

Prolongation de la durée de vie des anodes de zinc projetées thermiquement pour la protection contre la corrosion de constructions en béton armé grâce à l'utilisation de top-coats organiques.

Jochen Priestersbach, Armin Melzer, Jürgen Wisniewski, Andrea Winkels
Grillo-Werke AG, Duisburg /D

Michael Knepper
OSU Maschinenbau GmbH, Duisburg/D

Résumé

Les dommages structurels causés par la corrosion sur les constructions en béton sont nombreux et demandent un vaste travail de réparation. Pour certains édifices en béton armé situés dans des endroits aux conditions peu favorables, il est indispensable d'installer en supplément un système de protection actif contre la corrosion. Les revêtements projetés thermiquement servant d'anodes ont été adaptés pour la protection cathodique de l'acier. On a prêté une attention toute particulière à ces systèmes car ils présentent l'avantage d'augmenter l'efficacité tout en réduisant les coûts. Les revêtements de zinc projetés thermiquement sont appliqués à de nouvelles constructions en béton armé ou à celles sujettes à une réhabilitation. Dans ce contexte, on analyse la capacité de différents systèmes en faisant des essais sur site en environnement maritime du golfe Arabique ou dans divers laboratoires dans des conditions naturelles et accélérées.

Introduction

Ces vingt dernières années, d'importants progrès ont été faits dans le développement de systèmes de protection cathodique par anode sacrificielle pour réduire la corrosion de l'acier du béton armé. La protection contre la corrosion de l'acier des constructions en béton armé est habituellement assurée par l'alcalinité de l'électrolyte situé dans les pores du béton ($\text{pH} > 12,5$). Ce niveau de pH entraîne la passivation de la surface d'acier qui empêche la corrosion de l'acier. Des conditions environnementales défavorables ou des déficiences dans l'exécution sont souvent la cause des dommages entraînés par la corrosion qui, dans de nombreux cas, demandent d'importants travaux de reconstruction et de réparation dans le monde entier.

La dégradation de la couverture de béton dans les constructions en béton armé provient du fait que les produits de la corrosion de l'acier prennent cinq fois plus de volume que

l'acier. Différents paramètres environnementaux (température, humidité) ainsi que des paramètres technologiques (type de ciment, proportion de ciment et eau, additifs) exercent une influence décisive sur la durabilité de la passivation de l'acier [1-3]. Les raisons de la corrosion dans le béton sont la carbonation et la contamination par les chlorures (dépassant la teneur en chlorure critique). La corrosion de l'acier dans le béton armé qui est due à la pénétration d'ions de chlorure provenant de l'eau de mer affecte de nombreuses constructions situées dans un environnement maritime. Il en est de même pour les édifices se trouvant dans les terres qui sont affectés par l'utilisation accrue de chlorure selon la saison (ex. l'application de sel pour dégivrer en hiver).

Protection active contre la corrosion

Dans le cas d'une protection active contre la corrosion, comme la protection cathodique contre la corrosion, la surface à protéger reste complètement ou partiellement exposée au milieu agressif ; il y a cependant une intervention active dans le processus de corrosion. Des électrons provenant d'un métal de base, l'anode sacrificielle galvanique, sont offerts à l'acier afin de le protéger. Ceci est réalisé en reliant l'anode sacrificielle et les barres d'acier au moyen d'un matériau conducteur d'électrons. Le circuit électrique est ainsi fermé grâce à l'électrolyte situé à l'intérieur du béton. Ainsi, une circulation de courant est réalisée: les ions négatifs, ex. chlorure et hydroxyde, migrent vers l'anode – donc s'éloignent de l'acier. L'application de systèmes d'anode galvanique demande une circulation de courant minimum entre l'acier et l'anode.

