

RÉHABILITATION DES PILES DU MONTE CARLO STAR À MONACO

Guillaume ROTI

Travaux Public de la Principauté de Monaco

Emeric THEUNISSEN

Bureau d'étude ACRI-IN

Christian TOURNEUR, Naziha BERRAMDANE

Freyssinet International

Patrick CONSALVI, Marc JEULIN

Freyssinet France - PACA

INTRODUCTION

Au cours des deux dernières décennies, les techniques de prévention et de protection électrochimiques des aciers dans le béton telles que la protection cathodique par courant imposé (PC) ou les traitements de ré alcalinisation/extraction de chlorures, sont de plus en plus utilisées dans le cadre de la réhabilitation des bâtiments et ouvrages d'arts. Ces techniques rencontrent un succès grandissant car elles permettent de palier les carences des techniques traditionnelles et d'augmenter considérablement la durée de vie des structures en béton armé, tout en diminuant les consommations d'énergies liées aux opérations de réparation traditionnelles qui sont peu durables et à renouveler à fréquences régulières .

Depuis 15 ans, ces techniques ont été identifiées, évaluées et développées par Freyssinet International, afin de garantir des réparations durables et de diminuer les impacts environnementaux. Elles constituent l'ossature d'une gamme de solutions regroupées sous le label Foreva.

La réhabilitation des piles du bâtiment Monte Carlo Star (MCS) à Monaco est une parfaite illustration de l'association de ces deux techniques de protection anti-corrosion.

Dans le cadre des aménagements futurs du port de la Condamine, l'intégration des piles du MCS au future bâtiment Yacht Club impliquait leur réparation au préalable.

En effet, les travaux de réhabilitation des 17 piles, définis par le groupement de maîtrise d'œuvre SETEC TPI / ACRI-IN / CEBTP et confiés à Freyssinet ont nécessité l'association aux techniques de réparation traditionnelle deux techniques de protection électrochimique : un traitement électrochimique d'extraction de chlorures «FOREVA Regebeton Cl'» et une protection cathodique par courant imposé permanente «FOREVA CP MESH» au niveau des zones où des apports de chlorures pourraient se faire par capillarité.



Photographie 1 : Bâtiment Monte Carlo Star reposant sur les piles

Ce document est articulé en quatre parties :

Le premier chapitre décrit le principe sur lequel repose la protection cathodique et le traitement de ré alcalinisation/extraction de chlorures. Puis une deuxième partie explique les choix de solutions Foreva appliquées aux piles du MCS. La troisième partie met en évidence la conception de la PC et les importantes étapes d'installation du système. Enfin, le quatrième chapitre développe les résultats obtenus et les discussions.

1. PRINCIPES DES TECHNIQUES DE PROTECTION ÉLECTROCHIMIQUES

Les techniques électrochimiques ont pour but de réduire la corrosion des armatures quelque soit l'environnement agressif et la qualité du béton d'enrobage grâce à un courant de protection qui est fourni par une source électrique extérieure (courant continu). Il s'agit de contrôler électriquement le potentiel électrochimique des armatures afin de vérifier qu'elles se comportent bien de façon cathodique.

1.1. Protection cathodique par courant imposé

Pour les métaux et alliages dans un milieu électrolytique, appliquer une protection cathodique revient à faire entrer un courant électrique continu de l'électrolyte [c'est à dire un milieu conducteur, eau de mer, eau douce, sol (sable, argile ou autre) ou encore béton pollué] vers le métal par conduction ionique afin de supprimer ou réduire les zones anodiques (zones de dissolution) à l'interface. Ce courant cathodique se traduit par un abaissement du potentiel de corrosion.

