Cerema

Protection cathodique du béton armé

Retour d'expérience

Collection | **Connaissances**

Protection cathodique du béton armé
Retour d'expérience

Collection | **Connaissances**

Édition Cerema
Cerema Eau, mer et fleuves – 134, rue de Beauvais – CS 60039 – 60280 Margny-Lès-Compiègne Tél : +33(0)3 44 92 60 00
Siège social : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30

Sommaire

1 Généralités 5
1.1 Corrosion des armatures du béton armé en environnement maritime 5
1.1.1 Principe 5
1.1.2 Carbonatation du béton 6
1.1.3 Pénétration des ions chlorure 7
1.2 Pratiques actuelles de réhabilitation des ouvrages en béton soumis au processus de corrosion 8
1.2.1 Réhabilitations « traditionnelles » 9
1.2.2 Réhabilitations « superficielles » 10
1.2.3 Réhabilitations « électrochimiques » 12

2 Protection cathodique du béton armé 14
2.1 Principe de la protection cathodique 14
2.1.1 Introduction 14
2.1.2 Protection cathodique par courant imposé 14
2.1.3 Protection cathodique par courant galvanique 15
2.1.4 Normalisation 16
2.1.5 Conception/Dimensionnement 17
2.1.6 Installation et mise en œuvre 18
2.1.7 Suivi du système de protection 18
2.1.8 Types d'anodes 19
2.2 Utilisation de la protection cathodique en environnement maritime 20
2.2.1 À travers le monde 20
2.2.2 En France 31
2.3 Retour d'expérience sur l'utilisation de la protection cathodique en environnement maritime 32
2.3.1 Avantages 32
2.3.2 Inconvénients 33
2.3.3 Causes de non fonctionnement 34
2.3.4 Points de vigilance 35
2.3.5 Cas particulier des ouvrages précontraints 37

3 Recommandations relatives à l'utilisation de la protection cathodique 38
3.1 Choix du type de protection cathodique 38
3.2 Suivi 39
3.3 Qualité de réalisation de la Protection Cathodique (PC) 39
3.4 Perspectives 40

Bibliographie 41

Index 47

1 Généralités

1.1 Corrosion des armatures du béton armé en environnement maritime

1.1.1 Principe

La corrosion des armatures est la principale cause de dégradation des structures en béton armé et la plus importante en termes de coûts de réparation. Dans des conditions normales, le pH d'un béton sain étant de l'ordre de 13 à 13,5, les armatures en acier enrobées de béton sont protégées de la corrosion par un phénomène de passivation résultant de la création, à la surface du métal, de la pellicule de ferrite Fe_2O_3 ou de $Fe(OH)_3$.

Le diagramme de Pourbaix pour le système $Fe - H_2O$ explique ce phénomène, figure 1. Trois domaines thermodynamiques y sont représentés, selon le potentiel électrochimique de l'acier et le pH environnant :

— immunité ;
— corrosion avec la formation d'ions Fe^{2+} ;
— passivation avec la formation d'un film passif de $Fe(OH)_3$ ou Fe_2O_3.

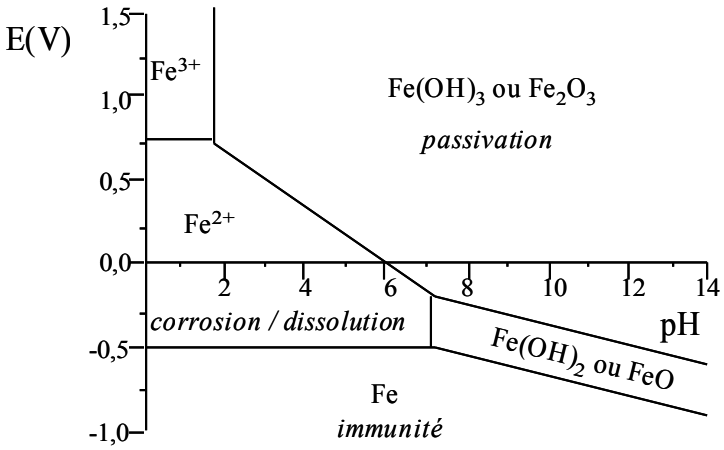

FIGURE 1 – Diagramme potentiel-pH simplifié du fer à 25°C, en solution aqueuse, pour une concentration molaire d'ions Fe^{2+} de 10^{-2} mol/l

Lorsque le béton se carbonate, son pH, initialement voisin de 13, peut devenir égal à 9 et l'armature peut alors se corroder.

En 1982, Tuutti [1] propose un graphique représentant la corrosion en fonction du temps, en deux phases (figure 2).

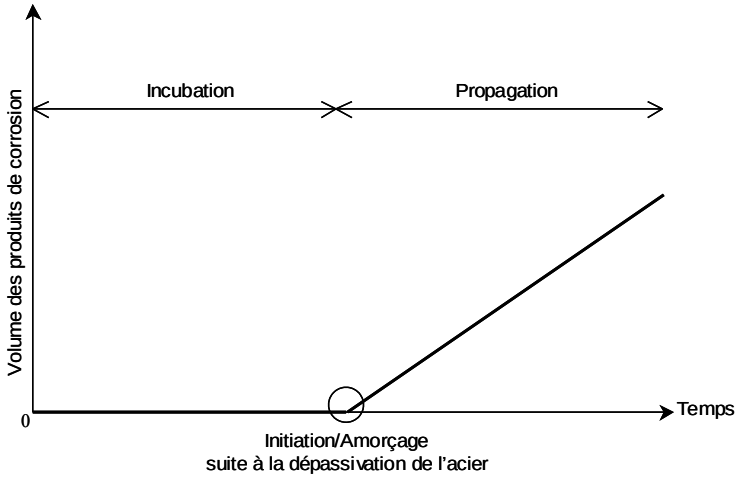

FIGURE 2 – Schéma des étapes de la corrosion (Tuutti [1])

La première phase, correspondant à l'incubation de la corrosion, précède la dépassivation de l'acier. Durant cette phase, il y a pénétration des agents agressifs dans l'enrobage (CO_2, Cl^-). La dépassivation de l'acier va par la suite initier la corrosion. On entre alors dans la seconde phase qui correspond à la propagation de la corrosion avec une augmentation du volume des produits de corrosion.

Deux causes peuvent expliquer l'amorçage de la corrosion [2] :

— la carbonatation du béton d'enrobage ;
— la présence d'ions chlorure.

1.1.2 Carbonatation du béton

Il résulte de la carbonatation des bétons un risque de corrosion généralisée caractérisé par l'existence de plusieurs processus électrochimiques élémentaires [3].

Le dioxyde de carbone provenant de l'air pénètre sous forme gazeuse dans le béton et au contact de l'eau, il va provoquer une réaction chimique avec la pâte de ciment hydratée, dite de carbonatation [4] :

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O$$

La réaction du dioxyde de carbone avec la portlandite est la plus rapide, toutefois, les autres composés hydratés vont également réagir avec le CO_2 (aluminates et silicates de calcium) [2].

La réaction de carbonatation va diminuer le pH de la solution interstitielle du béton jusqu'aux environs de 9 [4], ce qui d'après le diagramme de Pourbaix (avec une concentration molaire d'ions Fe^{2+} de 10^{-6} mol/l) va amener l'acier à être dans une zone à risque. Ceci signifie que si ce béton (pH 9) est au contact d'acier, ce dernier corrodera. Ainsi pour que la corrosion s'amorce, il faut que le front de carbonatation atteigne le premier lit d'armatures.

Avec le temps, la vitesse de progression du front de carbonatation va diminuer. En effet, la porosité va se colmater en partie avec la formation des carbonates de calcium. Un autre facteur prépondérant correspond à l'humidité relative [2] [4]. Le coefficient de diffusion du dioxyde de carbone dans l'air est 10 000 fois plus élevé que dans l'eau. La carbonatation est donc à son maximum quand l'humidité relative est suffisamment faible pour qu'une phase aqueuse connectée soit présente et permette la diffusion du gaz carbonique et quand l'humidité relative est suffisamment importante pour que la réaction de carbonatation, qui se produit en phase aqueuse, ait lieu [4]. C'est pourquoi, en milieu marin, le phénomène de carbonatation est généralement faible.

1.1.3 Pénétration des ions chlorure

Contrairement à la carbonatation, phénomène général pour les superstructures, la pénétration des ions chlorure est spécifique à certains environnements [2]. Ainsi les chlorures peuvent provenir de sources externes (eau saline en zone de marnage ou provenant d'exposition aux embruns, sels de déverglaçage) ou internes (constituants du béton). Ce dernier aspect est encadré par les normes qui définissent des seuils en ions chlorure liés, apportés par les constituants du béton, lors du gâchage [5].

Cette attaque des chlorures est à l'origine d'une corrosion localisée de l'armature [3].

En environnement marin, la pénétration des chlorures est de deux types selon la zone [6].

— En zones constamment immergées, le béton étant saturé, la pénétration des chlorures est régie par un phénomène de diffusion. Cette dernière résulte de l'agitation aléatoire d'espèces soumises à un gradient de potentiel chimique. Dans ce cas, du fait du faible taux d'oxygène, il y aura peu de corrosion.
— Dans les zones de marnage ou exposées aux embruns, le béton étant partiellement saturé, la pénétration est régie par des phénomènes de diffusion et de convection. Ainsi, les chlorures pénètrent dans un premier temps par absorption capillaire et migrent ensuite avec la phase liquide par convection dans la zone concernée. La progression se poursuit par diffusion dans la partie se trouvant à saturation.

Dans un béton exposé à un environnement contenant des chlorures, on distingue les chlorures « libres » et les chlorures « liés ». Les chlorures « totaux » sont alors définis par la somme des chlorures libres et liés. Les chlorures liés sont fixés sur la matrice cimentaire soit chimiquement soit physiquement alors que les chlorures libres se retrouvent sous forme ionique dans la solution interstitielle. Ces derniers sont les seuls en mesure de diffuser et donc de jouer un rôle actif dans la dépassivation de l'acier et par conséquent dans la corrosion des armatures [6]. Il existe un équilibre entre les chlorures liés et les chlorures libres, principalement sous forme de chloroaluminates.