Dans les systèmes de protection cathodique contre la corrosion qui fonctionnent avec un courant imposé, les électrons devant protéger l'acier proviennent du pôle négatif d'un approvisionnement de courant direct. Des treillis en titane sont surtout utilisés comme anode qui doit être immergée dans une fraîche couche de béton projeté. Les coûts de matériel élevés (titane) et la nécessité d'immerger le treillis de titane ont conduit au développement d'anodes de zinc projetées sur la surface de béton. L'anode de zinc est capable de servir d'anode non seulement dans les systèmes de courant imposé mais aussi dans les systèmes galvaniques.

Revêtements de zinc projetés thermiquement en tant qu'anodes

Les systèmes de protection cathodique galvanique (GCP) qui utilisent des anodes sacrificielles présentent des avantages reconnus tels que la simplicité et la fiabilité et sont depuis peu disponibles en tant qu'alternative viable aux systèmes CP de courant imposé

(ICCP) [4]. Contrairement aux ICCP, les systèmes galvaniques GCP ne demandent pas d'importantes installations ou de câbles électriques ou d'approvisionnement en énergie.

Les anodes de zinc projetées thermiquement ont d'abord été étudiées pour une utilisation sur le béton aux USA en 1983 [5]. En principe, le revêtement de zinc projeté peut être appliqué pour trois différents systèmes de protection cathodique contre la corrosion:

1. Comme système cathodique galvanique de protection (GCP) avec des revêtements de zinc projetés pour les travaux de réparation sans rebétonnage. Avec ce système, les excavations du béton dans lesquelles l'acier est partiellement découvert ne sont pas remplies de mortier de réparation et la surface de béton initiale n'est pas restaurée. Avec cette méthode, la couche de zinc est directement projetée sur l'acier exposé et sur les surfaces de béton.
2. Comme système cathodique galvanique de protection (GCP) avec des revêtements de zinc projetés avec rebétonnage. Avec ce système, l'application du revêtement de zinc est possible quand il n'y a pas eu de dégradations du béton ou que celles-ci ont été réparées. Cette variante permet de mesurer le courant entre les électrodes. Une régulation du courant sera aussi possible grâce à un arrangement de résistances. Cette variante permet l'option de réajustement avec approvisionnement en courant supplémentaire de telle sorte que les installations de ce type peuvent aussi fonctionner en tant que système de courant imposé.
3. Comme système CP de courant imposé (ICCP) avec des revêtements de zinc projetés. Avec ce système, un rebétonnage est tout d'abord nécessaire. L'effet de protection cathodique contre la corrosion ne vient pas de la différence de potentiel entre l'anode de zinc et l'acier protégé mais de l'alimentation d'un potentiel électrique grâce à un approvisionnement en énergie mis en place de manière appropriée.

Le tableau 1 compare les grandes différences qui existent entre les trois systèmes nommés ci-dessus. La figure 1 compare l'application de l'anode de zinc projetée opérant dans un système galvanique et dans un système de courant imposé.

	Galvanique sans rebétonnage	Galvanique avec rebétonnage	Courant imposé
Rebétonnage nécessaire	non	oui	oui
Courant mesurable	non	oui	oui
Capacité de protection	non	oui	oui
Courant ajustable	non	sous condition	oui
Courant externe réajustable	non	oui	oui
Installation dans un environnement sec	non	non	oui
Installation dans un environnement humide	yes	oui	possible, si nécessaire

Tableau 1: Caractéristiques de différents concepts de protection cathodique contre la corrosion [6]

