

# **Évaluation de l'efficacité de traitements pour la prévention ou la mitigation de la corrosion de l'acier d'armature dans les éléments en béton armé**

N. Rouleau, B. Bissonnette, J. Marchand

Centre de recherche sur les infrastructures en béton, Université Laval, Québec, Canada G1K 7P4

**RÉSUMÉ** : Cette étude visait à évaluer l'efficacité de différentes techniques de protection à prolonger la durée de vie des infrastructures en béton susceptibles d'être atteintes de corrosion des armatures. L'objectif principal du projet était de fournir des informations quantitatives sur l'influence de certaines des stratégies les plus couramment utilisées pour protéger les ouvrages contre la pénétration de l'humidité et des ions chlorure, ainsi que pour contrôler l'initiation et la propagation de la réaction de corrosion. Ainsi, l'impact de l'utilisation de scellants non coupe-vapeur, de membranes et de produits inhibiteurs de corrosion (migrateur et adjuvant) a été étudié. Les différents traitements ont été testés sur des corps d'épreuve pré-conditionnés, de manière à présenter quatre niveaux de contamination et de détérioration: état vierge non corrodé, état contaminé par les ions chlorure mais non corrodé, état de corrosion initiée et état de propagation de la corrosion. Un des objectifs spécifiques de cette étude était d'évaluer l'influence des différents traitements sur l'évolution de facteurs comme la distribution interne de l'humidité relative, la distribution des ions chlorure, ainsi que l'activité de corrosion. Pour ce faire, 51 dalles de béton armé ont été fabriquées et exposées à des cycles de mouillage (brouillard salin) et de séchage dans une chambre environnementale. Afin de caractériser l'évolution de l'activité de corrosion propre à chaque condition, un suivi électrochimique des éléments comportant des mesures de potentiel électrochimique et de résistance à la polarisation linéaire a été assuré. À la suite de la période de cyclage dans la chambre de brouillard salin, une autopsie a été pratiquée sur une sélection de corps d'épreuve. Cette opération avait pour but de dégager les barres d'armature, de manière à caractériser les zones anodiques.

## **1. INTRODUCTION**

Les barres d'armature en acier enrobées dans le béton de ciment bénéficient d'une protection naturelle contre la corrosion. Ce phénomène est dû à la forte alcalinité de la solution interstitielle contenue dans les pores de la matrice cimentaire, résultant en la formation d'un mince film d'oxyde à l'interface acier-béton. Ce film assure un état passif de l'acier vis-à-vis la corrosion (Rosenberg et coll., 1989, Bentur et coll., 1997).

Cependant, dans les régions nordiques et les régions côtières, la pénétration dans le béton des ions chlorure (provenant des sels fondants utilisés lors des opérations de déneigement ou de l'eau de mer) vient déstabiliser ce film passif favorisant ainsi la formation de piles de corrosion. Dans ces piles, l'anode et la cathode sont situées dans des zones distinctes d'une même barre d'armature. Les électrons voyagent par l'entremise de l'acier, tandis que les ions qui participent à la réaction de corrosion sont véhiculés par la solution interstitielle du béton. À l'anode, la dissolution du fer libère deux électrons et à la cathode, une réaction avec l'oxygène consomme ces électrons. La cinétique de corrosion est contrôlée par l'une ou l'autre de ces réactions.

Dans les pays industrialisés, la corrosion force chaque année la réfection ou le remplacement de nombreuses infrastructures en béton armé, générant ainsi des frais pouvant atteindre des milliards

de dollars (Broomfield, 1997; FHWA 2013). Étant donné l'importance de la question, plusieurs efforts ont été déployés pour développer des solutions innovantes permettant de prolonger la durée de vie des ouvrages pour diminuer les coûts d'intervention. Parmi les approches étudiées, certaines visent à augmenter le délai requis pour initier la corrosion des aciers d'armature, soit en ralentissant la pénétration des ions chlore dans l'enrobage en béton, soit en augmentant la concentration en ions chlorure requise pour initier la réaction de corrosion. Pour ce faire, on peut contrer la pénétration des ions en utilisant un béton dense et de bonne qualité. On peut également choisir d'appliquer, sur les surfaces exposées, une membrane ou un produit scellant non coupe-vapeur. Une autre approche consiste à inhiber la dissolution du fer en modifiant les conditions électrochimiques à la surface des barres d'armature. L'ajout de l'inhibiteur de corrosion se fait typiquement en incorporant un adjuvant lors de la production du béton. En général, les approches visant à retarder l'initiation de la corrosion sont plutôt adaptées à la construction d'ouvrages neufs.