Plusieurs facteurs influencent la vitesse de pénétration des chlorures, parmi eux, la porosité de la pâte de ciment [2] et des granulats dans certains cas particuliers. En effet, tout ce qui peut contribuer à diminuer la porosité du béton retarde l'échéance de la dépassivation. Ainsi la vitesse diminuera de façon « exponentielle » avec le rapport Eau/Ciment [2]. La cinétique de pénétration des chlorures dépend également de la nature de l'environnement dans lequel se trouve le béton : la concentration en chlorures de la solution en contact, la nature de la zone d'exposition (immersion, marnage, embruns) et la température.

La corrosion des armatures s'amorce lorsque plusieurs conditions sont réunies. Les principaux paramètres régissant le processus d'amorçage sont notamment le pH, la concentration en ions chlorure, la teneur en oxygène et l'humidité au niveau des armatures. Bien qu'il s'agisse d'un phénomène électrochimique complexe, l'amorçage de la corrosion est souvent réduit, par simplification, au dépassement d'une concentration « critique » en chlorures dans le béton au niveau des armatures : on parle de concentration critique d'initiation de la corrosion. Dans la littérature, cette concentration est souvent égale à 0,4 % (par rapport à la masse de ciment) pour un béton non carbonaté [7]. Ce seuil est très discuté dans la communauté scientifique [8]. Néanmoins, il constitue un indicateur précieux d'aide à la décision en matière de programmation et de choix des actions de maintenance.

1.2 Pratiques actuelles de réhabilitation des ouvrages en béton soumis au processus de corrosion

Les techniques de réhabilitation des ouvrages soumis au processus de corrosion sont choisies selon divers critères, notamment l'étendue de la zone à traiter, l'avancement du phénomène de corrosion (incubation, propagation), l'accessibilité de la zone, l'exposition du béton (embruns, immersion, marnage) et les contraintes d'exploitation. Dans certains cas, la pérennité attendue de la réparation peut également rentrer en jeu dans le processus de sélection. Selon que la corrosion est en phase d'incubation ou de propagation les techniques peuvent avoir un rôle de protection pour prévenir l'initiation ou un rôle curatif pour arrêter la propagation. Les techniques peuvent également être structurées en plusieurs catégories selon leur principe d'action :

- réhabilitations « traditionnelles » : reconstitution du béton d'enrobage ;
- réhabilitations « superficielles » : protections de surface, inhibiteurs de corrosion ;
- réhabilitations « électrochimiques » : réalcalinisation, extraction des chlorures, protection cathodique.

Le choix de la technique de réhabilitation nécessite une connaissance précise de la structure et de son état de vieillissement. À ce titre, la réalisation préalable d'un diagnostic est indispensable [9]. La figure 3 explicite le principe de sélection des techniques de réparation.

Les différentes techniques sont expliquées aux paragraphes suivants (§ 1.2.1, 1.2.2, 1.2.3).

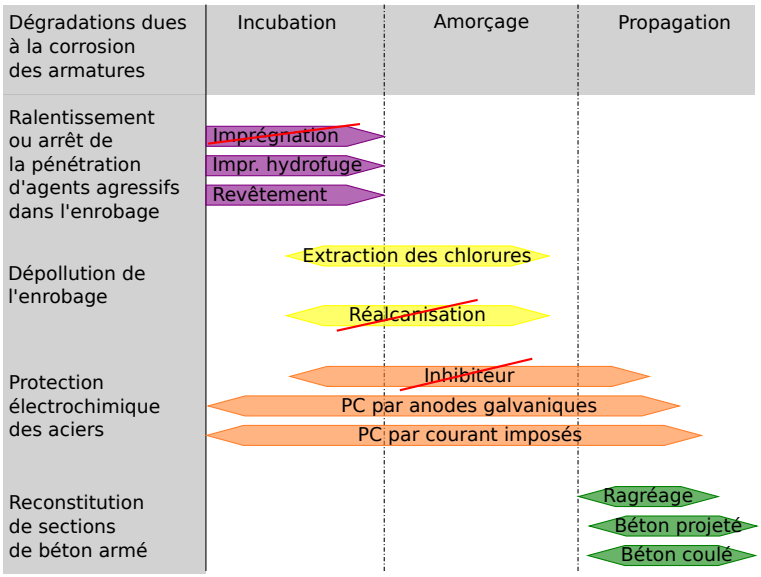

FIGURE 3 – Sélection des techniques de réparation [10]

1.2.1 Réhabilitations « traditionnelles »

Lorsque le processus de corrosion est avancé (fissuration, éclatement du béton, armatures corrodées), les techniques de réhabilitation dites « traditionnelles » consistent à reconstituer un matériau sain autour des armatures [11]. On distingue alors, selon l'étendue des dégradations et le mode de mise en œuvre, le ragréage et la reconstitution du béton d'enrobage par béton (ou mortier) projeté ou coulé en place [9],[12]. L'objectif est de rétablir la passivation des armatures et de reconstituer une protection (enrobage) de qualité permettant d'assurer une durabilité suffisante. Alors que le ragréage est réservé à la reprise de dégradations ponctuelles et de faible étendue, la reconstitution par béton projeté ou béton coulé en place s'applique à la réparation de structures présentant des dégradations généralisées ou étendues. La nature du produit de réparation est variable. Dans le cas du ragréage il s'agit le plus souvent d'un mortier mis en place manuellement. Dans le cas de la reconstitution par béton projeté ou coulé en place, il peut s'agir de béton ou de mortier, selon l'épaisseur souhaitée ou la densité des armatures. Quelle que soit la technique, le principe consiste à éliminer le béton altéré (fissuré, pollué par les chlorures, carbonaté) en dégageant les armatures (par piquage, burinage ou hydrodécapage), à nettoyer les armatures (par brossage, sablage ou hydrodécapage) [11],[13]. Le déploiement de ces techniques est régi par un référentiel technique, notamment la série de normes NF EN1504-X [14] à [15] et NF P95-10X [16] à [17] ainsi que le fascicule 65 du CCTG [18]. Les armatures présentant des réductions de section significatives, mettant en danger la tenue structurelle de l'ouvrage ou d'une partie de l'ouvrage, sont remplacées par des armatures de même nature mises en place par scellement ou soudure [11]. La réparation se termine par la mise en œuvre du mortier ou du béton. Si l'épaisseur reconstituée ne permet pas d'assurer un enrobage suffisant (de l'ordre de 5 cm en environnement marin), l'application sur les armatures d'un produit passivant est possible [19]. Dans ce cas de figure, néanmoins, on privilégie plutôt de compléter la réparation par l'application d'une protection de surface. La formation de macro-

piles à la périphérie de ce type de réparations [1] est à l'origine de dégradations prématurées (cf. figure 4). Ce phénomène, d'autant plus marqué dans le cas des ragréages, peut ainsi être à l'origine, dans certains cas, d'une faible pérennité de ces réparations.

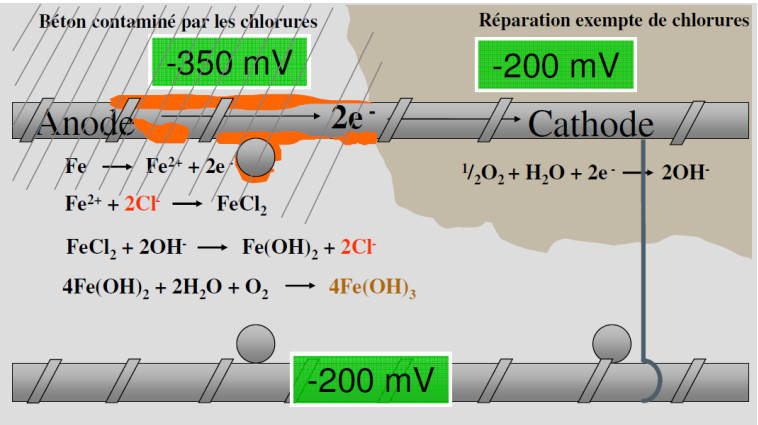

FIGURE 4 – Schéma du phénomène de macro-piles [10]

Le retour d'expérience des réparations traditionnelles a été étudié dans le programme européen CONREPNET [20]. Parmi les points majeurs qui ressortent des conclusions, il est possible de citer l'incompatibilité entre l'ancien et le nouveau béton ainsi que l'effet de pile. La pérennité du traitement a, dans ce projet, été estimée à une durée comprise entre 2 et 10 ans.

1.2.2 Réhabilitations « superficielles »

Lorsque le processus de corrosion est peu avancé (phase d'incubation), les techniques de réhabilitation superficielles permettant de ralentir ou de stopper la pénétration des agents agressifs, sont particulièrement bien adaptées pour prévenir l'amorçage de la corrosion. Comme évoqué au paragraphe 1.2.1, elles peuvent également être utilisées en complément de réparations « traditionnelles ». Ces techniques consistent en l'application à la surface du béton d'un produit qui agit physiquement ou chimiquement sur la pénétration des espèces à l'origine de la corrosion (eau, chlorures, dioxyde de carbone, oxygène) [21],[22]. Certains produits restent à la surface des bétons : ce sont les revêtements. D'autres pénètrent le béton et l'imprègnent. Dans la suite, pour des raisons de référentiel technique, on distingue les produits de protection de surface et les inhibiteurs de corrosion.