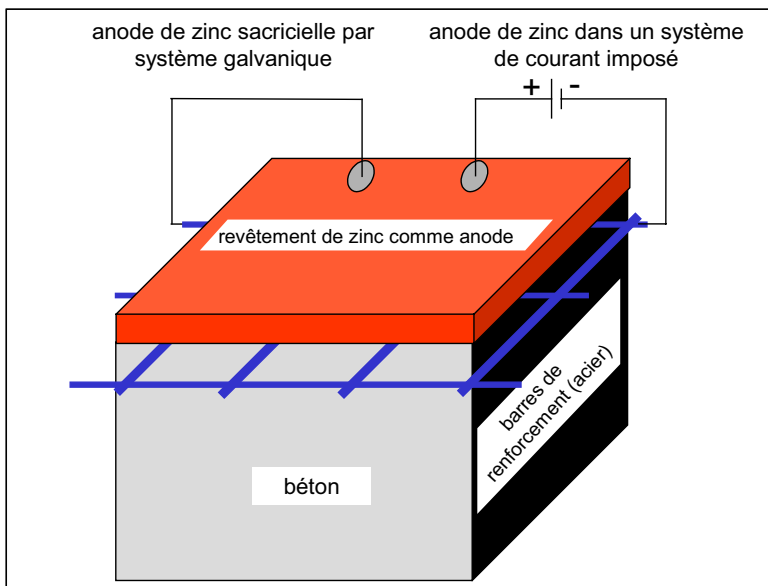


Figure 1: Système de protection active contre la corrosion: galvanique / courant imposé

En principe, un examen doit être fait pour chaque application afin de savoir si un approvisionnement externe en énergie est nécessaire. Les conditions optimales pour l'opération sans courant imposé sont réunies dans les endroits qui ne connaissent pas de longues périodes de sécheresse telles que les régions côtières ou tropicales.

Projection thermique de zinc sur le béton en tant qu'anode

Les revêtements de zinc projetés thermiquement ou les alliages de zinc peuvent être obtenus alternativement par des techniques généralement connues sous les noms de projection à flamme (acétylène-oxygène ou propane-oxygène) et projection à l'arc électrique. Lors du processus de projection à l'arc (figure 2) deux fils servant d'électrodes sont introduits ensemble dans un pistolet. Un arc se forme entre les deux fils qui fait fondre les bouts du fil. Les gouttelettes fondues sont ultérieurement accélérées avec un gaz atomisant en direction du substrat. Au contact de la surface du substrat, les gouttelettes se solidifient et adhèrent à la fois au substrat et l'une à l'autre, formant ainsi un revêtement [7].

Un mélange gazeux acétylène-oxygène est principalement utilisé pour la technique à la flamme (figure 3) afin de fondre le bout du fil qui y est introduit. Les gouttelettes fondues individuellement sont ensuite accélérées avec un gaz atomisant en direction de la surface du substrat.

Aujourd'hui, on porte une plus grande attention sur la projection à l'arc pour le traitement du zinc car elle offre les avantages de rendement et de coût moindre. En général, l'équipement pour la projection à l'arc est plus onéreux que pour la projection à flamme. Cependant, les coûts d'investissement plus élevés du système de projection à l'arc (8) peuvent être rentabilisés rapidement grâce à un rendement plus élevé et à un coût d'exploitation plus faible.

