

PROTECTION CATHODIQUE

TABLIER DU PONT D'ÉTAGEMENT DU CHEMIN UPPER-LACHINE

**Nourredine Kadoum, M. Sc. A.
CPI Corrosion ltée**

**Daniel Bouchard, ing. M. Sc.
Ministère des Transports du Québec**

RÉSUMÉ

L'état de dégradation de nos ouvrages associé à l'urgence d'intervention et à la volonté de performance amènent les gestionnaires à opter, de plus en plus, à des solutions de réhabilitations innovantes. Dans ce cadre, cet article traite de l'utilisation d'une technologie de réhabilitation innovatrice dans le domaine des structures en béton armé et dont la performance a pu être mesurée sur site à partir d'un cas d'application de la technique unique au Québec. D'une manière générale, la corrosion des aciers d'armature est l'une des principales causes de dégradation des structures en béton armé. Celle-ci se manifeste non seulement par une détérioration du béton, mais également par une perte d'adhérence et une diminution du diamètre des barres d'armature, ce qui peut avoir pour conséquence de remettre en cause l'intégrité de la structure. En 2002-2003, un système de protection cathodique à courant imposé a été installé sur les dalles du pont Upper-Lachine dans le cadre des travaux de réhabilitation du projet Decarie; ce système permet de contribuer à la maîtrise du contrôle de la corrosion des aciers d'armature. L'article présente des travaux sur site réalisés dans le cadre de ce mandat ainsi que des principaux faits saillants. Les principales conclusions découlant de ces travaux traduisent les aspects pratiques quant au contrôle de la corrosion des aciers d'armature par la protection cathodique. De plus, la mise en service du système, son fonctionnement et sa performance depuis sa date de mise en service sont présentés.

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Dans le cadre d'un programme biennal, le ministère des Transports du Québec a effectué la réhabilitation de toutes les structures qui passent au-dessus de l'autoroute 15 entre les autoroutes 40 et 720. Elles ont été construites à la fin des années 60 et leur moyenne d'âge est de 35 ans. Compte tenu de l'importance de ces structures dans le réseau autoroutier montréalais, leur état doit être maintenu dans une condition supérieure à celle acceptable.

Sur une des structures, soit celle de la rue Upper-Lachine, les inspections générales et les différents relevés démontraient que des travaux d'entretien majeurs étaient requis. La structure est un pont d'étagement de type dalle évidée à cinq travées continues et à quatre voies de circulation incluant un trottoir et un parapet de chaque côté ainsi qu'une bande médiane. La superficie de la dalle est d'environ 1 990 m².

Les rapports des inspections et des investigations effectuées montraient que les trois joints de tablier n'étaient plus étanches. Les infiltrations d'eau et de sel ont causé la détérioration du béton des culées, de la dalle évidée, des chevêtres et des piles.

Les travaux devaient s'intégrer avec ceux des autres structures afin de minimiser leur impact sur la circulation de l'autoroute et des rues de la ville de Montréal. Leur planification et celle de la gestion de la circulation étaient primordiales étant donné que cette artère est le lien nord-sud le plus important sur le territoire de la ville de Montréal. Les travaux de réfection de la chaussée prévus par la Ville de Montréal devaient aussi être pris en considération et en plus, cette dernière devait être consultée relativement à la déviation de la circulation et des travaux qui sont sous sa responsabilité.

1.2 ÉTUDES RÉALISÉES

Pour déterminer l'état de la structure et les travaux d'entretien majeurs requis sur la dalle, les inspections et études suivantes ont été réalisées :

- Prélèvement de carottes : des essais sur la résistance du béton, la teneur en ions chlorures, les caractéristiques du réseau de bulles d'air et l'absorptivité du béton ont été réalisés sur les carottes;
- Relevé de potentiel de corrosion de la dalle pour déterminer les zones de probabilité d'activité de corrosion des aciers d'armature de la dalle.

1.3 ÉTAT DE LA STRUCTURE

Les résultats de l'investigation de la dalle du tablier sont :

- Résistance en compression du béton de la dalle mesurée sur deux carottes : 44,4 et 34,6 MPa;
- Aucune des 12 carottes prélevées ne montrait de délaminage ou de détérioration;

- Teneur moyenne en ions chlorures de 0,05 % dans les premiers et deuxième 25 mm supérieurs du tablier, et de 0,03 à 0,13 % à une profondeur de 50 à 75 mm;
- Teneur en air : 9,1 %.

Les différentes inspections et investigations de la dalle montrent que cette dernière est en bon état. À l'exception de la quantité de sel qui dépassait les valeurs limites, la résistance du béton ainsi que la teneur en air étaient appropriées. Sur les 12 carottes prélevées en 1998, aucune n'avait de délaminage ou de détérioration. Le relevé de potentiel de corrosion démontrait une forte probabilité de corrosion sur moins de 6 % de la superficie.