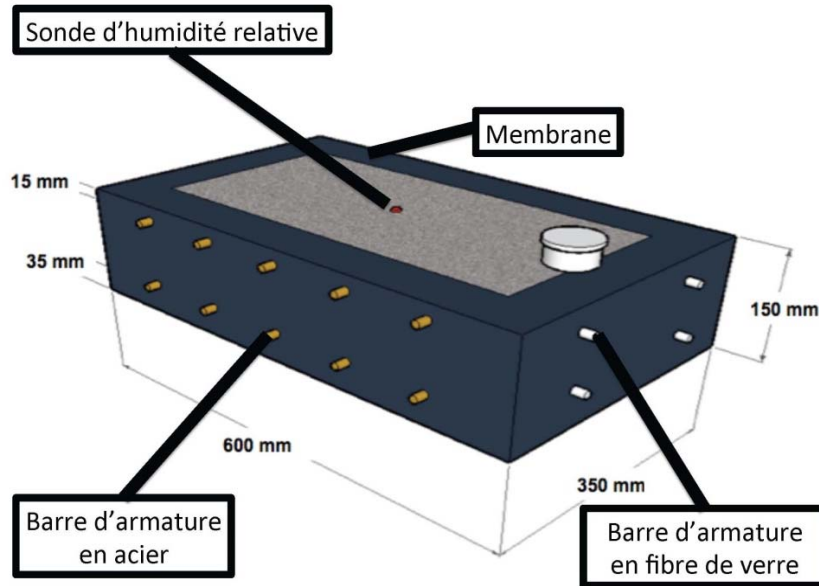
Certaines recherches ont plutôt mené à l'élaboration de techniques visant à traiter les ouvrages en service ayant déjà été contaminés par les ions chlore. Une fois le processus initié, l'intensité de la corrosion peut être contrôlée en limitant la quantité d'eau et d'oxygène disponible pour la réaction. L'humidité relative à l'intérieur du béton peut être contrôlée par l'application de scellants non coupe-vapeur à la surface du béton (celui-ci rend le béton imperméable à l'eau tout en laissant le matériau séché graduellement). L'application d'une membrane imperméable permet aussi de limiter les échanges liquides et gazeux entre le béton et l'environnement. Certaines techniques consistent plutôt à appliquer un inhibiteur à la surface de l'ouvrage en espérant que celui-ci pénétrera jusqu'aux barres d'armature.

Si les approches visant à optimiser la vie utile des constructions neuves ont fait, pour la plupart, l'objet de nombreuses évaluations indépendantes, il existe malheureusement bien peu de données quantitatives sur les performances des solutions proposées pour prolonger la durée de vie des ouvrages existants. De plus, l'efficacité des méthodes de protection de surface est également peu documentée. Les principaux aspects d'un projet visant à combler ce vide sont présentés dans les paragraphes suivants. Cette étude, menée dans des conditions de laboratoire bien contrôlées, avait pour objectif de déterminer quelle est la meilleure stratégie à appliquer, afin d'obtenir un rendement optimal des différents traitements face à la corrosion, en fonction de l'état de contamination en ions chlorure de la matrice cimentaire et de l'état de corrosion des barres d'armature.

## **2. Protocole expérimental**

### **2.1 Éprouvettes**

Ce projet était divisé en deux phases distinctes. Dans le cadre de la Phase 1, 36 éprouvettes ont été fabriquées. Par la suite, un deuxième groupe de 15 dalles d'essai a été réalisé (Phase 2). Les corps d'épreuve conçus pour l'étude sont de petites dalles de 150 mm de hauteur par 350 mm de largeur et 600 mm de longueur (voir Figure 1). Toutes les éprouvettes ont été recouvertes d'une membrane de polyuréthane sur les faces latérales, ne permettant ainsi qu'une pénétration unidirectionnelle des ions chlorure dans le béton à partir de la surface supérieure du corps d'épreuve.



**Figure 1: Géométrie des corps d'épreuve**

À l'intérieur des dalles, deux rangs d'armature comportant chacun 5 barres de 10 mm de diamètre ont été placés avec un recouvrement de béton de 15 mm sur la face supérieure et de 35 mm sur la face inférieure. Un recouvrement de faible épaisseur en surface a été choisi de façon à minimiser le délai requis pour initier la réaction de corrosion sans pour autant avoir recours à des méthodes accélérées. Les deux rangs d'armature étaient supportés dans le coffrage par deux barres en fibre de verre, afin d'en contrôler précisément la position tout en évitant d'introduire des éléments corrodables additionnels dans les corps d'épreuve.