Produits de protection de surface

Les produits de protection de surface agissent comme une barrière physique ou chimique entre l'environnement extérieur et le béton pour empêcher ou ralentir la pénétration des agents à l'origine de pathologies [13]. Certains d'entre eux sont utilisés afin d'améliorer spécifiquement la durabilité du béton armé vis-à-vis de la corrosion en agissant notamment sur la pénétration

1. Dans les zones réparées, les armatures sont enrobées d'un matériau sain passivant. Leur potentiel est donc très peu électronégatif. En revanche, à la périphérie des réparations, les armatures restent enrobées du béton d'origine pollué par les chlorures. Leur potentiel est donc très électonégatif. La zone réparée se comporte ainsi en cathode et la zone périphérique en anode. La formation de cette « pile d'oxydo-réduction » conduit alors à une dissolution du métal (corrosion) dans la zone anodique.

des chlorures et du dioxyde de carbone. Selon leur épaisseur ou leur mode d'action (physique ou chimique), il peut s'agir d'imprégnations, d'imprégnations hydrophobes ou de revêtements [23]. Ces derniers, particulièrement bien adaptés à la protection contre la pénétration des chlorures, peuvent être des revêtements plastiques épais contenant généralement des charges grossières et à base de résines acryliques ou polyuréthanes, des revêtements d'imperméabilité à base de résine acrylique ou alors des revêtements divers à base de polyuréthane ou LHM [11]. Contrairement aux revêtements, l'application d'imprégnations hydrophobes ne crée pas de film physique en surface du béton. En s'imprégnant dans le béton, ils agissent sur l'adsorption et la pénétration par capillarité de l'eau. En limitant la pénétration de l'eau, ils agissent également sur la pénétration des chlorures. La technique de protection de surface dispose désormais d'un référentiel technique relativement développé [22], [23], [24], [21], [18].

Inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs introduits dans le béton lors de sa fabrication ne sont pas traités dans le présent document car ils ne relèvent pas de la réhabilitation des ouvrages existants. Seuls les inhibiteurs applicables depuis la surface du béton sont évoqués. Par simplification, les inhibiteurs peuvent être classés en deux catégories selon leur mode d'action principal. La première catégorie rassemble ceux qui agissent en empêchant les agents agressifs d'atteindre la surface des armatures. Ils sont réservés au cas où le processus de corrosion est peu avancé (phase d'incubation de la corrosion). Ils ont donc un rôle préventif vis-à-vis de l'amorçage de la corrosion. La deuxième catégorie rassemble ceux qui agissent sur la surface de l'armature en réparant la couche protectrice (passivation) altérée par l'agent agressif ou en diminuant la vitesse de dégradation de cette couche protectrice [19]. Ils sont réservés au cas où le processus de corrosion est avancé mais ne se manifeste pas encore par des dégradations visibles en surface au droit des armatures (fissuration, éclatement du béton). Dans le cas contraire, les zones altérées nécessitent au préalable une réparation dite « traditionnelle » (§1.2.1). Le référentiel technique (normes, règlements, guides) encadrant l'utilisation de ces produits est très peu développé.

L'application d'un tel produit consiste, dans un premier temps, à préparer le support à traiter, en éliminant tout produit à la surface du béton qui pourrait gêner l'imprégnation de l'inhibiteur (salissures, peintures, revêtements, algues et coquillages dans le cas des ouvrages en mer, etc.). L'inhibiteur est ensuite appliqué directement sur la surface du béton en une ou plusieurs passes selon sa consistance (solution liquide ou gélifiée). L'application d'un inhibiteur sur un béton ayant été traité par un hydrofuge (imprégnation hydrophobe, hydrofuge de masse) est impossible [11].

Pour être efficace, l'inhibiteur doit être présent en quantité suffisante dans l'enrobage ou au niveau des armatures (selon son mode d'action). Cela sous-entend une imprégnation suffisante du produit depuis la surface. Des enrobages importants ou des bétons très compacts peuvent limiter cette pénétration du produit. Le taux de saturation en eau des bétons en zone humide ou les phénomènes de lessivage caractérisant la zone de marnage peuvent également limiter la pénétration des inhibiteurs et donc leur efficacité.

Il s'agit de produits sophistiqués dont la prescription et l'utilisation doivent avoir fait l'objet d'une réflexion et d'une étude préalable (fondée *a minima* sur un diagnostic) et d'un suivi spécifique lors de leur mise en œuvre et *a posteriori*.

L'efficacité des inhibiteurs sur du béton chloruré n'a pas été confirmée.

1.2.3 Réhabilitations « électrochimiques »

La corrosion des armatures du béton armé est un phénomène électrochimique. Une des alternatives aux techniques précédemment décrites pour arrêter, ralentir ou empêcher la corrosion consiste donc à déployer des techniques de réhabilitation électrochimique. Chaque technique présentée ci-après dispose de son domaine d'application privilégié qui dépend notamment de l'avancement et de l'activité de corrosion, de la nature de la structure à traiter, de son exposition à l'environnement extérieur, de ses contraintes d'utilisation. Ces techniques peuvent être utilisées en complément de celles évoquées au §1.2.1, uniquement pour retirer le béton non adhérent. Le béton pollué adhérent peut rester.

Ré-alcalinisation du béton carbonaté

Cette technique est utilisée lorsque la corrosion du béton armé est due à la carbonatation du béton d'enrobage. Son principe consiste à polariser l'armature en appliquant un courant électrique continu, qui d'après le fascicule de documentation FD CEN/TS 14038-1 [25] ne doit pas dépasser 4 A/m^2 de surface d'armature, entre une anode temporaire placée sur la surface du béton et l'acier des armatures. L'objectif est d'augmenter le pH du béton d'enrobage à un niveau permettant de repassiver les aciers. Cette technique peut être appliquée en préventif lorsque le processus de corrosion est en phase d'incubation ou bien éventuellement lorsque le processus de corrosion est avancé (phase de propagation) mais ne se manifeste pas encore par des dégradations visibles en surface au droit des armatures (fissuration, éclatement du béton). Dans le cas contraire, les zones altérées nécessitent au préalable une réparation dite « traditionnelle » (§1.2.1). Le document [11] limite le domaine d'application de la technique aux bétons dégradés par carbonatation jusqu'à une profondeur au plus égale à l'épaisseur d'enrobage. La technique dispose d'un référentiel technique national [25].

Lors du traitement de ré-alcalinisation, deux mécanismes interviennent. Au niveau de la surface du béton, l'application d'une solution alcaline permet d'augmenter le pH à partir de la surface. En parallèle, au niveau des armatures, l'électrolyse conduit à la formation d'ions OH^- à la surface de l'acier et donc à l'augmentation du pH dans le béton environnant les armatures [13]. Ce traitement est dit temporaire puisqu'il dure en général de une à six semaines (durée d'application du courant). Certaines études indiquent que les effets peuvent persister après 10 ans si l'épaisseur de béton ré-alcalinisé autour de l'armature est supérieure à 10 mm [11],[26]. Après ré-alcalinisation, il est recommandé d'appliquer une protection de surface pour prévenir une nouvelle pénétration du CO_2. La technique de ré-alcalinisation présente différentes déclinaisons selon la nature de la solution alcaline. Cette technique présente toutefois des limites telles que le risque de réaction alcali-granulats et celui de dégagement d'hydrogène en présence de câbles de précontrainte. Le phénomène de carbonatation étant limité sur les infrastructures maritimes, cette technique est généralement peu pertinente dans ce domaine.

Extraction des ions chlorure

Cette technique, décrite dans le fascicule de documentation DD CEN/TS 14038-2 [27], est fondée sur le même principe que la ré-alcalinisation et est également dite temporaire. Cette

fois-ci, du courant, de l'ordre de 1 A/m^2 d'acier, est imposé pour permettre le déplacement des ions chlorure chargés négativement, des armatures vers l'anode extérieure [13].

L'efficacité du traitement est évaluée à partir de la mesure de la concentration en ions chlorure au niveau des armatures (réalisation de profils de pénétration des chlorures). Cette dernière est comparée d'une part, à celle mesurée avant le traitement pour s'assurer d'une réelle diminution. D'autre part, elle doit être, *a minima*, inférieure au seuil critique d'initiation de la corrosion. Cette technique peut être appliquée en préventif lorsque le processus de corrosion est en phase d'incubation ou bien lorsqu'il est avancé (phase de propagation) mais ne se manifeste pas encore par des dégradations visibles en surface au droit des armatures (fissuration, éclatement du béton). Dans le cas contraire, les zones altérées nécessitent au préalable une réparation dite « traditionnelle » (§ 1.2.1). Le document [11] fixe le domaine d'application de la technique aux bétons dégradés par les chlorures lorsque le front de chlorures ne dépasse pas le premier lit d'armatures. Après l'extraction des chlorures, il est recommandé d'appliquer une protection de surface pour prévenir une nouvelle pénétration des ions chlorure. La technique dispose d'un référentiel technique national peu développé. L'efficacité de la technique peut être limitée lorsque l'épaisseur d'enrobage et la compacité du béton sont importantes, et/ou lorsque le béton contient des laitiers. Il y a un risque de dégagement d'hydrogène en présence de câbles de précontrainte.

Protection cathodique

Contrairement aux deux traitements électrochimiques précédents qui sont des traitements temporaires, celui-ci est appliqué de façon permanente afin de ralentir, voire d'arrêter la corrosion des armatures [11].

Cette méthode consiste à polariser l'armature dans le béton avec une anode placée de façon permanente sur le parement, ou parfois dans l'enrobage. Le courant de polarisation permet alors d'abaisser le potentiel électrochimique de l'armature jusqu'à une valeur seuil appelée potentiel de protection [11]. Elle fait l'objet d'une norme, la NF EN ISO 12696 [28].

Cette protection peut être de deux types, soit par courant imposé, avec un générateur électrique placé entre l'anode et l'armature, soit par anode sacrificielle, l'anode étant alors directement reliée à l'armature.

Cette technique est détaillée par la suite, dans le paragraphe 2.1.

2 Protection cathodique du béton armé

2.1 Principe de la protection cathodique

2.1.1 Introduction

Les armatures situées dans le béton sont protégées de la corrosion du fait de la forte alcalinité du béton (pH > 13). Dans ces conditions, un film protecteur très mince et adhérent, nommé film passif, se forme à la surface des armatures. En présence d'eau et d'oxygène, ce film peut être détruit par des agents agressifs comme les chlorures ou les sulfates.

Il peut alors être utilisé une protection cathodique dont le principe consiste à porter le potentiel du métal à un niveau dit de passivation, en utilisant une anode installée dans le même électrolyte.