1.4 INTERVENTION PRIVILÉGIÉE

Compte tenu de l'état actuel de la dalle, et pour ne plus avoir besoin d'intervenir sur cette structure avant au moins 20 ans, le ministère des Transports a opté pour mettre en place un système de protection cathodique. Il est reconnu que la protection cathodique est une des méthodes les plus efficaces pour corriger la corrosion des armatures, puisqu'elle intervient à la source même du processus de dégradation. Elle s'avère une intervention judicieuse, entre autres pour une dalle ayant des zones avec activité corrosive et dont la détérioration est limitée.

L'installation du système de protection cathodique arrête l'activité corrosive. Elle a comme avantage que le béton sain contaminé par les chlorures n'a pas à être enlevé.

Les expériences antérieures de protection cathodique à courant imposé au ministère des Transports du Québec ont démontré que l'inconvénient majeur du système est de s'assurer d'un suivi périodique afin que le courant se retrouve en tout temps à l'intérieur d'un intervalle spécifié. Le Ministère a donc obligé l'entrepreneur à fournir un suivi du système par une firme spécialisée au cours des dix prochaines années.

1.5 ÉTENDUE DES TRAVAUX

Les travaux consistaient à installer sur les voies carrossables ainsi que sur le trottoir nord un système de protection cathodique à courant imposé afin de protéger les aciers d'armature de la dalle du tablier de la structure contre la corrosion.

Dans le cas du trottoir, ce dernier a fait l'objet d'une reconstruction. Par conséquent, la protection du trottoir concerne les nouvelles barres d'armature en acier noir installées lors des travaux de reconstruction. Quant à la dalle, la protection contre la corrosion concerne les barres d'armature existantes.

2 CONCEPTION DU SYSTÈME DE PROTECTION CATHODIQUE

La philosophie de conception adoptée pour le système de protection cathodique vise la durabilité de l'investissement devant être consenti pour la réhabilitation de la dalle du tablier de pont.

2.1 BESOIN EN COURANT DE PROTECTION

Les besoins en courant de protection considérés sont de 20 mA/m² de surface d'acier et sont basés sur les recommandations de la NACE (*National Association of Corrosion Engineer*). Ce besoin peut être moindre en fonction du niveau d'agressivité de l'environnement et des effets de la protection cathodique sur les surfaces d'acier après la mise en service du système.

Superficie à protéger

À partir des plans du pont et des relevés sur site, la superficie de voies carrossables et de trottoir à protéger a été estimée à :

	Superficie à protéger
Trottoir nord	230 m ²
Voies carrossables	1 500 m ²
Total	1 730 m²

2.2 ÉTUDE PRÉALABLE

Une étude préalable a consisté à définir les caractéristiques du site nécessaires à l'élaboration de la conception du système de protection cathodique, notamment le nombre de sections, d'électrodes de référence, etc.

Les travaux de l'étude préalable ont permis de déterminer les points suivants :

- État visuel de la surface du béton;
- Recouvrement du béton;
- État de l'activité de corrosion des armatures;
- Continuité électrique des armatures;
- Résistivité du béton.

État visuel du béton

L'inspection du béton a permis de relever un béton en bon état qui ne présente aucun signe de dégradation majeure. Par ailleurs, des échantillons de béton ont été prélevés sur la dalle du tablier. Leur inspection a confirmé le bon état général de la dalle.

Recouvrement du béton

Les travaux d'évaluation du recouvrement du béton ont permis de relever une hétérogénéité dans la profondeur de recouvrement des aciers d'armature de la dalle des voies carrossables. Pour ce qui est du trottoir, il a été reconstruit et le recouvrement des aciers d'armature est d'une épaisseur suffisante et relativement homogène.

Dans le cas de la dalle, la profondeur du béton de recouvrement varie dans le sens transversal du tablier, de sorte que la profondeur de recouvrement est maximale près de la bande médiane centrale et minimale près des trottoirs (nord et sud). Les photographies suivantes illustrent ce constat et montrent l'état du recouvrement à proximité du trottoir comparativement aux abords de la bande médiane centrale.



Photo 1 État du recouvrement à proximité du trottoir



Photo 2 État du recouvrement à proximité de la bande médiane centrale

État de l'activité de corrosion des armatures

L'état de l'activité de corrosion des aciers d'armature de la dalle des voies carrossables a été obtenu par le biais de travaux de relevé de potentiel de corrosion. Les résultats sont présentés sous forme de cartographie en annexe et démontrent que les activités de corrosion sont majoritairement faibles à initiées. Les lectures de potentiels ont toutefois permis de relever des activités de corrosion un peu plus intenses sur la dalle des travées 1 et 2 relativement à la travée 3.

Continuité électrique des armatures

La continuité électrique a été vérifiée sur l'ensemble du réseau d'armatures de la dalle ainsi que du trottoir nord à la suite de sa reconstruction. Ces essais ont démontré que l'ensemble du réseau d'armatures de la dalle est continu de l'axe 1 à l'axe 7. De plus, les aciers d'armature du nouveau trottoir sont électriquement continus avec ceux de la dalle.