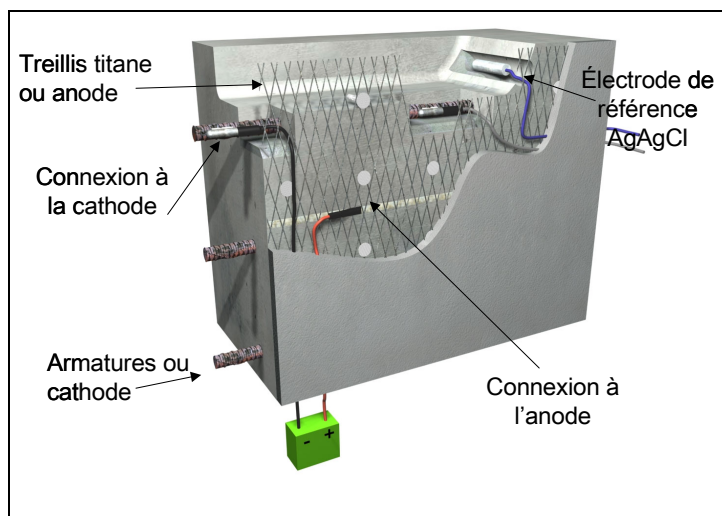


Figure 1 : Schéma de principe d'une installation Freyssinet de protection cathodique par courant imposé dans le béton

Du point de vue thermodynamique (probabilité de réaction), cela revient à passer d'un point situé dans le domaine de corrosion du diagramme « potentiel pH » de Pourbaix, vers un point situé dans le domaine d'immunité.

Du point de vue cinétique (vitesse de réaction), cela revient à abaisser le potentiel au dessous d'une valeur telle que la densité de courant anodique (courant de corrosion) de l'acier soit négligeable.

Schématiquement, l'apport du courant cathodique transforme l'ensemble de l'interface acier/électrolyte en cathode en supprimant les réactions de corrosion du métal. Le renforcement des réactions cathodiques de réduction des espèces oxydantes provoque une alcalinisation du milieu à la surface de l'acier.

En théorie, dans le cas d'une protection cathodique d'un ouvrage en béton armé, le seuil de potentiel à dépasser est celui qui évite une corrosion significative de l'acier enrobé dépassivé. La valeur généralement admise est de $-0.85V/ECS$ pour des ouvrages situés sur terre et $-0.8V/ECS$ pour des ouvrages situés en mer.

En pratique, notamment lors de la mise en route du système de protection, le critère empirique de dépolarisation de 100mV en 24h est le plus souvent utilisé. L'expérience a démontré qu'un écart de 100 à 300mV par rapport à la valeur de potentiel naturel initial est suffisant pour la protection des armatures (en excluant la chute de tension dans le circuit). Dans le cas de circuits très résistifs (béton aérien carbonaté par exemple), il n'est donc pas nécessaire d'introduire une grande quantité de courant pour atteindre des valeurs de potentiel d'immunité.

Selon la norme NF EN 12696 « Protection cathodique de l'acier dans le béton » associée aux structures aériennes, la densité de courant de protection pour effectuer la conception des systèmes de protection cathodique est de 2mA à 20mA/m² d'acier sans revêtement. En effet, en protection, une densité de courant de protection maximum de 20mA/m² d'acier place les aciers dans un domaine de potentiel où la corrosion par piqûre (due aux chlorures) ne s'amorce pas.

Pour les structures béton armé enterrées ou immergées dans l'eau de mer (NF A05-611) la densité du courant de protection peut dépasser le 10mA/m² si les aciers sont très dégradés.

1.2. Traitement de ré-alcalinisation et d'extraction de chlorures (Regebeton®)

En ré-alcalinisation, le renforcement des réactions cathodiques de réduction des espèces oxydantes (eau et oxygène) avec un courant plus important, (c'est à dire en imposant une densité de courant de 100 à 200mA/m² d'acier) on provoque d'une part une alcalinisation de l'interface acier/béton (formation des ions hydroxydes OH⁻) sur plusieurs millimètres autour des aciers et d'autre part, on favorise à long terme la formation d'une couche homogène d'oxydes protecteurs (oxydes compact et non poreux).

En plus de la création des conditions propices pour restituer la couche passive à la surface de l'acier (ré alcalinisation), l'objectif du traitement temporaire d'extraction de chlorures est de diminuer la teneur en ions chlorures libres (espèces chimiques dépassivantes) des bétons autour des armatures. Autrement dit, l'objectif est donc de diminuer les ions chlorures et si possible d'augmenter les ions hydroxydes OH⁻.