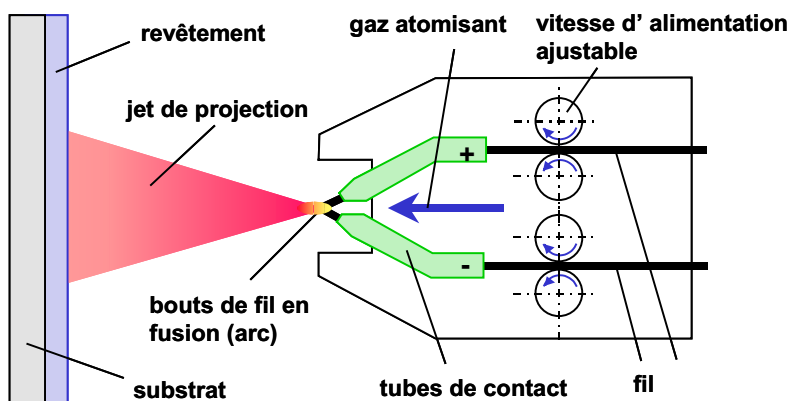


Figure 2: Projection du fil à l'arc selon la norme EN 657

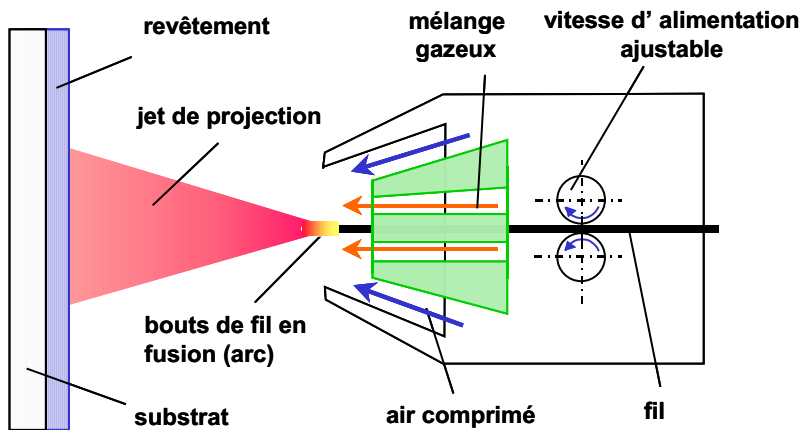


Figure 3: Projection du fil par flamme selon la norme EN 657

La surface de béton doit être pré-traitée avant qu'une anode de zinc ne puisse être appliquée. La surface doit aussi être nettoyée et rendue rugueuse afin de garantir l'adhérence des couches. De plus, la surface est chauffée juste avant la projection du zinc afin d'éliminer toute humidité existante de la zone de la couche en surface, humidité qui diminuerait l'adhérence. L'application du revêtement de zinc projeté est réalisée en plusieurs couches. Un revêtement relié mécaniquement et électriquement est généré avec une adhérence suffisante à la surface du béton. L'épaisseur du revêtement de l'anode de zinc est variable et se situe généralement entre 300 et 500 μm . L'adhérence du revêtement de zinc varie normalement entre 1.5 et 3.5 MPa. Des méthodes et des appareils de mesure spéciaux permettent de vérifier la stabilité mécanique du revêtement de zinc sur le béton.

Des études menées aux USA ont montré que la durée de fonctionnement d'une anode de zinc projetée thermiquement peut aller jusqu'à 20 ans si les paramètres sont choisis correctement et après une analyse correcte de la structure et des conditions environnementales [9].

Prolongation de la durée de vie en utilisant des top-coats organiques

La durée de vie du revêtement de zinc peut être prolongée si un revêtement organique est appliqué au revêtement de zinc projeté à l'arc (figure 4). Ce système est applicable aux constructions en béton et a été développé et mis au point par GRILLO en 1997 pour des conditions environnementales agressives.