Résistivité du béton

La résistivité du béton de la dalle du tablier a été évaluée à divers endroits sur le pont, de façon à couvrir les travées 1, 2 et 3.

Les résultats de ces mesures ont montré un béton dont la résistivité est relativement homogène et de l'ordre de 20 000 à 30 000 ohms-cm.

2.3 DESCRIPTION DU SYSTÈME DE PROTECTION CATHODIQUE

En tenant compte des calculs de conception et des résultats de l'étude préalable, une conception détaillée du système de protection cathodique a été effectuée. Il comprend les principaux éléments suivants :

- Six sections distinctes afin de limiter la surface des sections et de tenir compte du degré des activités de corrosion des aciers d'armature. Les sections définies sont désignées section 1 à section 6;
- Différentes sous-sections pour chacune des sections principales afin de tenir compte de la disparité de l'épaisseur du béton de recouvrement;
- Deux types de matériaux anodiques sont prévus : l'un pour la dalle des voies carrossables et l'autre spécifiquement pour le trottoir nord. Le choix de ces matériaux anodiques a été défini par leur performance ainsi que les caractéristiques du site;
- Neuf électrodes de référence ont été incluses dans le cadre de l'instrumentation du système de protection cathodique. Elles sont de type Argent/chlorure d'argent et graphite;
- Une sonde de température et d'humidité a été incorporée dans le béton de la dalle du tablier;
- Un redresseur de courant pour alimenter le matériau anodique installé sur la dalle des voies carrossables ainsi que sur le trottoir nord;
- Une unité d'acquisition de données pour l'interrogation du système de protection cathodique à distance ainsi que l'enregistrement des données de fonctionnement.

3 MISE EN SERVICE DU SYSTÈME DE PROTECTION CATHODIQUE

Les travaux d'installation des éléments du système de protection cathodique ont été achevés en **juillet 2003**. Cela inclut l'ensemble des éléments installés dans le béton (matériau anodique, électrodes de référence, sondes, câblage...), les boîtes de tirage ainsi que le redresseur de courant, et l'unité d'acquisition de données mise en place dans un boîtier d'instrumentation.

Toutefois, ce système n'a pu être mis en fonction à cette date en raison de l'absence de l'alimentation en courant alternatif et de la ligne de téléphone. En effet, l'alimentation en courant alternatif n'a été disponible qu'au cours de **mai 2004**, tandis que la ligne téléphonique nécessaire à l'interrogation de l'unité d'acquisition de données n'a été libérée qu'au mois d'**août 2004**.

3.1 ESSAIS PRÉLABLES À LA MISE EN SERVICE

Préalablement à la mise en service du système de protection cathodique, des essais ont été réalisés sur les éléments de ce système, soit :

- La vérification des circuits et des principaux éléments du système de protection cathodique;
- Les lectures des résistances de circuits des différentes sections et sous-sections du système de protection cathodique;
- Les lectures des potentiels « statiques » des électrodes de référence permanentes.

La vérification des circuits a montré que l'ensemble des éléments du système de protection cathodique était bon.

Les résistances des circuits d'anode des sections 1 à 6 sont homogènes et de l'ordre de 0,30 à 0,55 ohm. La résistance de 0,55 ohm a été obtenue pour la section 2 qui se caractérise par la superficie la moins élevée. Quant aux autres sections, les résistances obtenues sont comparables, et ce, en tenant compte des superficies de chacune d'entre elles.

Ce constat démontre que les sections sont parfaitement équilibrées et que l'installation n'a induit aucune résistance particulière.

3.2 MISE EN SERVICE DU SYSTÈME

La mise en service du système de protection cathodique a été effectuée le 19 mai 2004, et ce, à la suite de l'installation de l'alimentation en courant alternatif.

Cette mise en service a permis de mettre en fonction le redresseur de courant avec une capacité égale à environ 20 % du besoin en courant maximal estimé à 27 ampères. De ce fait, la capacité du redresseur a été ajustée à 6 ampères.

À cette date, ne disposant pas de la ligne téléphonique pour le suivi du fonctionnement du système de protection cathodique, des visites régulières sur le site effectuées par notre personnel ont permis de nous assurer du fonctionnement du système durant la période allant de mai à août 2004.

4 SUIVI DU SYSTÈME DE PROTECTION CATHODIQUE

Le suivi du système de protection cathodique consiste à s'assurer que les sections du tablier du pont reçoivent un courant de protection suffisant pour permettre une polarisation des aciers d'armature et donc, une protection adéquate contre la corrosion.

Relativement à cela, le suivi du système de protection cathodique du tablier du pont d'étagement du chemin Upper-Lachine est basé sur le suivi à distance des paramètres de fonctionnement de ce système, et ce, par le biais d'une unité d'acquisition de données interrogeable à distance à l'aide d'une ligne téléphonique et d'un ordinateur muni d'un modem.