La technique utilisée pour la fabrication des dalles d'essais de la Phase 1 est légèrement différente de celle employée pour la confection des éprouvettes de la Phase 2. Le béton ayant servi à la production des éprouvettes de la Phase 1 a été produit en usine et transporté au laboratoire dans une bétonnière. Ce mélange ne contenait initialement aucun adjuvant inhibiteur de corrosion et a servi à la confection d'une première série de 33 éprouvettes. Par la suite, un agent inhibiteur de corrosion de type nitrite de calcium a été ajouté au mélange et malaxé pendant quelques minutes. Le béton ainsi modifié a servi à la fabrication des trois dernières éprouvettes de la Phase 1.

Tel que mentionné antérieurement, 15 éprouvettes de béton ont été fabriquées dans le cadre de la Phase 2 du programme. Le béton de la Phase 2 provient de la même usine et possède des caractéristiques similaires au mélange utilisé pour la confection des dalles de la Phase 1. Le mélange de béton choisi dans les deux phases reproduit les caractéristiques des ouvrages en béton ayant été construits il y a plus de vingt ans et qui souffrent à l'heure actuelle d'endommagement par corrosion des armatures. Pour ce faire, les mélanges de béton testés dans le cadre de cette étude ont tous été produits à un rapport eau/ciment minimum de 0,60. Les caractéristiques des mélanges de béton testés dans le cadre de cette étude sont données au Tableau 1. Compte tenu du recouvrement choisi, le diamètre maximal des granulats a été limité à 10 mm.

**Tableau 1: Mélanges de béton utilisés pour les Phases 1 et 2**

Constituants et proportions du mélange de béton		
Eau	175	kg/m <sup>3</sup>
Ciment GU (Type 10)	290	kg/m <sup>3</sup>
Sable 0-5 mm (Ladufo)	930	kg/m <sup>3</sup>
Pierre 5-10 mm (Val-Bélaïr)	878	kg/m <sup>3</sup>
Agent entraîneur d'air	25	ml/100 kg ciment
Superplastifiant (Polycarboxylate)	400	ml/100 kg ciment

Suite à la fabrication et à la période de mûrissement initiale (24 h), les dalles ont été placées dans une chambre humide à 100 % H.R. jusqu'à l'âge de 28 jours. Par la suite, les dalles ont été entreposées dans un environnement à une température de 23° C et à 50 % H.R. pour une période de 28 jours. À la fin de la période de mûrissement des éprouvettes de la Phase 1, des fissures sont apparues en surface de toutes les dalles, à l'exception de celles fabriquées avec le béton produit avec le nitrite de calcium. La présence de ces fissures est expliquée par la faible épaisseur du recouvrement des armatures et par la technique utilisée lors de la mise en place du béton. Afin de bien quantifier l'impact de ces fissures, 15 autres éprouvettes ont été construites dans le cadre de la Phase 2.

Les propriétés physiques de mélanges de béton (à l'état frais et à l'état durci) sont données au Tableau 2. Les essais sur béton durci ont été effectués à la fin de la période de mûrissement de 28 jours.

**Tableau 2: Propriétés physiques des mélanges de béton testés**

Béton à l'état frais				
		Phase 1		Phase 2
		Ordinaire	Avec ADJ	Ordinaire
Affaissement	(mm)	110	50	75
Teneur en air	(%)	6,4	5,4	5,3
Température	(°C)	22	22	18
Béton à l'état durci				
Résistance à la compression <sup>(ASTM C 39)</sup>	(MPa)	20,2	22,4	21,8
7 JOURS		25,3	29,5	29,9
28 JOURS		28,3	33,4	35,3
91 JOURS				
Volume de vide <sup>(ASTM C 642)</sup>	(%)	15,2	15,3	n/a
Transport ionique <sup>(ASTM C 1202)</sup>	(C)	7930	7015	7362

## 2.2 Contamination aux ions chlorure

Afin de favoriser la pénétration des ions chlore, les corps d'épreuve ont été exposés à des cycles de mouillage/séchage dans une chambre environnementale pourvue d'un dispositif permettant d'émettre un brouillard salin. Dans le cadre de cette étude, la durée du cycle d'exposition a été fixée à une semaine et chaque cycle comportait une période de mouillage de 4 jours suivie d'une période de séchage de 3 jours. La solution pulvérisée dans la chambre est constituée d'eau et de chlorure de sodium à une concentration de 500 mmol/L (soit 3% en masse).