Il existe deux types de protection cathodique : la protection cathodique par courant imposé (PCCI) et la protection cathodique par courant galvanique (PCCG). Dans les deux cas, le principe consiste à relier une anode externe au métal à protéger et à faire passer un courant électrique continu, de sorte que la surface du métal devienne cathodique et donc ne se corrode pas. La différence entre les deux types de protection est la source de courant. Dans le premier cas, le courant provient d'une source d'alimentation de courant continu alors que dans le deuxième cas, le courant est le résultat de la différence de potentiel entre les deux métaux (anode galvanique et métal à protéger).

La norme NF EN ISO 12696 [28] spécifie les densités de courant types utilisées pour la prévention cathodique et pour la protection cathodique des structures existantes corrodées avec acier sans revêtement. Il s'agit dans le premier cas d'une densité variant de 0,2 mA/m^2 à 2 mA/m^2 et dans le second cas de 2 mA/m^2 à 20 mA/m^2. La thèse d'Al Hajjar [13] donne également des densités de courant dans sa partie bibliographique, qui s'avèrent être dans les mêmes ordres de grandeur avec en cas de prévention dans les constructions aériennes, des densités de courant comprises entre 0,5 et 2 mA/m^2, pour avoir une réduction de la corrosion, jusqu'à 15 mA/m^2 et enfin pour repassiver les aciers, des densités supérieures à 20 mA/m^2.

Dans des conditions où le transport de l'oxygène à la surface de l'acier est limité (béton immergé), les densités de courant nécessaires seront plus faibles, avec pour assurer une protection, des valeurs allant de 0,2 à 2 mA/m^2 [13].

2.1.2 Protection cathodique par courant imposé

Une alimentation électrique génère un courant imposé dont la valeur nominale peut être régulée et choisie en fonction de la densité de courant requise. La borne positive de l'alimentation est reliée à l'anode et la borne négative aux armatures du béton (cf. figure 5). Ainsi la densité de courant requise est calculée en fonction de la quantité d'armatures à traiter.

Cette protection peut être appliquée soit en préventif, lors de la phase d'incubation de la corrosion, soit en protection lors de la phase de propagation, des niveaux de courant différents étant alors appliqués, plus faibles en préventif. Les anodes utilisées peuvent être de deux types,

surfaciques ou discrètes, telles que décrites dans le paragraphe 2.1.8, avec des emplacements déterminés lors du dimensionnement de l'installation (§2.1.5).

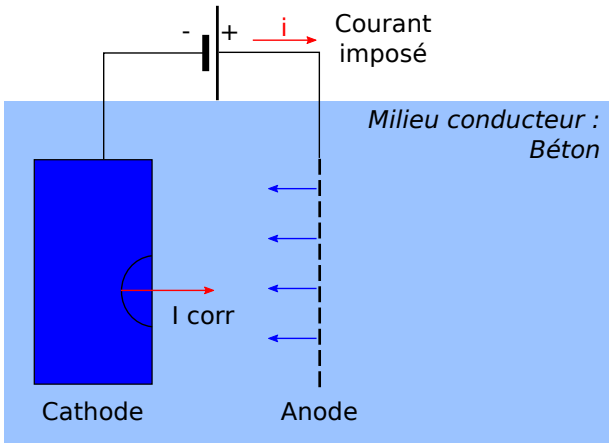

FIGURE 5 – Principe de la protection cathodique par courant imposé pour le béton armé [29]

2.1.3 Protection cathodique par courant galvanique

La différence de nature de métal entre l'anode galvanique et l'armature provoque (effet de pile) le courant pour la polarisation électrique. La plupart des anodes sont des anodes de zinc. Dans ce cas, trois espèces différentes seront présentes : le zinc, le fer et le couple oxygène-eau. Les potentiels de leurs couples oxydo-réducteurs sont représentés sur l'échelle de potentiels figure 6.

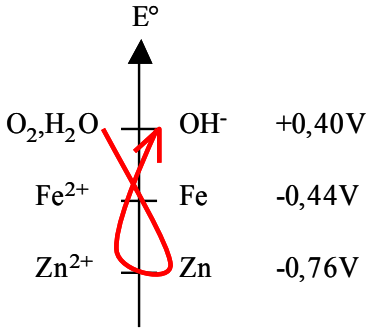

FIGURE 6 – Échelle des potentiels des couples oxydo-réducteurs $OH^-/O_2,H_2O$, Fe/Fe^{2+} et Zn/Zn^{2+}

Ainsi, l'oxydant le plus fort (ici O_2,H_2O) va réagir avec le réducteur le plus faible (Zn) selon la réaction suivante :

$$Zn + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \longrightarrow Zn^{2+} + 2OH^-$$

Le fer des armatures est un réducteur plus fort que le zinc. Il sera ainsi protégé de la corrosion provoquée par la présence d'eau et d'oxygène dans le béton. Le zinc va donc se corroder préférentiellement.

Le principe de ce type de protection est représenté sur la figure 7. Comme pour la PCCI, les anodes peuvent être de types surfaciques ou discrètes, §2.1.8. Les emplacements ainsi que le nombre d'anodes devant permettre une protection en phase de propagation de la corrosion ou alors un traitement préventif en phase d'incubation, sont déterminés lors du dimensionnement (§2.1.5) et nécessitent qu'un diagnostic préalable ait été réalisé.

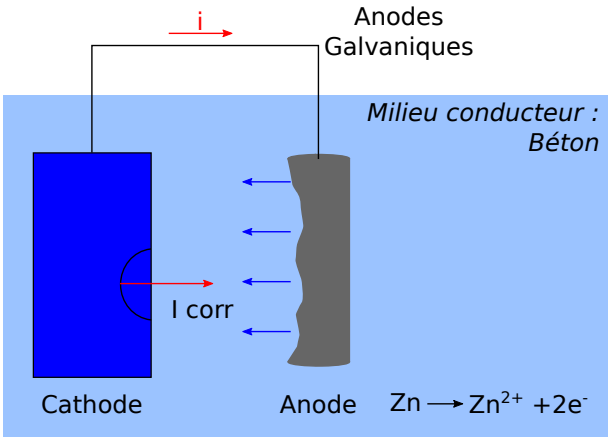

FIGURE 7 – Principe de la protection cathodique par courant galvanique pour le béton armé [29]

Le guide du Cefracor sur la protection cathodique par anodes galvaniques [29] propose à titre d'exemple des densités de courant selon l'exposition :

— 0,5 mA/m^2 en exposition faible (aérien) ;
— 1 mA/m^2 en exposition moyenne (remontées capillaires) ;
— 2 mA/m^2 en exposition forte (marnage, sels de déverglaçage...).

2.1.4 Normalisation

La protection cathodique du béton armé fait l'objet d'une norme NF EN ISO 12696, intitulée « Protection cathodique de l'acier dans le béton » [28]. Cette norme définit les critères de performance de la protection. Elle traite aussi bien des bâtiments que des ouvrages d'art et des structures exposées à l'atmosphère, enterrées, immergées que soumises à la marée.

Toutefois celle-ci indique des critères de performance pour l'ensemble des systèmes anodiques, ne nuançant pas de critères particuliers pour les anodes galvaniques. C'est pourquoi le Cefracor a publié un guide spécifique à la protection cathodique par courant galvanique, intitulé « Anodes galvaniques pour le traitement de la corrosion des armatures des constructions en béton » [29]. Ce guide donne des éléments de compréhension du fonctionnement de ces anodes. Il sert de base pour l'utilisation de cette technique (principes, modes de conception et de calcul, contrôles, domaines d'application) et donne des éléments en vue de la rédaction de cahiers des charges.

En plus de ces deux documents, un troisième peut s'avérer intéressant pour la protection cathodique d'ouvrages maritimes en béton armé, il s'agit de la norme relative au personnel en charge de la protection cathodique. Elle s'applique aux ouvrages en béton armé, et s'intitule « Protection cathodique – Niveaux de compétence et certification du personnel en protection

cathodique » [30]. Elle définit trois niveaux de compétence du personnel, en études préalables, en conception, en installation, en contrôle et en maintenance. Elle spécifie également un cadre directeur des procédures relatives à la formation et à la certification du personnel. Enfin, elle définit les exigences minimales concernant les organismes responsables de cette certification. La certification ″protection cathodique secteur béton niveau 1″ est délivrée en France par le Cefracor depuis octobre 2014. À la date du 25 mars 2016, environ 35 personnes étaient certifiées.

2.1.5 Conception/Dimensionnement

Le dimensionnement va permettre de définir les matériaux et matériels nécessaires. Il définit les caractéristiques d'installation telles que le nombre et l'emplacement des zones d'implantation d'anodes, le type et les caractéristiques de ces anodes, le courant total nécessaire, donc dans le cas du courant imposé, les caractéristiques de l'alimentation électrique. Il nécessite qu'un diagnostic de l'ouvrage ait été réalisé, avec des mesures de teneur en chlorure, de gradients de potentiels et de résistivité, notamment en vue de vérifier la pertinence de cette réparation.

Ce calcul du besoin en courant nécessaire à la protection des armatures se fonde sur [28] :

— les classifications d'exposition (exposées à la marée, exposées aux embruns...),
— la teneur en chlorure dans le béton,
— la résistivité du béton,
— l'humidité du béton,
— la surface totale des armatures/aciers,
— la distribution du courant et l'estimation du courant nécessaire,
— les exigences relatives à la durée de vie,
— l'environnement d'utilisation,
— le poids,
— la phase et les contraintes d'installation.

Le guide Cefracor sur l'utilisation d'anodes galvaniques [29] préconise un calcul du dimensionnement comprenant 7 points, considérés comme fondamentaux :

1. le découpage de la structure en « zones de protection galvanique » ;
2. l'étude du ferraillage, avec notamment le calcul du ratio Surface Acier/Surface Béton ;
3. l'étude de la répartition des anodes ;
4. l'étude, pour chaque anode, de la répartition du courant suivant le type d'anode ;
5. le calcul des masses d'anode ;
6. le choix de l'anode ;
7. la nomenclature.