Ce suivi n'a pu être assuré qu'à partir du mois d'août 2004, c'est-à-dire depuis la mise en service de la ligne téléphonique dédiée à ce système.

4.1 ÉLÉMENTS DE SUIVI DU SYSTÈME DE PROTECTION CATHODIQUE

Le suivi du système de protection cathodique du pont Upper-Lachine est basé sur l'utilisation de l'unité d'acquisition de données pour la lecture et la sauvegarde des lectures des paramètres suivants du système :

- La tension nécessaire à la circulation du courant de protection pour chacune des sections;
- Le courant de protection circulant sur chacune des sections;
- Les potentiels « On » des neuf électrodes de référence permanentes;
- Les potentiels « Off » des neuf électrodes de référence permanentes;
- La température du béton telle qu'elle a été relevée par la sonde de température enfouie dans le béton;
- L'humidité du béton telle qu'elle a été relevée par la sonde d'humidité enfouie dans le béton.

4.2 INTERPRÉTATION DES LECTURES DU SYSTÈME D'ACQUISITION DE DONNÉES

Les lectures obtenues et enregistrées par l'unité d'acquisition de données sont exprimées en :

- Volts pour la tension des sections du tablier du pont;
- Ampères pour le courant de protection des sections du tablier du pont;
- Millivolts pour les potentiels des électrodes de référence;
- Millivolts pour les sondes de température et d'humidité.

En ce qui concerne les sondes de température et d'humidité, l'obtention des valeurs réelles de la température et de l'humidité nécessite une conversion des lectures obtenues par l'unité d'acquisition de données. Elle est basée sur les caractéristiques suivantes :

	<i>Température</i>	<i>Humidité</i>
Valeur lue en millivolts	Valeur réelle de la température	Valeur réelle de l'humidité
0	- 40 °C	0 %
1 000	+ 60 °C	100 %

5 DONNÉES DE SUIVI DU SYSTÈME POUR LES MOIS

5.1 DONNÉES DE SUIVI

Le suivi à distance du système de protection cathodique a débuté le 27 août 2004. Il est fonctionnel depuis le 14 mai 2004 et par conséquent, les aciers d'armature du tablier reçoivent des courants de protection depuis cette date.

Le suivi à distance a consisté à enregistrer les lectures des paramètres du système de protection cathodique à une fréquence d'une lecture par jour. Les lectures obtenues entre mai 2004 et mars 2005 sont présentées sous forme de graphiques en annexe.

5.2 PERFORMANCE DU SYSTÈME DE PROTECTION CATHODIQUE

Une dépolarisation du système de protection cathodique a été effectuée durant cette période de suivi afin d'évaluer la performance de ce système. Elle consiste à annuler le courant de protection contre la corrosion durant une certaine période et à mesurer les potentiels des électrodes de référence avant et durant la période d'annulation du courant.

La dépolarisation est obtenue à partir des électrodes de référence permanentes installées dans le béton. Elle correspond à la différence entre le potentiel « Off » de l'électrode avant l'annulation du courant de protection et le potentiel obtenu après une période d'annulation du courant.

La dépolarisation du système de protection cathodique du pont Upper-Lachine a été réalisée du 28 août au 1^{er} septembre 2004, durant une période de près de 100 heures. Les données de cet essai sont présentées sur le tableau de synthèse ci-après.

Aux fins de synthèse, les potentiels « Off » avant annulation du courant, après 24 heures et après 100 heures de dépolarisation obtenus pour chacune des électrodes de référence permanentes sont donnés au tableau suivant :

<i>Électrode</i>	<i>Potentiel « Off » avant annulation du courant (mV)</i>	<i>Potentiel 24 heures après annulation du courant (mV)</i>	<i>Potentiel 100 heures après annulation du courant (mV)</i>	<i>Dépolarisation obtenue après 24 heures (mV)</i>	<i>Dépolarisation obtenue après 100 heures (mV)</i>
<i>EA1</i>	+ 98	+ 289	+ 266	191	168
<i>EA2</i>	- 293	- 69	- 77	224	370
<i>EA3</i>	- 214	- 117	- 117	97	97
<i>EA4</i>	- 436	- 314	- 310	122	126
<i>EA5</i>	- 333	- 130	- 139	203	194
<i>EA6</i>	- 396	- 134	- 140	143	256
<i>EA7</i>	- 412	- 269	- 256	143	156
<i>EG8</i>	- 333	- 154	- 156	179	177
<i>EG9</i>	- 243	- 149	- 145	94	98

Il est à noter que relativement à la norme RP-0290 « *Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures* », la performance du système de protection cathodique est essentiellement évaluée à partir du critère suivant :

Une dépolarisation de 100 mV doit être atteinte dans la partie la plus anodique de chaque zone ou surface de 50 m².

Toutefois, l'expérience montre que dans le cas de structures neuves ou réhabilitées, une dépolarisation de l'ordre de 50 mV peut être jugée suffisante pour évaluer la performance d'un système de protection cathodique.