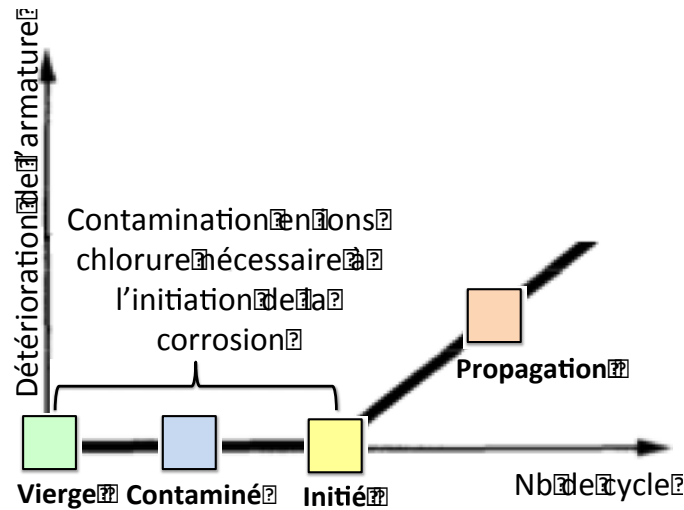
## 2.3 Stratégie de protection

Dans le but d'observer la performance de certaines des stratégies de protection des ouvrages les plus couramment utilisées, un programme d'essais a été élaboré. Les produits retenus sont :

- Scellant à base de silane contenant 40 % d'agent actif;
- Scellant à base de silane contenant 100% d'agent actif;
- Inhibiteur de corrosion en adjuvant (nitrite de calcium);
- Inhibiteur de corrosion migrateur (nitrite de calcium);
- Scellant à base de silane (100 % d'agent actif) comportant un inhibiteur de corrosion organique;
- Membrane d'imperméabilisation.

Par la suite, un protocole a été mis sur pied afin de définir la séquence d'application des produits, dans le respect des spécifications des fabricants. Cette séquence a été élaborée de manière à prendre en considération le niveau de contamination et l'état d'avancement de la dégradation par corrosion des éprouvettes. Pour ce faire, quatre états ont été définis (voir figure 2) :

- L'état **vierge**, correspondant à un ouvrage neuf *n'ayant pas été exposé aux ions chlorure*;
- L'état **contaminé** (non corrodé), correspond à un élément *exposé aux ions chlorure* et pour lequel *la réaction de corrosion n'a pas débuté*;
- L'état **initié**, correspondant à un élément *exposé aux ions chlorure* et pour lequel *la réaction de corrosion est initiée*, mais pour laquelle *aucun dommage n'a été observé*;
- L'état de **propagation**, correspondant à un ouvrage âgé, *contaminé par les chlorures* et pour lequel *la corrosion est active depuis un certain temps*.



**Figure 2: États de contamination et d'activité de corrosion définis pour l'application des traitements**

Les Figures 3 et 4 présentent la séquence d'application des produits, selon l'état de contamination en ions chlorure pour les éprouvettes de la Phase 1 et 2. Il faut préciser que chaque traitement a été appliqué sur trois corps d'épreuve pour un total de 45 dalles traitées. Pour chacune des deux phases, trois dalles n'ayant subi aucun traitement ont été conservées comme éprouvettes de référence.

Une caractéristique d'exposition aux ions chlorure différencie les Phase 1 et 2. Lors de la Phase 1, pour l'état initié et l'état de propagation, une période de 3 semaines d'arrêt a été appliquée. Ce temps d'arrêt correspondait à une période de séchage prolongé pour les corps d'épreuve. Dans le cadre de la Phase 2, aucun arrêt d'exposition aux ions chlorure n'a eu lieu. Dans les deux phases, chaque dalle était nettoyée avec un jet d'eau sous pression, puis séchée à l'air libre pendant une période d'une semaine avant l'application des traitements.

## 2.4 Essais de caractérisation et suivi

### 2.4.1 Pénétration des produits appliqués en surface

Dans le cadre de ce projet, deux types de traitement de surface sont étudiés. Il y a d'une part un inhibiteur de corrosion migrateur de type anodique (nitrite de calcium), dont le rôle est de prévenir ou du moins de freiner la dissolution du fer de l'armature. D'autre part, les scellants à base de silane empêchent la pénétration d'humidité en surface, tout en permettant l'évacuation de l'eau interne par évaporation. Ainsi, en diminuant la teneur en eau, le scellant augmente la résistivité électrique entre l'anode et la cathode, tandis que l'inhibiteur de corrosion choisi intervient plutôt sur l'anode de la pile.

