imminence d'une initiation de la corrosion dans certaines travées d'essai, l'aspect de la surface de ces barres d'armature n'avait que très légèrement évolué en 2006.

### **Corrosion de l'armature principale**

Au début de l'étude, en 1997 et en 1998, l'armature principale (enrobage de béton de 75 mm) des travées d'essai construites avec des barres non revêtues a démontré des taux de corrosion relativement élevés, conséquence de la formation normale d'une pellicule protectrice d'oxyde à la surface du métal (voir la deuxième note de bas de page du tableau 1). Par la suite, ces taux ont diminué dans toutes les travées vers des valeurs inférieures à la valeur critique de  $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (indicateur du taux de corrosion), valeur en dessous de laquelle la corrosion n'est pas considérée comme active. En règle générale, les endroits fissurés présentaient des taux de corrosion plus élevés que les endroits non fissurés, notamment dans les neuf travées construites avec des barres non revêtues d'époxyde où les chercheurs ont constaté une augmentation moyenne de 35 % des taux de corrosion.

Dans l'armature principale (enrobage de béton de 75 mm), les chercheurs ont prélevé un autre ensemble de carottes en juin 2006, aux endroits où les mesures non destructives indiquaient des potentiels de corrosion plus négatifs (c.-à-d., risque possible d'une corrosion plus importante) et des taux de corrosion plus élevés. Nonobstant, l'armature principale n'a montré aucune corrosion active significative, y compris dans les travées de contrôle, conséquence possible de l'importante épaisseur de l'enrobage (75 mm) et de la très faible perméabilité du béton.

### **Conclusions**

L'étude a permis d'évaluer la performance décennale *in situ* de huit systèmes inhibiteurs de corrosion installés au parapet d'un pont autoroutier, avec les conclusions suivantes :

1. Des huit systèmes inhibiteurs de corrosion testés, le système H (adjuvant de nitrite de calcium) est celui qui s'est montré le plus souvent efficace, grâce à sa capacité à augmenter la couche passive d'oxyde qui sert à protéger l'armature du béton contre la corrosion active.

2. Le système G (scellant pour béton) s'est montré très efficace pendant la première année de sa pose, grâce à sa capacité à bloquer la pénétration des chlorures dans le parapet. Durant les années suivantes, les chlorures ont fini par pénétrer l'enrobage de béton, mais plus lentement que dans les travées qui n'en étaient pas munies.
3. Les taux de corrosion relevés sur l'armature principale au-dessus des fissures verticales (qui se sont formées peu après la mise en œuvre du béton) étaient constamment plus élevés que les taux mesurés dans les endroits non fissurés, indépendamment du système inhibiteur de corrosion utilisé (y compris le revêtement d'armature à base d'époxyde). Ce résultat montre l'importance du contrôle des fissures et de la réduction de l'ouverture des fissures du béton.
4. L'enrobage suffisamment épais d'un béton à faible perméabilité permet de protéger efficacement ses armatures contre les attaques des sels de déglacage.

La première ligne de défense contre la corrosion des armatures des structures en béton exposées aux sels de déglacage repose sur la qualité et l'épaisseur de l'enrobage de béton, tel que prescrit dans les codes de conception des structures. Les systèmes inhibiteurs de corrosion utilisés dans notre étude pourraient être considérés comme une seconde ligne de défense. Elle deviendra particulièrement importante lorsque le béton se sera fissuré et que la première ligne de défense se sera affaiblie.

Les résultats détaillés de l'étude peuvent être consultés dans les rapports de recherche publiés à l'adresse suivante : <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/projets/irc/anti-corrosion.html>

### **Références**

1. Virmani, Y.P., et Clemena, G.G., Corrosion protection – Concrete Bridges, Rapport No. FHWA-RD-98-088, Federal Highway Administration, Sept. 1998, 72 p.
2. CEB, *Design Guide for Durable Concrete Structures*, 2<sup>e</sup> édition, Thomas Telford Publishers, 1992.

---

*Daniel Cusson, Ph. D., et Shiyuan Qian, Ph. D., sont agents de recherche seniors au sein du programme Infrastructures urbaines de l'Institut de recherche en construction du Conseil national de recherches du Canada.*

© 2010  
Conseil national de recherches du Canada  
Juin 2010  
ISSN 1206-1239

« Solutions constructives » est une collection d'articles techniques renfermant de l'information pratique issue de récents travaux de recherche en construction.

Canada

Pour obtenir de plus amples renseignements, communiquer avec l'Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa K1A 0R6.  
Téléphone : (613) 993-2607 Télécopieur : (613) 952-7673 Internet : <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/irc>