En tenant compte du critère de protection et des données de la dépolarisation réalisée sur le système de protection cathodique du pont Upper-Lachine, il apparaît que la dépolarisation obtenue pour chacune des électrodes de référence permanentes est largement suffisante pour satisfaire au critère de protection.

Par conséquent, le système de protection cathodique est d'une part, parfaitement fonctionnel et d'autre part, performant pour assurer la protection contre la corrosion des aciers d'armature du tablier du pont.

6 CONCLUSION

Les essais préalables à la mise en service ainsi que ceux de suivi du système de protection cathodique démontrent que ce dernier fonctionne conformément aux exigences du devis. De plus, ce système présente une performance adéquate pour assurer la protection contre la corrosion des aciers d'armature du tablier du pont.

ANNEXE

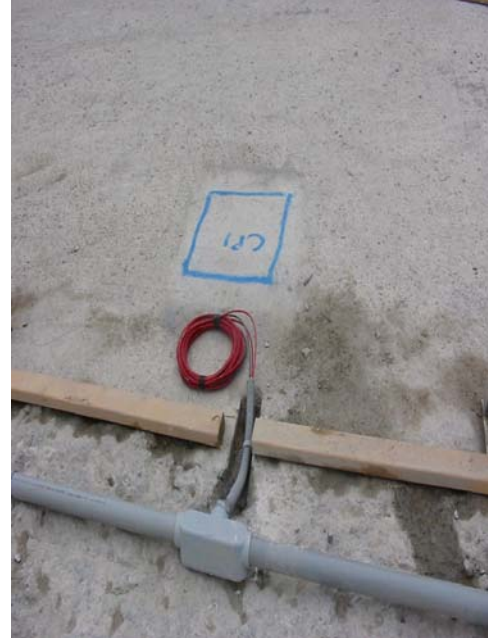
- GRAPHIQUES
- PHOTOGRAPHIES DU DÉROULEMENT DU PROJET
- CARTOGRAPHIE DE RELEVÉ DE POTENTIEL