La cathode polarisée négativement repousse les ions négatifs telles que les ions chlorures vers l'anode (pôle positif). A l'interface de la cathode, les réactions de réduction de l'eau produisent des ions hydroxydes, ainsi, le rapport de concentration $[Cl^-]/[OH^-]$ diminue autour de l'armature, et l'agressivité du milieu diminue.

Ce traitement est appliqué en générale pendant environ 2 à 3 semaines. Son efficacité dépend de plusieurs paramètres, les principaux facteurs étant:

- La formation des ions hydroxydes.
- La teneur initiale en Cl⁻ : le flux est proportionnel à la concentration et à la mobilité des ions ; l'efficacité augmente avec la concentration initiale en chlorures.
- La profondeur de la contamination en chlorures : seul les ions dans le béton d'enrobage peuvent être extraits.
- La résistivité du béton : le courant ionique est également une fonction de la résistivité du béton.

1.2.1. Mise œuvre du traitement Regebeton®

Après purge des bétons altérés, les contrôles de continuité électrique sont réalisés entre les différents aciers mis à nu. Les connexions aux armatures sont soudées et les câbles sont mis en attente. Le parement des piles est reconstitué à l'identique.

La pâte Régébeton est appliquée en couche mince sur le parement parfaitement nettoyé. Immédiatement après cet application, l'anode sacrificielle sous forme de grille d'alliage aluminium magnésium est plaquée à la surface et recouverte de pâte (cf. schéma et photographies ci-dessous).

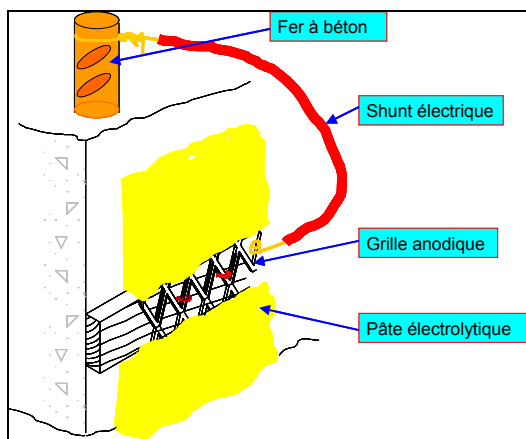


Figure 2 : Schéma du principe d'installation du traitement Regebeton pâte.



Photographies : application de la pâte Regebeton et du grillage aluminium sur le parement d'une pile

La nature alcaline de la pâte Régébeton® facilite les échanges galvanique entre l'acier et l'aluminium, ce dernier est fortement corrodé au contact de cette pâte. Par effet galvanique, les réactions de réduction à l'interface acier/béton augmente le potentiel d'hydrogène (pH) du béton d'enrobage sur plusieurs millimètres autour des aciers.

Pour diminuer le temps de traitement et extraire les chlorures libres, un apport d'énergie supplémentaire peut être nécessaire. C'est pourquoi, les deux électrodes sont reliées à une alimentation électrique. Les densités de courant appliquées restent faibles (de 0.2 à 0.5 A par mètre carré d'acier), le traitement est alors appliqué pendant 21 jours. Au cours du traitement, la pâte est quotidiennement humidifiée et les courants de sortie sont contrôlés.

1.2.2. Test d'efficacité du traitement

Après traitement, pour évaluer l'efficacité du traitement temporaire, plusieurs tests sont possibles. Pour vérifier une ré alcalinisation, un test colorimétrique à la phénolphthaleine est réalisé in-situ. Pour l'extraction de chlorures, étant donnée que la concentration en ions hydroxyles est difficile à déterminer, une analyse des taux de chlorures libres par rapport au poids de ciment est réalisée en laboratoire.

2. LA RÉHABILITATION DU MONTE CARLO STAR

Le bâtiment Monte Carlo Star en avancée sur la mer à Monaco a été construit en 1973. Il est constitué par un bâtiment situé au dessus d'une dalle au niveau 12.88NGM reposant sur des piles circulaires en béton armé de 1.80m de diamètre fondées en mer sur le toit du rocher. Elles ont été, depuis leur construction, directement soumises aux agressions mécaniques et physico-chimiques liées au milieu marin : tempêtes, embruns, etc. Ces piles présentaient en 2005 un état de dégradation très avancé : éclats de béton, fissures épaufures, et l'on pouvait observer des traces de produits de corrosion sur les parements.