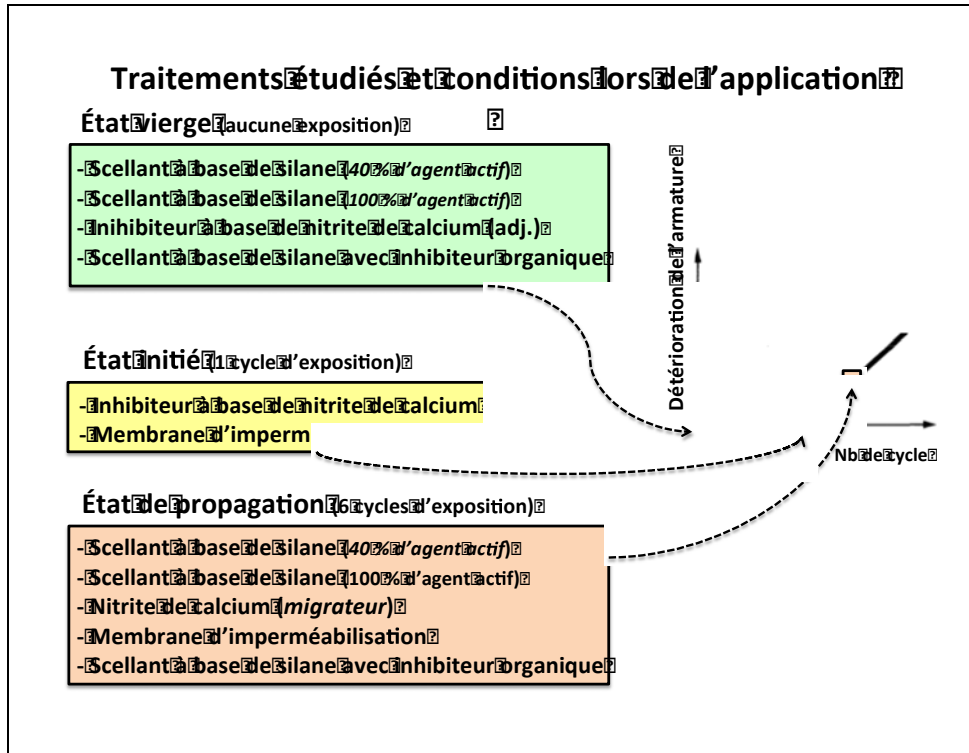


Figure 3: Séquence d'application des traitements de la Phase 1

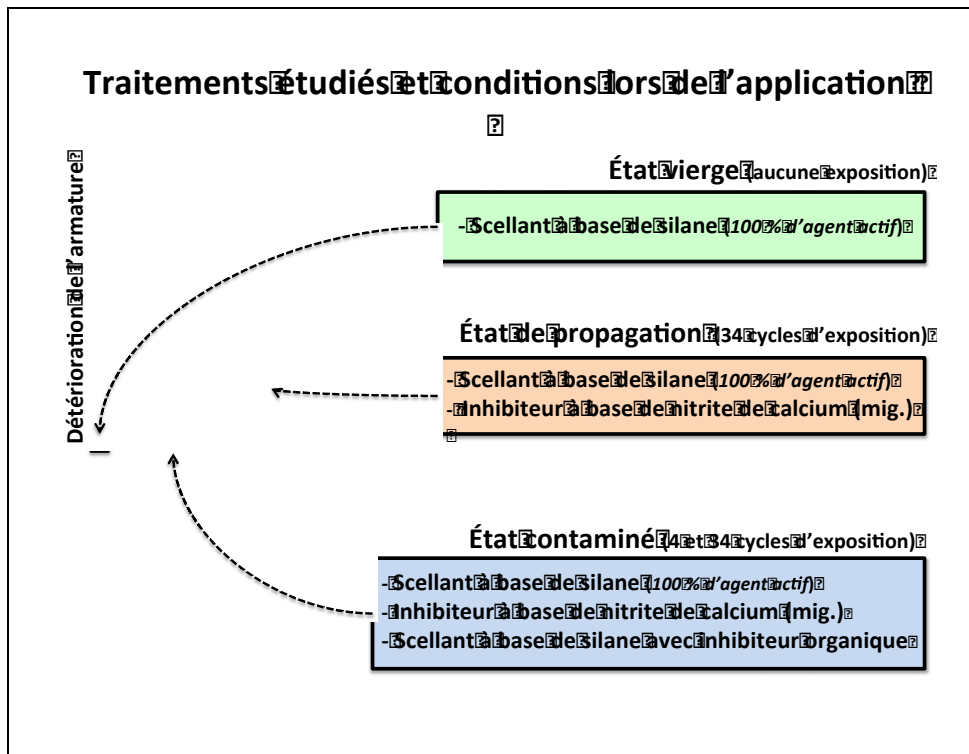


Figure 4: Séquence d'application des traitements de la Phase 2

Les deux types de traitement ont un élément en commun, ils doivent pénétrer dans la structure poreuse du béton d'enrobage. Pour remplir efficacement son rôle, l'inhibiteur doit migrer depuis la surface jusqu'aux barres d'armature. Des procédures ont donc été mises de l'avant afin d'évaluer la pénétration des deux produits.