1- Pose conduit principal des câbles du système



2- Pose conduit principal des câbles du système



3- Positionnement instrumentations



4- Pose anode sur la dalle



5- Contournement d'obstacle



6- Contrôle qualité



7- Pose anode trottoir



8- Sonde humidité et température



9- Positionnement GPS des composants du système



10- Préparatifs avant la pose de la chape de béton



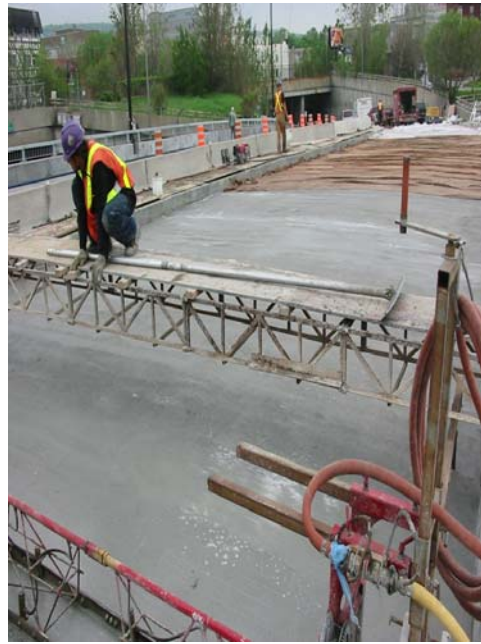
11- Vérification finale



12- Application de la barbotine



13- Pose de la chape de béton



14- Finition et cure de la chape



15- Pose de la membrane



16- Vue d'ensemble du redresseur et SAD vue intérieure



17- Câblage extérieur

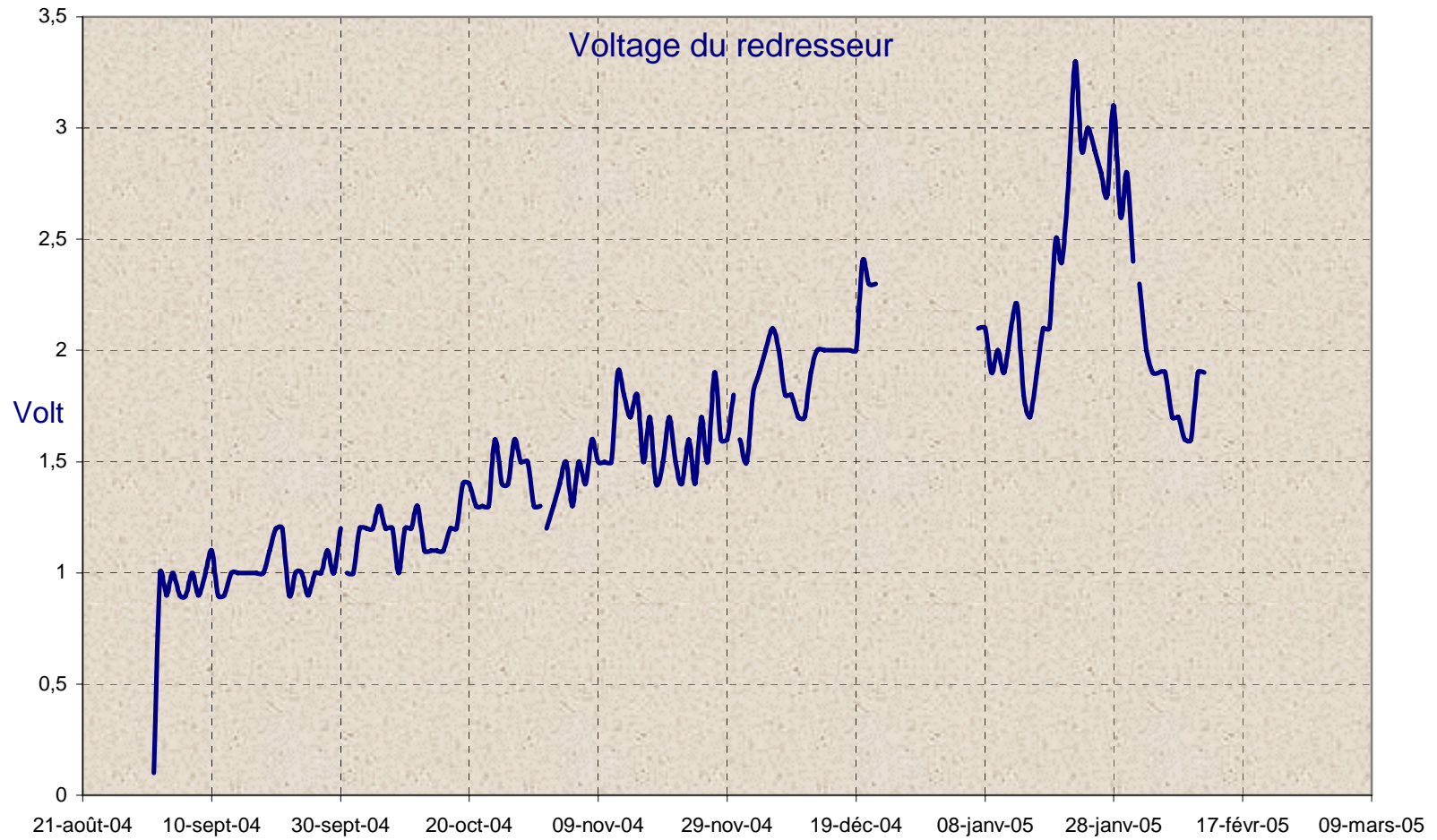


18- Disposition du redresseur

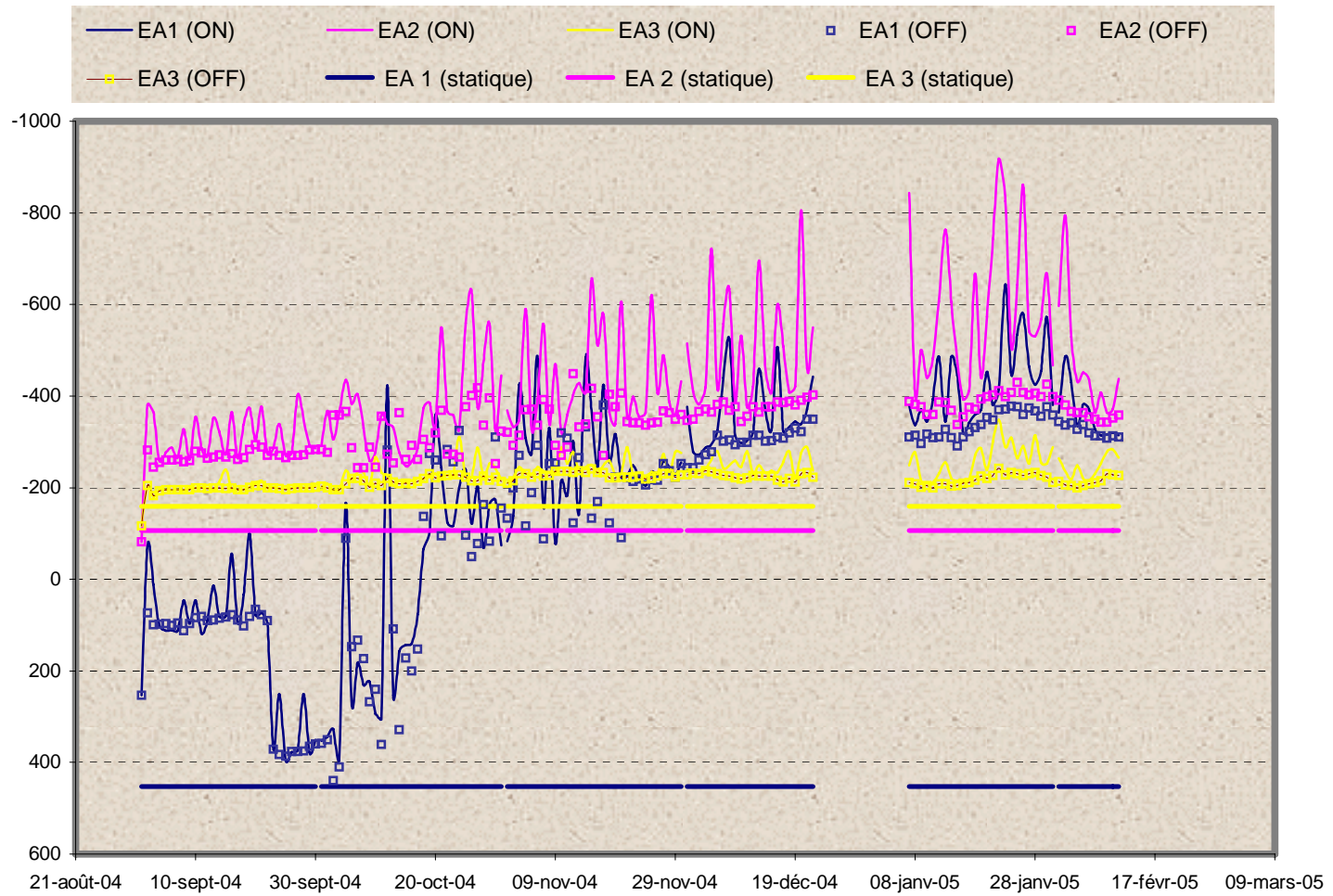
GRAPHIQUE 1
Évolution de la température et l'humidité du béton entre août 2004 et mars 2005