Le travail d'auscultation avait montré que les aciers en partie supérieure des piles ne présentaient pas de problèmes de corrosion généralisée. En effet, ces zones caractérisées par une résistivité de béton relativement élevée ont su préserver la majorité des aciers. Néanmoins, un pourcentage de chlorures assez élevé a été identifié au droit des armatures.

Pour diminuer les risques de corrosion dans cette zone, un traitement temporaire visant à réduire les polluants était nécessaire et suffisant puisque les piles entre les niveaux 7m30 et 10m95 feront partie du Musée de la Marine dont l'hygrométrie ambiante sera contrôlée. De plus, les risques de remontés capillaires de chlorures sont très peu probables à cette hauteur de pile.

En conséquence, en plus des travaux de réparation traditionnelle de ragréage et afin d'éviter les problèmes de piles induites, il fut nécessaire de diminuer le taux de chlorures. Un traitement de réalkalinisation/déchloruration « Foreva Regebeton » a été mis en œuvre pendant 21 jours pour homogénéiser l'état électrochimique de l'interface acier/béton.

Les parties inférieures de l'ouvrage correspondant auparavant à des zones d'éclaboussures et de marnage présentaient de nombreuses dégradations. Ces zones fortement aérées et humides présentaient de fortes teneurs en chlorures, ce milieu très agressif a induit une corrosion avancée des aciers malgré la qualité du béton d'enrobage.

Ces surfaces de piles seront protégées de l'atmosphère marine puisqu'ils seront intégrées aux bâtiments Yacht Club et Ecole de voile. Néanmoins, les aciers en bas des piles resteront toujours exposés à l'eau de mer dont les polluants peuvent remonter par capillarité à travers les fondations.

La stratégie de réparation a donc consisté en l'hydrodémolition du béton d'enrobage jusqu'à 7 mètre 30 de hauteur puis en la reconstitution des piles à l'identique.

Pour garantir une protection pérenne des aciers susceptibles d'être endommagés par apport d'humidité et de chlorures, une protection cathodique par courant imposé a été installée lors des travaux de réparations (remplacement des armatures corrodées et béton projeté).