Pour les scellants à base de silane, deux opérations sont effectuées. En premier lieu, le mouillage du béton permet d'observer visuellement un front hydrophobique délimitant la région traitée de celle qui est encore vierge. En effet, la molécule organique contenue dans le scellant permet de fixer des chaînes de carbone à la surface du béton, ce qui diminue sa tension de surface (McGuettigan, 1992). Étant donné que le scellant est composé d'une grande quantité de carbone, une microsonde capable de mesurer la teneur en carbone a été couplée à un microscope électronique à balayage dans le but d'évaluer la pénétration du scellant. En combinant les deux techniques, on obtient une mesure de la pénétration du scellant à base de silane.

Une autre technique est utilisée pour déterminer la profondeur de pénétration de l'inhibiteur de corrosion de type migrateur. Cette technique consiste à effectuer un profil de la teneur en nitrite dans la couche de béton d'enrobage. Pour ce faire, on doit d'abord prélever du béton sur toute l'épaisseur du recouvrement. Cette opération est effectuée à l'aide d'une foreuse munie d'une tête à diamant. De la poudre est prélevée tous les 2 mm jusqu'à une profondeur de 15 mm. Une fois la poudre recueillie, on prépare une solution que l'on filtre, afin d'éliminer toutes les particules solides. Finalement, une analyse chromatographique est pratiquée, ce qui permet de déterminer le profil de concentration en nitrite sur la profondeur étudiée (Page et coll., 2002).

#### 2.4.2 Humidité relative

Afin de mesurer l'humidité relative de façon rapide et efficace, une sonde a été installée au centre de la surface de toutes les dalles. La profondeur de la mesure coïncide avec la partie inférieure de l'armature, soit à 25 mm de la surface. Une mesure est effectuée toutes les semaines.

#### 2.4.3 Profil en ions chlorure

Une technique d'abrasions successives (tous les deux 2 mm) et de titration au nitrate d'argent est utilisée pour déterminer la teneur en ions chlorure dans la couche de recouvrement des dalles d'essais. On procède à la mise en solution des échantillons de poudre obtenus et à une analyse à l'aide d'un titrateur, lequel permet de déterminer la quantité de chlorure contenue dans la solution selon la méthode décrite par la norme ASTM C 1152 (Glass et coll., 2000). Cette mesure sera effectuée sur des spécimens témoins avant l'application des traitements et à la fin de la campagne expérimentale sur toutes les dalles.

#### 2.4.4 Corrosion

De manière à assurer un suivi régulier de l'activité de corrosion, deux techniques de mesure de corrosion sont mises en œuvre. Afin de détecter la présence de la corrosion, une mesure de différence de potentiel est pratiquée toutes les semaines. Cette mesure consiste à évaluer la différence de potentiel entre la barre d'armature considérée et une électrode de référence à l'aide d'un voltmètre. Lorsque la valeur mesurée est inférieure à -350 mV par rapport à une électrode de référence de sulfate de cuivre, la probabilité qu'il y ait corrosion active est de l'ordre de 90 % (ASTM C876).



Pour quantifier l'intensité de l'activité de corrosion des barres d'armature, une mesure de polarisation linéaire est effectuée une fois par mois. Le dispositif de mesure utilisé à cette fin comporte trois électrodes: une électrode de mesure, une électrode de référence et une contre-électrode. Dans le cas du béton armé, l'électrode de mesure est la barre d'armature; l'électrode de référence est une électrode de calomel et la contre-électrode est une barre d'armature placée sur un rang inférieur. Le principe de la polarisation est que la contre-électrode entraîne le courant vers l'électrode de mesure pour la polariser. Le potentiel de l'électrode de mesure est établi (dans le cas du tracé des courbes potentiodynamiques) par rapport à l'électrode de référence dont le potentiel est toujours fixe (Ghali, 2010). Des courbes typiques de polarisation linéaire décrivant l'évolution du potentiel de l'électrode de mesure en fonction du courant sont présentées sur la Figure 4.