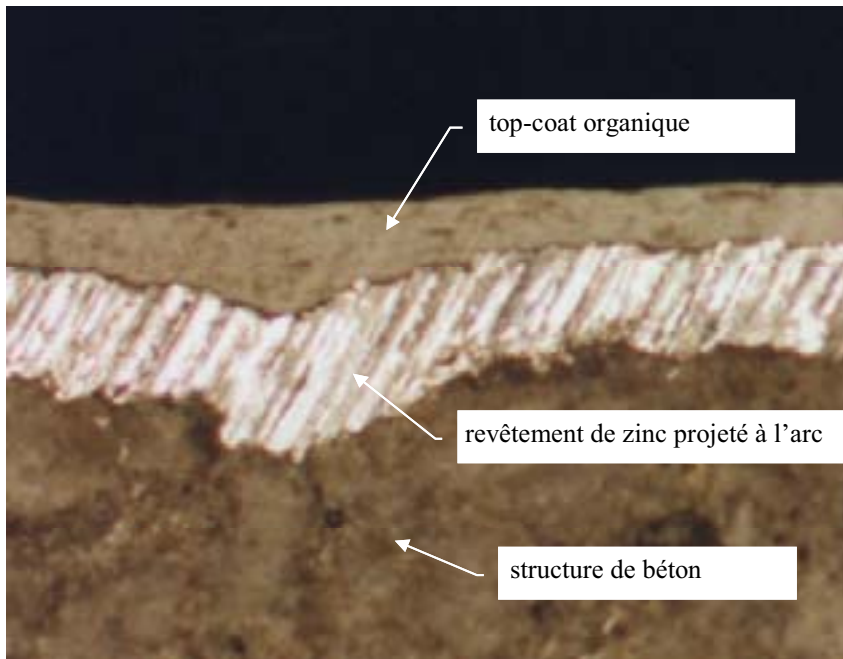


Figure 4: Revêtement de zinc projeté à l'arc avec un top-coat organique

L'avantage du top-coat organique est que le revêtement de zinc n'est pas en contact direct avec l'atmosphère et qu'il n'est donc lui-même plus sujet à la corrosion. Donc, la consommation de zinc a seulement lieu au niveau de l'interface du revêtement de zinc et du béton. On a calculé que cette consommation de zinc peut être réduite de 50 % (figure 5). La durée de vie de l'anode de zinc projetée peut se calculer selon la 2ème loi de Faraday.

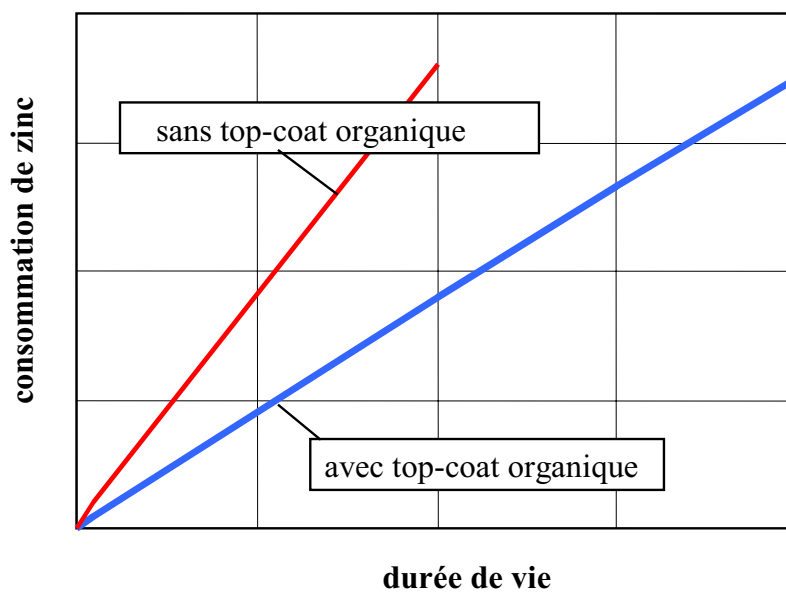


Figure 5: Schéma de la prolongation de la durée de vie grâce au top-coat organique

Lors des tests de laboratoires, plusieurs combinaisons de revêtements de zinc projetés et de top-coats organiques ont été évaluées afin de déterminer la meilleure configuration de système pour le matériel de l'anode. On a principalement travaillé sur l'adhérence de ce système sur le béton et sur son comportement en tant qu'anodes. Tous les systèmes ont été testés dans des conditions accélérées, par ex. lors du test de brouillard salin. On a observé qu'il est extrêmement important de faire le bon choix de top-coat organique pour l'adhérence du système et son comportement en tant que matériel anodique. A la suite de ce travail, plusieurs spécimens de béton ont été revêtus et exposés à l'atmosphère (figure 6). Pour simuler des conditions maritimes, ces blocs de béton ont été contaminés au NaCl. Depuis le début de l'installation, des mesures permanentes de potentiel statique et de courant ont été faites et les courbes de dépolarisation ont été déterminées. La figure 7 montre la courbe de dépolarisation d'un spécimen de béton revêtu de zinc projeté avec un top-coat organique. Cette mesure instant-off a été prise après six mois d'installation et illustre le potentiel Decay après séparation des barres d'acier et du revêtement de zinc. Le potentiel Decay est un critère pour la qualité de la protection cathodique. Habituellement, le "critère 100 mV" doit être rempli (potentiel Decay > 100 mV pendant les quatre premières heures après la séparation des barres d'acier et de l'anode de zinc). Comme le montre la figure 7, le critère 100 mV a déjà été rempli après une heure, ce qui indique le bon fonctionnement du système GCP.