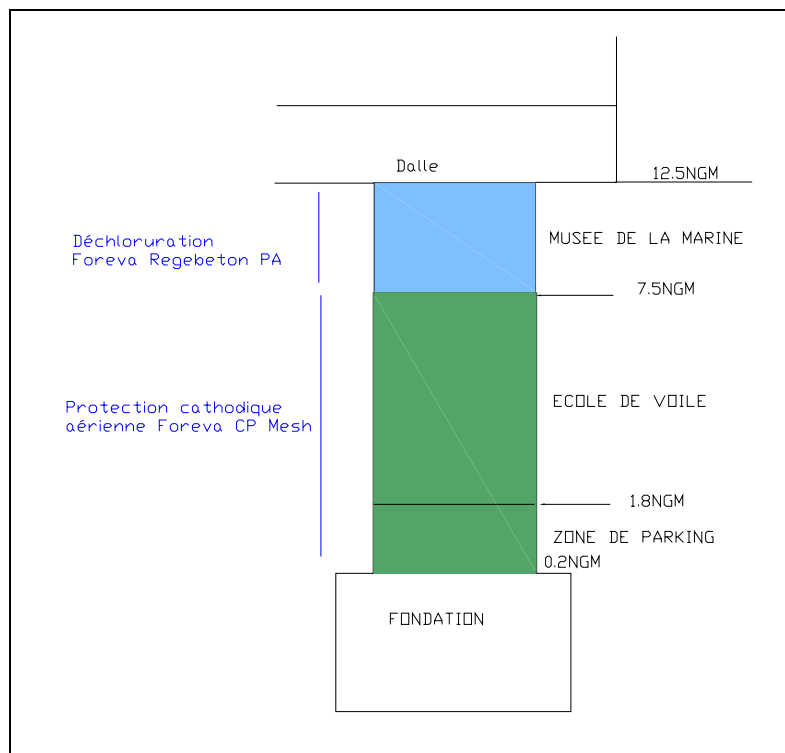


Figure 3 : Schéma des zones de réparation et de protection

3. DIFFICULTÉS LORS DE LA CONCEPTION DU SYSTÈME DE PROTECTION CATHODIQUE

La conception d'un système de protection cathodique nécessite un équilibre parfait entre les besoins techniques et économiques. En effet, pour une même pile, le maillage en zones de protection est principalement lié à la disparité de la résistivité du béton. Une distribution homogène du courant cathodique implique la multiplication des zones de protection. Or, en multipliant les zones, on croît le nombre de connexions, d'alimentation et de contrôles. Ceci implique une augmentation considérable des quantités de matériaux (cuivre) ainsi que les temps d'installations.

Les piles du Monte Carlo Star ont été scindées en deux zones de protection : une zone inférieure sur 3m de hauteur, considérée comme une partie d'ouvrage au contact de l'eau, et une zone supérieure dimensionnée selon les exigences d'une PC de béton aérien résistif nécessitant un courant de protection maximum de 20mA/m² d'acier.

3.1. Installation du système

L'ensemble des connexions et des capteurs pour l'injection et le contrôle du courant, étant noyés dans le béton, l'installation de la protection cathodique est ponctuée par de nombreux contrôles électriques.

3.3.1. La continuité électrique des aciers

Une première étape consiste à vérifier la continuité électrique du premier lit d'armatures à l'aide d'un ohmmètre de très haute impédance. La continuité électrique est primordiale car elle permet de s'assurer que le courant injecté circule le long de tous les aciers du premier lit d'armatures. On admet que deux armatures sont en continuité électrique si la différence ohmique entre ces deux armatures est inférieure à 10Ω.

Dans le cas des piles du Monte Carlo Star, en zone de protection cathodique, l'hydrodémolition du béton d'enrobage a rendu cette tâche plus facile, puisque tous les aciers ont été mis à nu, le contrôle a concerné une grande majorité des aciers. En ce qui concerne la partie haute, le traitement d'extraction nécessite également ce contrôle. Dans ce cas, la continuité a été vérifiée simplement entre les différents points de connexion aux armatures. Le cas échéant on augmente le nombre de ces points.

Ce contrôle au multimètre est également réalisé après chaque connexion aux électrodes (cathode=acier et anode=treillis titane) pour la vérification des soudures et des câbles électriques. Toutes les valeurs de contrôles sont systématiquement consignées par les opérateurs sur des fiches de contrôle de l'installation.

La surveillance et le pilotage du système sont réalisés à l'aide des électrodes de référence argent /chlorure d'argent. Celles-ci sont préalablement préparées et posées au droit des armatures, elles permettent de suivre le potentiel des armatures. Chaque zone de protection compte une ou plusieurs électrodes. Le potentiel d'armature par rapport à chaque électrode est enregistré. Ces valeurs représentent un état électrochimique initial des aciers.

3.3.2. Installation de l'anode « inerte »

Le pôle cathodique étant établi et les capteurs installés, une première phase de béton projeté par voie sèche est appliqué. Après la prise du béton, l'anode sous forme de treillis titane est déployée et fixée à la surface du béton, les connexions nécessaires au raccordement au pôle positif du système sont alors soudées.

Chaque câble étant contrôlé, clairement identifié et protégé, une deuxième phase de béton projeté est réalisé. Cette opération est très délicate car il ne faut absolument pas endommager les gaines isolantes des câbles. Tout au long de cette phase, un travail en binôme est réalisé entre le « porte lance » et le technicien, ce dernier effectue des contrôles de court-circuit entre cathode et anode au moyen d'un multimètre à haute impédance d'entrée. Aucun court circuit ne peut être toléré.