2.1.6 Installation et mise en œuvre

L'installation de la protection cathodique se déroule en plusieurs phases [28] :

— vérification de la continuité électrique des armatures, avec si besoin ajout d'armatures ou de liaisons ;
— mise en place d'électrodes de référence (2 par zone protégée par PCCI et 2 par zone représentative pour la PCCG) dans un béton sain non réparé, afin de surveiller la protection ;
— connexion avec l'acier dans le béton ;
— réparation du béton ;
— préparation des surfaces pour l'installation des anodes ;
— installation des anodes ;
— connexions à l'ensemble anodique ;
— recouvrement de l'anode.

La mise en route de la PCCI nécessite d'être réalisée par paliers successifs de polarisation, avec à chaque fois une mesure du potentiel de l'armature et du courant appliqué.

2.1.7 Suivi du système de protection

Ce type de protection nécessite un suivi dans le temps afin d'estimer son efficacité. Parmi les contrôles, les plus fréquents consistent à suivre l'intensité du courant ainsi que la dépolarisation et les potentiels de protection On/Off.

La norme NF EN ISO 12696 [28] définit les procédures des inspections de routine pour la PCCI :

— vérification du fonctionnement en mesurant la tension et le courant débité pour chaque zone du système de PCCI ;
— évaluation des performances avec des mesures des potentiels instantanés « à courant coupé », de la décroissance du potentiel, des paramètres des autres capteurs installés.

La périodicité de la vérification du fonctionnement est mensuelle au cours de la première année de fonctionnement puis tous les trois mois, si tout est satisfaisant. Celle de l'évaluation des performances est trimestrielle au cours de la première année, puis tous les six à douze mois, selon le niveau de performance. Les critères de protection sont définis dans la norme NF EN ISO 12696 [28], de sorte que pour toute structure, l'un des critères suivants soit respecté :

— « un potentiel « à courant coupé » plus négatif que -720 mV par rapport à Ag/AgCl/Kcl 0,5 M ; ou
— une dépolarisation d'au moins 100 mV sur un maximum de 24h à partir de la coupure du courant ;
— une dépolarisation pendant une longue période (typiquement 24h ou plus) d'au moins 150 mV à partir de la coupure du courant, sujette à une décroissance continuelle et l'utilisation d'électrodes de référence (et non de sondes de dépolarisation) pour les mesurages au-delà de 24h. »

Le guide sur la PCCG [29] indique les trois types de contrôles à réaliser pour suivre le bon fonctionnement de l'installation :

— contrôle de l'essai de convenance ;
— contrôle de réception ;
— contrôle de suivi.

Le tableau 1, extrait du guide [29], indique les essais à réaliser par contrôle et le tableau 2 extrait du même guide [29], la périodicité recommandée des mesures pour les contrôles de suivi.

	Contrôle de l'essai de convenance	Contrôle de réception	Contrôle de suivi
Qualité des anodes		x	
Intensité du courant	x	x	x avec enregistrement
Cartographies de potentiels On/Off	x	x	x avec mesure de la température, de l'humidité, en relation avec l'intensité du courant
Test de polarisation	x	x	x
Autres tests (estimation du courant de corrosion...)		x	x

Tableau 1 – Essais à réaliser lors des contrôles de la PCCG

Contrôle	Périodicité
Intensité du courant	semaine
Potentiels On/Off	1 fois / an
Test de polarisation et estimation du courant de corrosion	4 fois / an

Tableau 2 – Périodicité des mesures pour les contrôles de suivi de la PCCG

2.1.8 Types d'anodes

La majorité des anodes utilisées sont en zinc, elles peuvent sinon être en aluminium ou en alliage de zinc ou d'aluminium. Leur forme peut varier, allant d'anodes surfaciques (projection, treillis, feuilles plaquées ou collées) à des anodes discrètes, isolées ou en réseau.

Anodes surfaciques
Pour la PCCI, plusieurs types d'anodes surfaciques peuvent être proposés :

— les revêtements conducteurs tels que les peintures conductrices et la métallisation à l'aide de zinc, appliqués sur le parement de béton,
— le treillis (tôle déployée) de titane traité, recouvert de béton afin d'uniformiser l'aspect de l'ouvrage.

Pour la PCCG, il peut s'agir d'une anode projetée (par exemple du zinc projeté), de treillis ou de bandes collées.

Anodes discrètes

Les anodes pour la PCCI peuvent être des pièces tubulaires de titane, noyées dans le béton, isolées ou en réseau. En ce qui concerne la PCCG, cela peut être des anodes installées de manière isolées ou alors en réseau. Ces systèmes sont alors installés sur les armatures ou alors il s'agit de systèmes en peigne ou de systèmes hybrides.

2.2 Utilisation de la protection cathodique en environnement maritime, dans le monde

Depuis les années 1970, la protection cathodique a commencé à être utilisée pour stopper la corrosion des armatures des structures en béton [31]. Les exemples d'utilisation d'une telle protection sont donc en nombre important, même si son utilisation s'avère très inégale en fonction du pays ou de la zone géographique.

Dans ce paragraphe, des exemples d'ouvrages protégés sont présentés, dans un premier temps à l'étranger, par océan, puis en France. L'objectif est d'établir un panorama d'ensemble du déploiement de la technique sur le patrimoine des infrastructures maritimes.

2.2.1 À travers le monde

Dans plusieurs pays à travers le monde, la protection cathodique (PCCI et PCCG) a été utilisée pour protéger des ouvrages en environnement maritime. Compte tenu de l'étendue de l'utilisation de cette méthode dans certains pays, seuls quelques exemples sont donnés dans la suite du document.

Océan Atlantique

Mer du Nord et mer de Norvège

En Norvège [32], entre 1989 et 2006, 36 400 m^2 de quai ont été protégés par PCCI, ce qui représente 16 % des infrastructures norvégiennes protégées par PCCI durant cette période. La répartition des systèmes de protection utilisés pour les quais est telle que suit :

— 7 100 m^2 d'anode en titane ;
— 11 050 m^2 de ruban de titane ;
— 1 500 m^2 de treillis en titane ;
— 3 100 m^2 de treillis en graphite ;
— 3 600 m^2 de mortier conducteur ;

— 10 050 m^2 de système combiné (plusieurs types d'anodes pour couvrir les variations d'exposition environnementale) ;
— 2 quais protégés par des anodes spécifiques aux zones submergées d'un ouvrage, appelées « water anodes ».

Aucun quai n'est protégé par revêtement conducteur, ce système d'anode étant pour les autres types d'infrastructures (immeuble, parking, pont...) le plus utilisé de Norvège. Sur les 175 structures qui ont été protégées par PCCI entre 1989 et 2006, tous types de structures confondus, 162 sont encore opérationnelles. La majorité des installations ne fonctionnant plus correspond à des installations datant des 5 premières années après 1989.

Entre 1987 et 2009, environ 150 structures situées aux Pays-Bas ont bénéficié d'une protection cathodique (PC) [33], (figure 8). Sur ces 150 structures, 105 ont une documentation associée suffisante pour déterminer les informations concernant la conception, la performance et la maintenance de la PC. Ces systèmes de PC protègent une surface totale de 82 500 m^2 de béton Ils sont répartis dans 105 bâtiments et 45 ponts. Les anodes utilisées sont [33] :

— dans 65 cas un revêtement conducteur ;
— dans 40 cas des anodes en titane ;
— dans 6 cas des anodes multiples ;
— dans 35 cas des anodes galvaniques, ces dernières étant en augmentation depuis 12 ans.

Aucune précision n'est donnée sur l'environnement dans lequel se situent ces structures, certaines pouvant ainsi être en environnement maritime et d'autres en environnement continental.

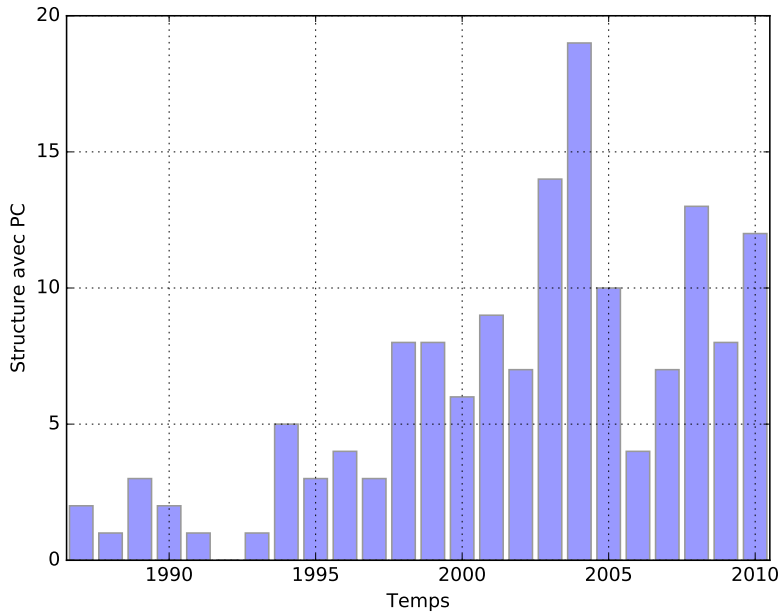

FIGURE 8 – Nombre de structures avec PC aux Pays-Bas par année d'installation [33]

L'utilisation d'une protection cathodique du béton armé en environnement maritime est à ses débuts en Allemagne. Le premier ouvrage a été protégé en 2009, il s'agissait alors d'un

pylône. Un autre projet dont le début des travaux était prévu pour 2010 concerne la protection par PCCI du barrage de l'Eider à l'aide d'anodes d'oxydes métalliques mixtes de type bande en titane. La densité de courant visée est de 20 mA/m^2 de protection cathodique, avec l'utilisation de trois bandes d'anodes distancées d'environ 12 cm [34].

Mer Baltique

En 2003, le pont d'Öland, Figure 9, long de 6 km et reliant la Suède à l'île d'Öland en traversant la mer Baltique, a été protégé par PCCI sur deux zones test de la poutre principale de 2×5m^2. Le système utilisé consiste en une anode de treillis en carbone, enrobée par un mortier adapté. Il doit permettre de stopper l'activité de la corrosion, sur ce pont construit en 1972, particulièrement soumis au fil des ans à l'air marin et à des hivers longs et froids [35]. De l'énergie renouvelable, produit par une éolienne et un panneau solaire, fait fonctionner la PCCI. Après 44 mois en service, le suivi montre une capacité de protection satisfaisante pour l'une des zones. La seconde a quant à elle présenté pendant un temps court une protection médiocre du fait d'un redresseur cassé qui a donc fait l'objet d'un remplacement.