Figure 6: Spécimen de béton revêtu de zinc projeté avec en plus un top-coat organique

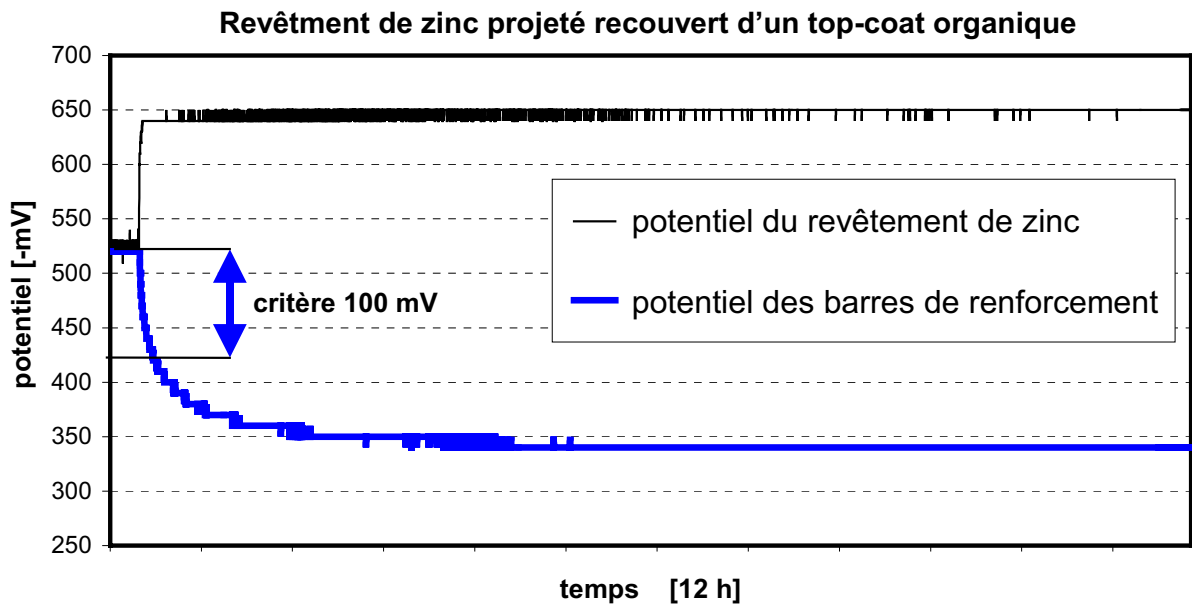


Figure 7: Courbe de dépolarisation d'un spécimen de béton revêtu de zinc projeté et d'un top-coat organique (mesure instant-off)

Système CP de zinc projeté thermiquement dans le golfe Arabique

GRILLO a appliqué un système cathodique galvanique de protection utilisant des anodes de zinc projetées à l'arc à des constructions en béton armé situées dans l'environnement maritime d'un port du golfe Arabique. Les constructions présentaient de sévères signes de corrosion. Elles ont été réparées fin 1997 et protégées contre la corrosion grâce à l'installation d'un système galvanique d'anodes de zinc projetées à l'arc. De plus, on a appliqué un top-coat organique au revêtement de zinc projeté à l'arc. Le travail de réparation suivant a été effectué sur chaque construction :