### 3. RÉSULTAT ET CONCLUSION

Ce projet de maîtrise avait pour objectif général de fournir des informations quantitatives sur l'efficacité d'une sélection de traitements couramment utilisés en pratique et visant à réduire ou à contrer la corrosion de l'acier d'armature dans les éléments de béton exposés aux ions chlorure. À cette fin, un protocole a été élaboré de manière à prendre en considération le niveau de contamination en ions chlorure et l'état d'avancement de la dégradation par corrosion des éprouvettes. La séquence d'application a été divisée en 2 phases et les traitements testés étaient :

- Scellant à base de silane contenant 40 % d'agent actif;
- Scellant à base de silane contenant 100% d'agent actif;
- Inhibiteur de corrosion en adjuvant (nitrite de calcium);
- Inhibiteur de corrosion migrateur (nitrite de calcium);
- Scellant à base de silane (100 % d'agent actif) comportant un inhibiteur de corrosion organique;
- Membrane d'imperméabilisation.

Plus spécifiquement, les cinq paramètres suivants ont été évalués sur les éprouvettes constituant les Phases 1 et 2 de ce projet :

- La pénétration des traitements appliqués en surface;
- Le profil d'humidité relative;
- Le profil de concentration en ions chlorure;
- L'initiation et la cinétique de la corrosion;
- L'état de corrosion des barres au terme du conditionnement en chambre saline (Phase 1).

Les principales conclusions, propres à chaque traitement utilisé dans cette étude, sont détaillées dans les sous-sections suivantes. On émet également pour chacun des recommandations pratiques.

## 2.5 Scellant à base de silane

Les résultats recueillis sur les dalles des Phase 1 et 2 traitées avec les trois types de scellant à base de silane (S40, S100 et MetS) sont tous similaires. C'est pourquoi il est possible de regrouper les observations dans une même sous-section.

Ainsi, les mesures de pénétration ont montré que la pénétration des scellants à base de silane était optimisée lorsque les produits étaient appliqués sur une matrice cimentaire non contaminée en ions chlorure. Cette différence pourrait s'expliquer par des conditions hygrométriques différentes de la surface au moment d'appliquer les scellants. En fait, la pénétration des scellants est fortement influencée par l'humidité relative du substrat lors de l'application.

Tous les scellants ont favorisé une baisse de l'humidité relative à la profondeur des barres d'armature. Cependant, les baisses d'humidité relative observées ne sont pas suffisantes pour influencer la réaction de corrosion.

Il est important de mentionner que la baisse de l'humidité relative aurait pu être plus importante si la surface inférieure des éprouvettes avait été scellée avec la membrane de polyuréthane et si la période de séchage lors des cycles de mouillage-séchage avait été plus longue. Dans pareilles conditions, l'eau contenue dans les éprouvettes aurait pu évaporer en plus grande quantité, ce qui aurait influencé davantage la réaction de corrosion sur les éprouvettes traitées en condition de propagation de la corrosion.

Les mesures du contenu en ions chlorure total effectuées sur les éprouvettes de la Phase 1 à la suite d'une exposition de 80 cycles au brouillard salin montrent l'efficacité de tous les scellants à freiner la pénétration des ions chlorure. Ce constat est le même lorsque les scellants sont appliqués sur un substrat non contaminé par les chlorures, et ce, en zone fissurée et non fissurée. Lorsque les scellants sont appliqués alors que la corrosion est active, les résultats montrent que la quantité totale d'ions chlorure n'augmente pas, mais qu'une redistribution des ions chlorure survient à travers le béton de recouvrement.

Les mesures de corrosion ont prouvé que l'application des scellants sur un substrat non contaminé en chlorures est très efficace pour prévenir l'initiation de la corrosion pour une période de 80 cycles. Ce résultat est le même pour les éprouvettes de la Phase 1 pourtant affectées par la présence de fissures en surface et de défauts à l'interface acier-béton. En ce qui concerne les dalles traitées à l'état de propagation, une stabilisation de l'intensité de corrosion a été observée sur toutes les barres d'armature en acier traitées, et ce, tout au long de la période de suivi de 74 cycles.

L'autopsie a permis de confirmer l'efficacité des scellants à prévenir la corrosion lorsque ceux-ci sont appliqués sur un béton non contaminé en ions chlorure. De plus, l'autopsie des dalles traitées avec un scellant en condition de propagation de la corrosion a révélé des zones anodiques comparables à celles observées sur les barres d'armature en acier extraites des dalles de référence.

## **2.6 Inhibiteur de corrosion en adjuvant (nitrite de calcium)**

L'ajout du nitrite de calcium en adjuvant augmente le temps nécessaire pour l'initiation de la corrosion. Une fois la corrosion initiée, une activité de corrosion comparable à celle mesurée sur les échantillons de référence a été observée.