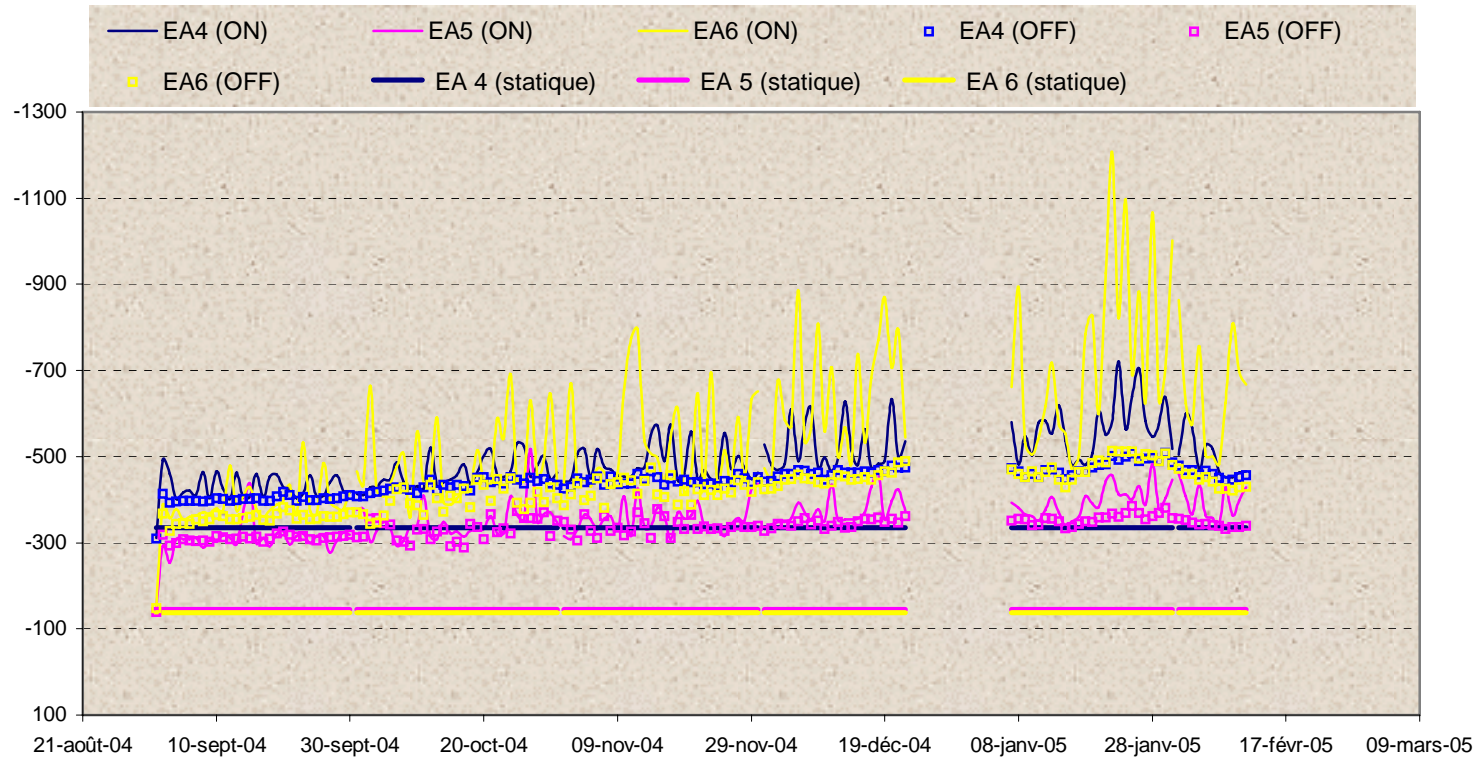
GRAPHIQUE 2
Variation du voltage des redresseurs de courant entre août 2004 et mars 2005