- on enlève le béton contaminé par les chlorures
- nettoyage des barres de renforcement corrodées
- installation de cellules de référence et de contacts électriques
- rebétonnage de la construction béton
- projection à l'arc de l'anode de zinc
- application du top-coat organique

On a installé un système de contrôle afin de garantir et de vérifier le bon fonctionnement du système de protection contre la corrosion mis en place. Des électrodes de référence de dioxyde de manganèse ont été installées pour des mesures de potentiels. On a déterminé

des potentiels statiques en utilisant le système de contrôle. La figure 8 montre une des constructions protégées galvaniquement un an et demi après l'installation du système CP.



Figure 8: Construction en béton dans le golfe Arabique un an et demi après réparation (1999)

Plus d'un an et demi après l'installation du système de protection contre la corrosion, on n'observe aucun signe de corrosion des barres de renforcement en acier. Les données recueillies par le système de contrôle depuis l'installation démontrent que les barres de renforcement en acier sont bien protégées contre la corrosion grâce au système de protection contre la corrosion mis en place. Les valeurs obtenues concernant les mesures du potentiel statique indiquent qu'il n'y a aucun signe de corrosion. Tous les potentiels mesurés en avril 1999 sont supérieurs à -520 mV (figure 9). On s'attend à une possible attaque de corrosion au plus tôt pour des potentiels inférieurs à -800 mV mesurés en fonction de l'électrode de référence de dioxyde de manganèse. Les déviations insignifiantes des potentiels statiques qui surviennent avec le temps sont le résultat de l'influence du climat et ne doivent pas être considérées comme critiques. Si l'on considère les courbes des potentiels statiques mesurés à six endroits différents de la construction, on observe une stabilisation des valeurs de potentiel.