FIGURE 9 – Pont d'Öland [35]

Mer Celtique

Au Royaume-Uni, dans l'estuaire de Milford Haven, se sont déroulés des travaux de réaménagement de l'appontement de South Hook (poste pétrolier désaffecté), une structure longue de 2 km construite il y a plus de 30 ans et vouée à devenir un terminal GNL (gaz naturel liquifié). La réhabilitation de l'ouvrage comprenait notamment la mise en œuvre d'une protection cathodique des armatures par PCCI [36].

Mer Méditerranée

La digue flottante de Monaco a été protégée à titre préventif par anodes sacrificielles dès sa construction en 2002-2003. Ainsi 144 anodes trapézoïdales ont été fixées contre le voile bétonné, par tiges filetées reliées au ferraillage. Deux types d'anodes, de dimensions différentes, ont été utilisés [37].

Le port Tanger Med 2, qui est l'extension côté ouest du port Tanger Med 1, se situe à 40 km à l'est de la ville de Tanger sur la rive sud de la mer méditerranée. Il a été partiellement mis en service en 2004. Ses digues (principale et secondaire) de protection sont constituées de 105 caissons préfabriqués en béton armé haute performance. Il s'agit de caissons quadrilobés de dimensions 28 m×28 m×24,5 m. Une protection cathodique par PCCI a été mise en place sur ces caissons lors de la phase de préfabrication à quai. Cette protection consiste en des anodes rubans disposées tous les 20 cm et des bandes conductrices. Des anodes tubulaires sont mises en place au niveau de la zone immergée [38].

Océan Atlantique Nord

En Floride 800 pieux en béton armé de ponts ont été protégés par PCCI en utilisant un système d'enveloppe intégrale du pieu avec comme anode, un treillis en titane. Ce système utilise une enveloppe préfabriquée en fibres de verre, à l'intérieur de laquelle est attachée l'anode en treillis [39], (figure 10).

FIGURE 10 – Système d'enveloppe sur les pieux en Floride [39]

Toujours en Floride, le long de la côte, plusieurs ponts ont utilisé comme anode galvanique des feuilles de zinc d'épaisseur 0,25 mm fixées avec de l'hydrogel [39], figure 11.

FIGURE 11 – Anode de zinc adhésive appliquée sur la pile d'un pont en Floride [39]

Le département des transports de l'État de Virginie aux États-Unis a équipé douze ponts en béton armé de PC. Une étude a été menée pour identifier, catégoriser et évaluer la performance de ces systèmes [40]. Parmi ces ponts, trois se situent en environnement maritime, deux à Norfolk et un à Hampton, tous sur la route 64, Figure 12.

Le pont qui enjambe la baie de Willoughby a été protégé en 1997 par PCCG. Cette protection a été installée dans le cadre d'un projet de recherche sur l'évaluation de cinq systèmes d'anode galvanique pour la réparation de pieux en environnement maritime. Dix des douze pieux supportant deux chevêtres ont été protégés par différents systèmes, au niveau et aux environs de la zone d'éclaboussure de chaque pieu. La PC a été activée en 1997 puis une partie de la zone concernée a été suivie pendant 14 mois. Compte tenu des résultats du suivi, les chercheurs pensent qu'au moins une partie des systèmes de PCCG fonctionne.

Le pont au-dessus de la 13^{e} Est View Street a été protégé en 1986, dans le cadre d'une étude pour évaluer la performance d'un système de PCCI dans un environnement marin du sud.

— Le tablier a été protégé par un système de polymère conducteur contenant des câbles d'anode primaire cuivre/niobium et des torons de carbone en anode secondaire supplé-

mentaire. Ces systèmes sont remplis avec un coulis de polymère conducteur de résine de vinylester et de noir de carbone. Toutefois cette zone a été désactivée du fait de la dégradation du coulis par l'acide générée à la surface des anodes dans les 2 ans suivant l'installation de la protection.
— La pile est a été protégée par un revêtement de zinc projeté à l'arc. Le courant est amené au zinc par un distributeur en titane recouvert avec un oxyde métallique mixte.
— La pile ouest a été protégée par un revêtement de polymère conducteur de coke calciné en résine vinylester avec des modificateurs. Le courant est amené à ce système par des fils en platine.

Chaque zone a été évaluée durant 23 mois. Les observations de terrain, réalisées lors de l'étude de 2007, ont mis en avant le fait que du courant alternatif était fourni au redresseur, mais qu'aucune puissance de sortie n'était délivrée aux anodes. Il s'avère qu'au-delà du projet de recherche (1989), même si le système a été laissé en fonctionnement, il n'y a plus eu de suivi régulier du redresseur. Les systèmes installés ne sont donc plus considérés comme fonctionnant.

Le pont tunnel Hampton roads, construit en 1958, a quant à lui été protégé en 1998 par PCCI, lors de sa réhabilitation. Du béton de recouvrement en latex modifié a été utilisé. Il contenait comme système anodique un treillis en titane avec un oxyde métallique mixte. Ce système a recouvert plus de 400 000 ft^2, ce qui équivaut à plus de 37 000 m^2, de la surface du tablier. Après son installation, le système n'a pas pu être mis en route. Plusieurs hypothèses ont été émises, cependant aucune n'a pu être confirmée et le système n'a jamais pu être mis sous tension. Une revue de ce projet indique qu'une meilleure coordination entre les concepteurs de la PC et du système électrique et les sous-traitants, aurait pu servir à prévenir les problèmes techniques qui sont apparus. Les chercheurs qui se sont penchés sur les documents relatifs à cette réhabilitation ont l'impression que le système de PC a été pensé après coup et que sa conception n'a pas été prise en compte dans la conception du système électrique.

FIGURE 12 – Ponts de Virginie situés en environnement maritime : pont de Willoughby (à gauche), pont-tunnel Hampton roads (au milieu) et pont de View Street (à droite) [40]

Golfe du Mexique

Les piles d'un pont, situé au Texas, ont été protégées par PCCG en utilisant comme anode un câble d'Aluminium-Zinc-Indium, projeté à l'arc sur le béton [39], figure 13.

Dans l'État de Campeche, au sud du Mexique, une PCCG a été appliquée en 2006 sur le pont de La Unidad, reliant Ciudad del Carmen et le continent [41], Figure 14. Ce pont, vieux de 30

FIGURE 13 – Application d'une anode Al-Zn-In à l'arc sur la pile d'un pont au Texas [39]

ans, a été réparé deux fois, dans les années 90 et en 2002, par des techniques n'ayant pas permis d'avoir une réparation durable. Les gestionnaires ont alors envisagé de s'inspirer de ce qui est fait en Floride en termes de PC. Ne maîtrisant pas ce procédé, ils ont dans un premier temps préféré procéder à un test. Celui-ci portait sur une zone précise du pont constituée de 14 pieux, Figure 14, sur lesquels la PC a été installée en 2004 et suivie pendant 2,5 ans [42].

FIGURE 14 – Pont La Unidad - Installation complète du système de PC avec une enveloppe et du zinc métallisé [42]

Compte tenu des résultats satisfaisants, ils ont étendu le procédé à tout le pont. Ce système de PCCG consiste en une enveloppe en fibre de verre combinée à un système de PCCG de zinc métallisé. L'enveloppe est placée autour des pieux après que la continuité électrique des armatures a été confirmée et si besoin rétablie. À l'intérieur de cette enveloppe, dans l'espace annulaire, est versé un mortier. L'anode de treillis en zinc quant à elle a été pré-installée en usine, sur la face intérieure. L'anode est reliée à l'armature via un boîtier de jonction situé au-dessus de l'enveloppe. L'enveloppe est fournie avec un fil de cuivre et un fil similaire pré-installé est relié à l'acier sur site. La connexion est alors établie via le boîtier de jonction. Des électrodes de référence ont été placées à des endroits stratégiques sur plusieurs pieux afin d'évaluer la performance du système. De plus, la quantité de courant électrique qui quitte l'enveloppe est surveillée en utilisant des shunts installés dans le boîtier de jonction. Cela permet au gestionnaire de déterminer l'efficacité du système et d'évaluer la durée de vie de fonctionnement des anodes [42]. Par cette méthode, la réparation et la protection de plus de 1400 pieux sont programmées. Les deux premières phases du projet, terminées en décembre 2009, ont permis de traiter les 240 premiers pieux [43].

Océan Arctique

Mer de Barents

Le port d'Honningsvag, Figure 15, situé au nord de la Norvège, a en 2005 mis en place une PCCI sur 2000 m^2 de l'intrados du quai. Le système utilisé consiste en une anode de treillis en carbone, enrobée par un mortier adapté [35]. Cette solution de protection a été choisie du fait des hivers rudes qui nécessitent des réparations de maintenance, ces dernières devant être exécutées rapidement, sans perturber le trafic journalier des bateaux de touristes venant visiter le cap.

Figure 15 – Port d'Honningsvag [35]

Océan Indien

Golfe Persique

Des constructions en béton armé situées dans un port du golfe Persique, (figure 16), ont été protégées en 1997 par PCCG en utilisant des anodes de zinc projeté à l'arc complétée par la mise en œuvre d'une protection de surface (revêtement organique) [44].

Figure 16 – Construction en béton dans le golfe Arabique un an et demi après réparation (1999) [44]

Sur le pont Umm Al Nar à Abu Dhabi, une PC a été installée dès la construction de l'ouvrage, en 2003, en prévention d'une apparition de corrosion, du fait de l'environnement marin chaud et humide pouvant être à l'origine de lourdes réparations ultérieures si le pont n'était pas protégé [45].

En Arabie Saoudite, le port industriel de King Fahd devait garantir une durée de vie opérationnelle de l'installation avant sa mise en vente. Pour cela, des réparations ont été réalisées en 2006. Ainsi le béton armé des pieux a été réparé et protégé cathodiquement en utilisant au total 1349 Galvashield LJ. Il s'agit d'anodes galvaniques en zinc [46].