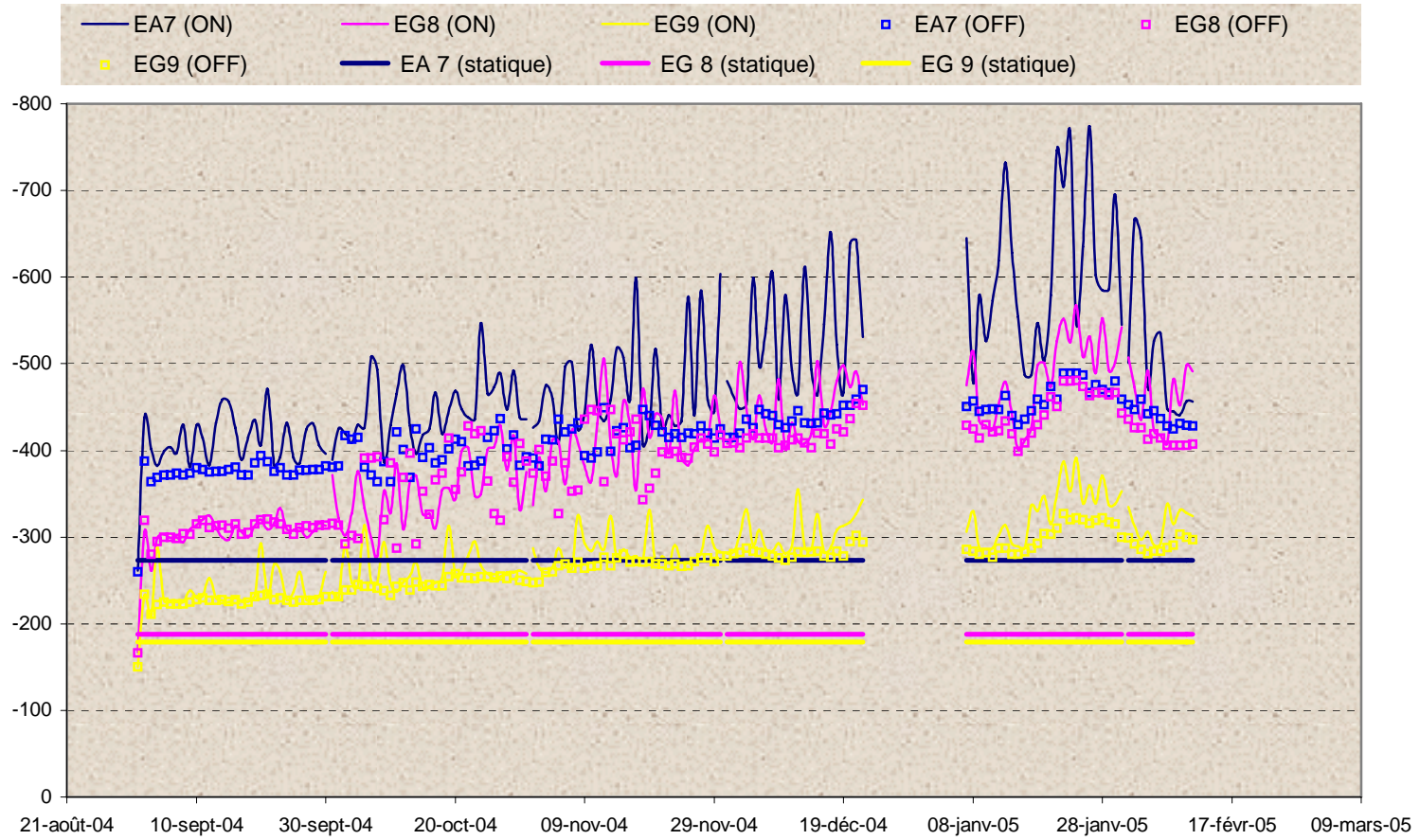
GRAPHIQUE 3
Comportement des électrodes de référence 1, 2 et 3 entre août 2004 et mars 2005



GRAPHIQUE 4
Comportement des électrodes de référence 4, 5 et 6 entre août 2004 et mars 2005



GRAPHIQUE 5
Comportement des électrodes de référence 7, 8 et 9 entre août 2004 et mars 2005



CARTOGRAPHIE

Relevé de potentiel sur les parties concernées par l'installation du système de protection cathodique

Relevé de potentiel