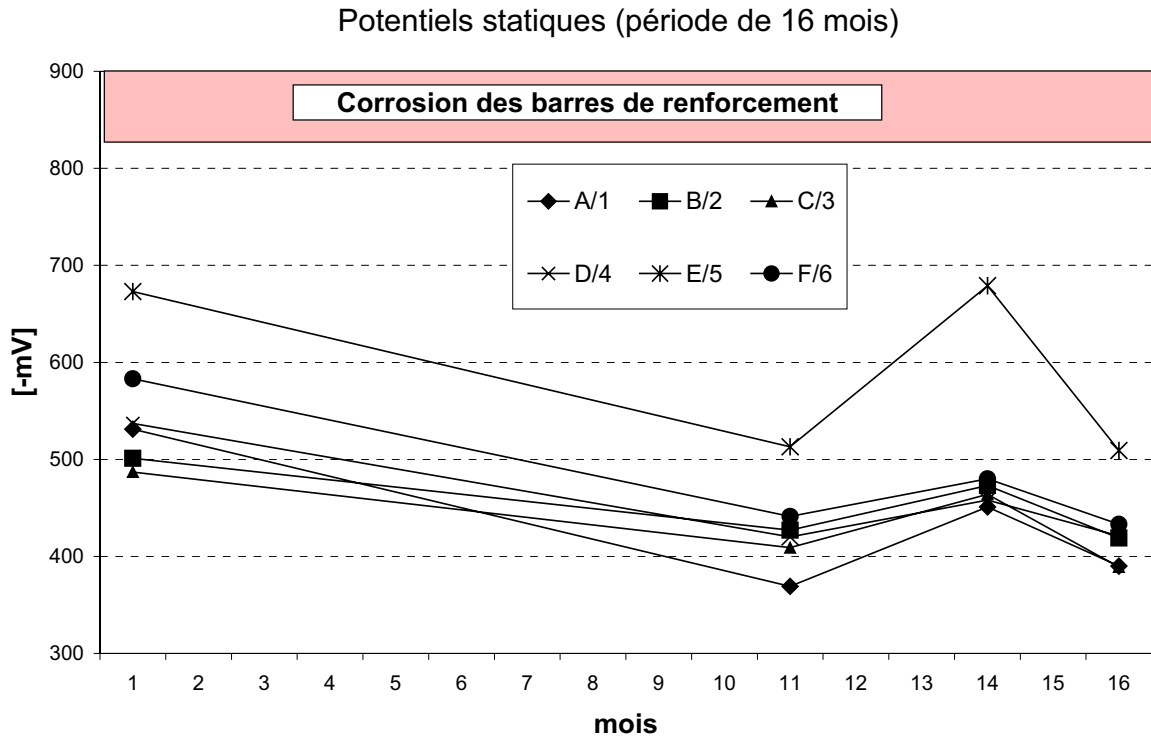


Figure 9: Potentiels statiques mesurés à six endroits différents de la construction en fonction d'une électrode de référence de dioxyde de manganèse.

Conclusions

Contrairement à d'autres variantes de protection cathodique contre la corrosion du béton, les revêtements de zinc projetés ne présentent pas de limitations particulières pour ce qui concerne leur applicabilité : ils conviennent pratiquement toujours quand il s'agit de protéger des éléments structurels par protection cathodique. La protection galvanique contre la corrosion avec des revêtements de zinc projetés présente de gros avantages sur les autres variantes de protection cathodique contre la corrosion du béton : un rebétonnage des surfaces en béton n'est pas absolument nécessaire et aucune installation électrique ne doit être mise en place, si ce n'est pour les endroits de contrôle.

Les anodes de zinc projetées thermiquement peuvent être renouvelées très facilement après consommation. Même si l'on retire complètement le revêtement de zinc, l'anode peut être remplacée facilement en projetant un nouveau revêtement de zinc sur la surface de béton.

La durée de fonctionnement d'une anode de zinc projetée thermiquement est de vingt ans et plus si les paramètres sont choisis correctement et après une analyse approfondie de la

construction et des conditions environnementales. Si l'on applique un top-coat organique au revêtement de zinc projeté, la durée de vie peut être considérablement augmentée.

Bibliographie

- [1] Schießl, P., RILEM; Technical Committee 60-CSC: Corrosion of Steel in Concrete. New York: Chapman and Hall, 1988 (RILEM Report)
- [2] Nürnberger, U., Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Bauverlag (1995), Wiesbaden; Berlin, ISBN: 3-7625-3199-4
- [3] Raupach, M., Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton, in: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1992), Nr. 433, Beuth-Verlag, Berlin
- [4] Bennett, J, Galvanic Cathodic Protection of Reinforced Concrete Using Surface-Applied Zinc Anodes, in: Proceedings of ICCRCS, Orlando, Florida, 1998, Publication No. FHWA-SA-99-014
- [5] Tinnea, J.S., Field Performance of Sprayed Zinc Cathodic Protection Anodes, in: (ed: C. Coddet) Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference 1998
- [6] Priestersbach, J., Knepper, M., Gamroth, M., Zinkschichten zum Korrosionsschutz von Stahlbetonbauwerken, in: Erzmetall 51 (1998) Nr. 4, 291-298
- [7] Knepper, M. Priestersbach J., How to successfully battle corrosion: Thermally sprayed coatings of zinc and zinc alloys, in: Proceedings of the ITSC Shanghai 1997 (Nov 18-21, 1997): Surface Engineering Towards The 21st; Century Editor: X. Binishi et. Al, China Machine Press, Beijing 1997, pp. 384-391
- [8] Porter F., Corrosion Resistance of Zinc and Zinc Alloys, Marcel Dekker inc., New York 1994
- [9] Sagüés, A., Powers R.: SHRP-S-337: Sprayed Zinc Galvanic Anodes for Concrete Marine Bridge Substructures, 1993 (Strategic Highway Research Program, Washington)