Océan Pacifique Nord

Une étude, publiée en 2009, a été menée aux États-Unis, sous la forme d'une enquête, auprès de 32 départements des transports des États-Unis et de 5 départements des transports canadiens [47]. De celle-ci est ressortie que 586 structures d'Amérique du Nord étaient protégées cathodiquement, 389 aux États-Unis et 197 au Canada. Parmi celles-ci, 375 ont un système de protection cathodique installé sur leurs tabliers, 47 sur leurs éléments de superstructure comme les poutres, 49 sur les chevêtres, 83 sur les colonnes, 107 sur les piles et 15 sur les fondations. Les agences interrogées déclaraient également avoir prévu d'installer, dans les cinq années suivant l'enquête, 159 nouveaux systèmes de protection cathodique.

La figure 17 représente l'évolution du nombre d'installation de systèmes de protection cathodique sur la période 1973-1989.

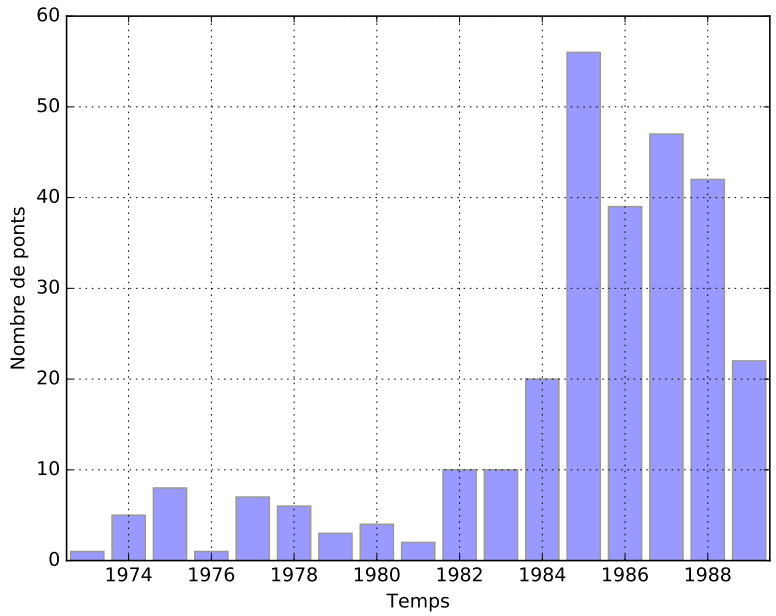

Figure 17 – Nombre d'installation de systèmes de protection cathodique par an (1973-1989) [47]

Seulement six des agences ayant répondu à l'enquête ont indiqué avoir suivi des normes pour la conception et/ou des recommandations de construction encadrant l'utilisation de PC des structures en béton armé. La conception est d'ailleurs le plus souvent réalisée par le personnel des agences s'appuyant parfois sur des consultants [47].

Cette étude met en avant les systèmes de protection cathodique les plus utilisés. Les trois plus utilisés consistent en des anodes surfaciques : treillis en titane, zinc projeté à l'arc et revêtements conducteurs. Concernant l'utilisation d'une telle protection en environnement maritime, il ressort qu'elle est installée lorsqu'une durée de vie de plus de 20 ans est souhaitée.

Parmi les États ayant une façade maritime, l'Oregon a beaucoup recours à la protection cathodique du béton armé. Il s'agit de l'État qui utilise le plus largement les systèmes de protection cathodique surfaciques, tel que le zinc projeté thermiquement. Ainsi il a mis en place un groupe de préservation des ponts qui a développé des recommandations pour la conception et l'application des systèmes de protection cathodique par projection thermique. Ce groupe a aussi fait tester d'autres types d'anode de surface. Il fait intervenir des consultants en corrosion, conjointement avec leurs équipes internes, pour la conception et pour s'assurer du contrôle de la qualité pendant l'installation. Le suivi et la maintenance sont quant à eux assurés par les équipes internes [47].

Sur ces ponts historiques, plusieurs souffrent de corrosion due à l'exposition à un environnement marin. En 1990, un premier pont historique a été protégé par PC, le pont de Cape Creek (ouvert en 1932). Entre 1988 et 2002, cinq ponts côtiers ont été protégés par PCCI utilisant comme anode du zinc projeté thermiquement. La surface totale traitée dépassait alors les 40 000 m^2 [48]. En 2009, on dénombrait 11 ponts historiques ayant fait l'objet d'une protection cathodique. Bien qu'il ne s'agisse que d'une faible proportion d'ouvrages, les surfaces protégées sont conséquentes [47].

Océan Pacifique Sud

Dans le port de Wellington, situé au sud de l'île nord de la Nouvelle-Zélande, le quai Seaview et sa jetée d'approche de 600 m ont dû être réparés. En effet, 20 ans après leur construction, les éléments coulés en place ont montré des signes typiques de pénétration des chlorures entraînant la corrosion des armatures. Un premier essai de protection cathodique a été mené en 1997, avec pour anode galvanique un revêtement de zinc projeté sous la poutre en béton. Les résultats n'ont pas été satisfaisants, car la protection ne conduisait qu'à une prolongation de durée de vie de 8 à 10 ans. Ainsi en 1999, un autre type d'anode a été utilisé, des anodes de titane en bande avec un suivi à distance et un système de contrôle avec des redresseurs locaux distribués sur l'ouvrage. Pour ce faire, le quai a été divisé en plusieurs zones majeures toutes alimentées et contrôlées par une unité locale de redresseurs, située en son voisinage. Pour le suivi de la protection, deux types d'électrodes de référence ont été utilisés, des électrodes Ag/AgCl et des électrodes en titane activé [49].

Mer de Chine Sud

Le quai d'accostage pour les porte-conteneurs de Hong-Kong, (figure 18), a été protégé par PCCI en utilisant comme anodes du treillis en titane, enrobées d'une couche de béton projeté [39].

Figure 18 – Anode treillis en titane sur le quai d'accostage à Hong Kong [39]

Détroit de Bass

Quatre ponts côtiers, sur la voie rapide de la région sud de Gippsland en Australie (région de Victoria), ont été protégés par une protection cathodique galvanique. L'anode, du zinc projeté, a été mise en place en chauffant dans un premier temps le zinc avant de le projeter sur les surfaces exposées à l'air. L'épaisseur du zinc après application était d'environ 0,5 mm. Le système a été conçu pour permettre son suivi ainsi que des déconnexions entre l'anode et les armatures et des mesures au niveau des électrodes de référence installées de façon permanente dans la structure [31].

À Portland, région de Victoria en Australie, un large quai a été réhabilité. Les poutres principales de 840 mm de large par 690 mm de profondeur, ont été protégées par courant imposé avec sept anodes rubans. La poutre de défense, fortement armée, d'épaisseur 600 mm, a été protégée sur ses deux côtés par un échantillon d'anodes discrètes, installées uniquement d'un côté, avec un espacement de 300 à 450 mm [31].

Baie de Philippe

Dans le port de Melbourne en Australie, des travaux de réparation du Swanson Dock ont été menés. Ce dock, servant à l'amarrage des porte-conteneurs, est constitué de deux quais d'environ 1 km de long, avec le quai ouest vieux de 30 ans.

La conception et les essais pour la PCCI ont débuté en 2007, l'installation a quant à elle eu lieu en 2008 et la mise en service début 2009. Trois zones du dock, dont deux en béton ont fait l'objet de la PC [50].

— Les poutres transverses des postes d'amarrage 3 et 4 soumises à la marée, en utilisant des anodes internes dans les zones à protéger des sections de poutres, situées en contact avec l'atmosphère et en zone de marnage.
— Les sections des poutres de défense des postes d'amarrage 1 et 2, en utilisant un système de protection cathodique à base de ruban en titane (figure 19).

FIGURE 19 – Conception initiale avec deux anodes ruban longitudinalement sur chaque face de la poutre (3 sur la base) [50]

Mer de Corail

Deux quais de la région de Queensland en Australie ont été protégés par des anodes galvaniques discrètes en zinc. Dans cette même région, les voies de grue des quais d'accostage des

porte-conteneurs à Brisbane et un peu plus au sud à Newcastle, sont protégées par protection cathodique par courant imposé, avec des anodes en ruban [31]. L'espacement des anodes varie de 140 à environ 300 mm, en fonction de la densité des armatures. Parmi les méthodes utilisées pour fixer les anodes à ces structures, il y a les anodes noyées dans une couche projetée, celles injectées dans des emplacements de forage et celles noyées dans une réparation projetée.

Deux quais situés à Townsville, région de Queensland en Australie, ont été protégés cathodiquement par courant imposé, avec des anodes en ruban pour prévenir la corrosion des aciers dans les zones de béton réparées et des anodes discrètes dans le centre des colonnes [31].

Golfe d'Hauraki

A Devonport, sur l'île nord de la Nouvelle-Zélande, les poutres précontraintes de la jetée d'accès Calliope, construite en 1982, ont été protégées par un système de PCCI. La difficulté sur ce type d'ouvrage vient du risque de fragilisation par l'hydrogène des torons d'acier tendus.

Compte tenu des différences de densité des aciers ainsi que du nombre de ligatures, et afin d'avoir une polarisation uniforme avec une densité de courant de 20 mA/m^2, les poutres ont été divisées en petites zones de protection cathodique. Le système d'anode utilisé consiste en des anodes en ruban Lida de type 1 (de largeur 20 mm avec un courant de sortie de 5,5 mA/m^2) et de type 2 (de largeur 10 mm avec un courant de sortie de 2,75 mA/m^2). Un essai a été réalisé sur la moitié d'une poutre, afin de vérifier le dimensionnement, et avant d'étendre la protection à toute l'installation.

Ainsi pour l'installation complète, 56 sous-zones ont été définies et 70 électrodes de référence Ag/AgCl ont été utilisées. La mise en place de la protection s'est achevée en mars 2007 [51].