Ce résultat doit être considéré avec précaution pour deux raisons. Premièrement, les trois éprouvettes contenant cet inhibiteur ne montraient pas le patron de fissuration caractérisant les autres éprouvettes de la Phase 1. L'absence de fissures ne peut qu'augmenter le temps d'initiation de la corrosion. De plus, l'adjuvant a été incorporé à un dosage relativement faible ( $15 \text{ L/m}^3$ ) étant donné la qualité du béton (e/c de 0,6) et l'environnement extrême d'exposition aux ions chlorure. Ce dosage relativement faible pourrait expliquer l'effet réduit de l'inhibiteur de corrosion.

## **2.7 Inhibiteur de corrosion en migrateur (nitrite de calcium)**

Les mesures de pénétration du nitrite de calcium appliqué en migrateur ont montré une profondeur de pénétration maximale de 8 mm. Ainsi, l'inhibiteur appliqué en migrateur ne parvient pas à rejoindre les barres d'armature en acier situées à une profondeur de 15 mm.

Dans le cadre de cette étude, le traitement n'a donc pas pu influencer la réaction de corrosion. Ce constat a été confirmé par l'intermédiaire des mesures électrochimiques et par l'autopsie des éprouvettes, puisque les mesures et les observations recueillies étaient comparables à celles observées sur les éprouvettes de référence.

## **2.8 Membrane**

L'application d'une membrane sur des éléments de béton armé déjà contaminés en ions chlorure emprisonne le contaminant sous la membrane et vient bloquer tout apport additionnelle en chlore provenant de l'environnement externe. Ainsi, une redistribution du chlore déjà présent sur l'épaisseur du béton de recouvrement se produit dans les corps d'épreuve. Ce comportement est comparable à celui observé sur les corps d'épreuve traités avec les scellants à base de silane déjà contaminés en ions chlorure de sorte que les profils en ions chlorure déterminés à la fin de la période d'essai sont similaires à ceux observés sur les dalles précontaminées traitées avec les scellants à base de silane.

À la suite de cette observation, une précaution devrait être prise dans le cas où les membranes sont appliquées sur un substrat contenant des ions chlorure, mais où la corrosion ne serait pas encore initiée, car la redistribution des ions chlorure observée dans cette étude pourrait entraîner l'initiation de corrosion à plus ou moins brève échéance. Ainsi, il est grandement recommandé d'appliquer les membranes sur des substrats vierges que très faiblement contaminés.

Les mesures électrochimiques de corrosion montrent que l'application d'une membrane à l'état d'initiation de la corrosion aide à stabiliser le courant et le potentiel de corrosion. Les résultats sont différents lorsque les membranes sont appliquées à l'état de propagation sur une surface présentant un patron de fissuration. Dans cette situation, l'intensité de la corrosion semble augmenter dans le temps et semble équivalente aux mesures observées sur les éprouvettes de référence de la Phase 1.

#### 4. REMERCIEMENTS

Cette étude a été supportée financièrement par le conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), le fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT) et les partenaires de la *chaire industrielle sur la réparation durable et l'entretien optimisé des infrastructures en béton* de l'Université Laval (BASF Building Systems, Euclid, Holcim, Hydro-Québec, Lafarge, Matériaux King, ministère des Transports du Québec, Ville de Montréal, Ville de Québec et W.R. Grace).

#### 5. RÉFÉRENCES

Bentur A., Diamond S. et Berke N. (1997) *Steel corrosion in concrete – Fundamentals and civil engineering practice*, E & FN Spon

Broomfield J.P. (1997) *Corrosion of steel in concrete*, E & FN Spon

Federal Highway Administration (2013) *Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States*, FHWA-RD-01-156.

Ghali E. (2010) *Électrochimie, corrosion et protection*, Université Laval, Canada

Glass G. K., Reddy B. et Buenfeld N. R. (2000) *The participation of bound chloride in passive film breakdown on steel in concrete*, *Corrosion science*, Volume 42 : 2013-2021

McGettigan (1992) *Silicon-based weatherproofing materials*, *Concrete international*, Volume 14 : 52 -56

Page M. M., Page C. L., Ngala V. T. et Anstice D. J. (2002) *Ions chromatographic analysis of corrosion inhibitors in concrete*, *Construction and building materials*, Volume 16 : 73-81

Rosenberg A., Hansson C.M. et Andrade C. (1989) *Mechanism of corrosion of steel in concrete*, *Materials Science of concrete*, Volume 1 : 285-314

Sölev T.A. et Richardson M. G. (2008) *Corrosion inhibitors for steel in concrete : State-of-the-art report*, *Construction and building materials*, Volume 22 : 609 - 622