Une fois les tests réalisés, les câbles en attente sont alors raccordés au dispositif électrique et de surveillance pour la mise en route du système. 28 jours plus tard, le courant de protection est alors injecté progressivement, la protection cathodique est alors sous contrôle. Une première évaluation de son efficacité est réalisé après un mois de mise sous tension par un test de dépolarisation sur 24H conformément à la norme NF EN 12696.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Afin d'évaluer l'efficacité du traitement Regebeton, plusieurs sondages ont été réalisés avant et après traitement pour des analyses de chlorures. Les poudres de béton prélevées au droit des armatures ont été analysées par le laboratoire du CEBTP.

Ces opérations ont été difficiles à mener. En effet, l'importante épaisseur d'enrobage (jusqu'à 17 cm par endroit) à rendu la détection et la localisation en profondeur d'armatures, par les appareils de mesure traditionnels, très difficile.

La synthèse des résultats d'analyses a permis d'évaluer le pourcentage d'extraction de chlorures.

Malgré les variations d'épaisseur d'enrobage de béton, l'ensemble des pourcentages d'extraction montrent le bon fonctionnement du traitement de déchloruration Regebeton Cl⁻ et son efficacité. En effet, ces pourcentages varient entre 40 et 97%, ils placent la majorité des résultats de sondage en dessous des 0.4% / poids de ciment admissibles. Le traitement opère généralement de façon efficace au niveau des 10mm autour des armatures où la concentration en ions hydroxydes augmente. Cependant, une minorité de sondages ont révélé une concentration de chlorures à 20mm des aciers. La purge de ces zones a donc été décidée.

Par ailleurs, des mesures de potentiel acier/béton par rapport à une électrode de référence portative cuivre-sulfate de cuivre (ECS) ont été réalisées avant et après traitement d'extraction de chlorures sur une majorité des piles.

Les potentiels électrochimiques relevés après une totale dépolarisation (7 jours en moyenne) sont d'un point de vue absolu moins électronégatifs que les potentiels relevés avant traitement. Pour l'ensemble des zones traitées, les valeurs de potentiel varient en moyenne entre -200mV/ECS et -350 mV/ECS. D'un point de vue thermodynamique, ces potentiels correspondent à des potentiels d'aciers passifs, la probabilité de corrosion des aciers de ces piles est faible même si elle est légèrement supérieure pour les potentiels acier/béton les plus électronégatifs.

Les valeurs de potentiel et notamment l'absence de gradients de potentiel indiquent d'une part, une parfaite polarisation des aciers grâce au traitement Régébeton®, la polarisation des aciers a induit une bonne alcalinisation du milieu environnant les aciers (milieu alcalin favorisant la passivation des aciers) et une faible teneur en chlorures au droit des armatures (potentiels d'aciers corrodés par les chlorures sont compris en général entre -400mV/ECS et -650mV/ECS). D'autre part, une cartographie homogène sans gradient indique surtout après traitement la suppression des macros-piles de corrosion.

En protection cathodique, les résultats des tests de dépolarisation après 1 mois de mise sous tension montrent que sous une densité de courant de protection de 12 à 17 mA /m² d'acier, les aciers sont suffisamment protégés. En effet, les valeurs de dépolarisation sont supérieures à 200mV. En conséquence, le courant de protection a été diminué de façon à obtenir une dépolarisation maximum de 150mV.

Les valeurs de potentiel d'aciers par rapport aux électrodes de références permanentes sont homogènes.

5. CONCLUSION

L'ouvrage du Monte Carlo Star donne un exemple tangible de la possibilité d'extraction de chlorures à des profondeurs de béton relativement importantes puisque les zones traitées atteignent 17 cm d'épaisseur d'enrobage du béton avant d'atteindre les aciers de renforcement.

D'autre part la protection cathodique mise en place montre que l'on peut protéger de façon durable les armatures du béton armé en imposant un courant dont la densité bien répartie n'excède pas une consommation de 50kW/an.

La mise en œuvre de la protection cathodique par courant imposé est relativement simple à mettre en œuvre dès lors que la préparation et les méthodes d'exécution ont été réalisées avec soin. Cette solution constitue le principal moyen de protection des armatures du béton.

Pour régénérer les bétons carbonatés et/ou chlorurés une solution de cure électrochimique comme Régébeton® permet d'extraire les chlorures libres et de ré alcaliniser le béton en fonctionnant sous courant imposé ou en mode galvanique.