Conclusion

Dans certains pays, depuis nombreuses années, la protection cathodique est beaucoup utilisée, en tant que traitement électrochimique de prévention / réparation du béton armé, avec une utilisation dans les premiers temps en environnement continental avant une utilisation en environnement maritime. C'est le cas de pays tels que la Norvège, l'Australie, les Pays-Bas. D'autres pays utilisent encore de tels systèmes dans le cadre de projet de recherche, tel que l'Allemagne ou certains États des États-Unis. Cette différence dans le niveau d'avancement du déploiement de ces techniques s'explique d'une part par le niveau de formation et de connaissance des personnels sur ce type de réparation et sur son suivi, et d'autre part par les synergies nationales qui peuvent donner lieu à la constitution de groupes d'experts sur le sujet (Norvège, Floride, etc).

Les exemples cités ci-dessus ne reflètent pas l'étendue des pays utilisant de tels systèmes, tous les pays ne pouvant être cités et ne publiant pas forcément sur le sujet ou alors pas forcément en anglais.

Il ressort toutefois de ces exemples que les anodes les plus utilisées sont des anodes surfaciques et que le recours à la protection cathodique galvanique est plus récent. Le courant imposé prend au fil des années de plus en plus d'ampleur.

En parallèle des applications opérationnelles, des chercheurs travaillent sur cette technique afin de la perfectionner ou alors pour développer de nouvelles anodes. Voici quelques exemples de thèmes de recherche :

- étude du vieillissement de différents types d'anodes (sur site et en laboratoire) [48] ;
- applicabilité des anodes sacrificielles immergées contre l'initiation de la corrosion dans les parties émergées des pieux en environnement maritime ainsi que détermination de la limite de hauteur au-dessus du niveau de la mer, jusqu'à laquelle une prévention peut être réalisée [52] ;
- étude des anodes d'alliage de magnésium, afin d'en évaluer les performances à long terme [53] ;
- étude de mortier conducteur comme anode pour la protection cathodique du béton contaminé par les chlorures [54] ;
- étude de la distribution des produits d'hydratation à l'interface acier-béton pour des bétons soumis à des traitements électrochimiques [55] ;
- simulation numérique pour évaluer jusqu'où les anodes sacrificielles immergées peuvent protéger (zone d'influence) [56].

2.2.2 En France

En France, l'utilisation de la protection cathodique du béton armé en environnement maritime est moins développée que dans certains autres pays, tels que la Norvège et les Pays-Bas. Il est ainsi plus difficile de trouver des exemples, la plupart correspondant à des cas isolés entre projet de recherche et réparation d'ouvrage. De plus, certaines entreprises en sont encore au stade de la capitalisation des savoirs et elles ne souhaitent donc pas communiquer sur leurs chantiers maritimes de protection cathodique.

Les ouvrages ci-dessous sont quelques exemples emblématiques ayant fait l'objet d'une telle protection :

- le pont de Noirmoutier, construit en 1970-1971, a vu plusieurs de ses piles réparées suite à l'apparition de fissures. Les parties de ses poutres situées en zone de marnage ont alors fait l'objet d'une protection par PCCI [57],
- un appontement de port 2000, du Port du Havre, a été protégé par anodes sacrificielles [58],
- le barrage de la Rance, construit de 1963 à 1966, a fait l'objet de premières réparations dans les années 1984-1985 du fait de la corrosion des armatures des poutres des ponts. Lors d'une inspection détaillée de 2004 et d'une visite sur site de une nouvelle dégradation des poutres a été constatée. Il a alors été décidé de les réparer et de les protéger par anodes galvaniques. La protection mise en place en 2007-2008 a consisté en une protection mixte avec 7 jours de ré-alcalinisation suivis de l'activation de la PCCG par anodes galvaniques à base de zinc [59],
- le terminal méthanier du Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire (GPMNSN), situé à Montoir de Bretagne et mis en service en 1980 a été réparé en 2000 : le béton situé sur ses plate-formes a été refait et ses armatures ont été protégées par PC [60].

Sur ces ouvrages, il n'y a pas ou peu de retours relatifs à l'utilisation et l'efficacité de la PC, la plupart ayant fait l'objet de communication plutôt aux étapes de projet et de travaux.

Cette faible utilisation de la protection cathodique du béton armé en milieu maritime peut s'expliquer par une prudence des maîtres d'ouvrages vis-à-vis de ces techniques. Parmi les raisons qui sont avancées par eux, on peut citer :

— mélange de génie civil et d'électrochimie ;
— compétences faibles des organismes en matière de techniques électrochimiques ;
— nécessité d'un suivi dans le temps contraignant et coûteux ;
— critères de performances complexes ;
— coût de l'installation ;
— absences de recommandations nationales, de certification.

Toutefois des nouveaux chantiers continuent de voir le jour, tels que le chantier expérimental du GPMNSN sur le poste charbonnier lancé en 2012, la réhabilitation des piles du pont de Saint-Nazaire qui devait débuter en 2014 ou encore l'audit de la PCCI des piles du pont de Noirmoutier.

2.3 Retour d'expérience sur l'utilisation de la protection cathodique en environnement maritime

Au travers des exemples d'utilisation de la protection cathodique de par le monde (§2.2.1), les auteurs des publications associées ont fait ressortir des avantages, des inconvénients et des points de vigilance concernant cette technique. Certains recensent également les causes de non fonctionnement des systèmes mis en place, ce qui peut être utile aux maîtres d'ouvrages pour en tenir compte lors de projet de protection cathodique.

Ce paragraphe présente ces différents éléments.

2.3.1 Avantages

Le principal avantage mis en avant par les utilisateurs de PC est la durée de vie de la réparation associée. En effet, ils considèrent que cette technique permet une réparation durable sans effet de pile (décalage du problème de corrosion dans la zone adjacente). Selon eux, cela conduit, à l'échelle du cycle de vie complet de l'ouvrage, à des diminutions des coûts d'entretien, de maintenance et de réparation.

Voici quelques exemples des autres avantages cités.

— La PC constitue, dans certains cas, une alternative à la démolition des ouvrages [61].
— Elle peut intervenir à tous les stades d'avancement du processus de corrosion (incubation et propagation) [61].
— Elle stoppe ou ralentit significativement la corrosion induite par les chlorures [61].
— Elle permet d'étendre la durée de vie de l'ouvrage avec des coûts de maintenance inférieurs à ceux des autres réparations, qui doivent être répétées [49].
— Elle permet l'enregistrement automatique des données. Ainsi, alors qu'en Norvège dans les 5 premières années, seulement 30 à 35 % des installations étaient équipées avec un enregistrement automatique des données, on est passé à 90 % en moyenne. Cette progression est due aux avancées technologiques aussi bien des systèmes que des

composants ainsi qu'à une prise de conscience de l'importance du suivi [32] et de la pérennité des connectiques.

— Lorsque la PC comprend un monitoring, elle peut offrir la possibilité d'un suivi et d'un contrôle à distance (intérêt de la télésurveillance) qui peut se traduire par une réduction des coûts sur le long terme [49].
— La PCCG permet de s'adapter à l'activité de corrosion des armatures, par la consommation de ses anodes. En effet, le courant sortant d'une anode de zinc galvanique correspond au courant de corrosion de l'acier dans le même environnement. Ainsi, un courant élevé passe lorsqu'il y a un risque de corrosion important et un courant faible passe lorsque le risque de corrosion de l'acier est faible [62].
— Après un minimum de 5 ans de PCCI et un arrêt de cette PC pour défaillance ou autre, l'acier reste passivé pour au moins 24 mois et ce malgré la présence de chlorures [63]. L'article de Grefstad va dans ce sens en indiquant qu'une PC peut ne plus fonctionner, sans pour autant qu'une nouvelle corrosion s'initie rapidement [61].

Certains auteurs ont comparé les avantages des deux types de PC. Cette comparaison est reprise dans le Tableau 3.

PCCI	PCCG
Bon retour d'expérience [39]	Simple par nature [39], avec une facilité d'installation [40] et une auto-régulation des besoins en courant [62] ; mais les courants restent faibles (au mieux le niveau de prévention de la PCCI)
Durée de vie des anodes plus importante [39]	Pas besoin d'être isolée électriquement des armatures [39]
Contrôle possible du courant [39], avec un courant de sortie ajustable [40]	Source de courant extérieure non nécessaire [40]
Peut être conçue pour atténuer la corrosion de la plupart des structures/environnements [40]	Peu de suivi et de maintenance [39],[40]
Pourrait potentiellement fournir une atténuation de la corrosion pendant toute la vie de la structure [40]	

Tableau 3 – Comparaison des avantages de la PCCI et de la PCCG

2.3.2 Inconvénients

En contrepartie des avantages, les techniques de PC présentent des inconvénients dont quelques exemples des différentes publications sont donnés ci-après.

— Elles nécessitent la mobilisation de plusieurs branches de métier (réparation traditionnelle du béton, instrumentation, électricité, etc.) et donc des compétences variées et notamment en électrochimie [61].
— Elles nécessitent un suivi de fonctionnement et d'efficacité dans le temps [61].

D'une manière générale, des précautions s'imposent lors de la conception du système de surveillance et il convient d'évaluer les limites de tension et de courant.

Les auteurs ont comparé les avantages des deux types de PC et les inconvénients. Ces comparaisons sont reprises dans le Tableau 4.

PCCI	PCCG
Nécessite un suivi et une maintenance [39],[40]	Durée de vie plus courte [39]
Isolation électrique nécessaire entre l'anode et les aciers [39], il peut y avoir des interférences entre la PCCI et les autres systèmes électriques [40]	Le courant délivré par l'anode est dépendant de la chimie de l'anode et de l'environnement de celle-ci, il ne peut être ni ajusté, ni contrôlé [39] [40]
Câblage nécessaire [39]	Densité de courant de sortie limitée [40]
Suivis et contrôles détaillés pour les bétons précontraints [39]	

Tableau 4 – Comparaison des inconvénients de la PCCI et de la PCCG

2.3.3 Causes de non fonctionnement

Deux études sur l'utilisation de la PC, celle relative à l'utilisation en Norvège [32] et celle relative à l'utilisation aux Pays-Bas [33], recensent les causes de non-fonctionnement des installations.

Sur les 175 installations commerciales de PCCI installées en Norvège entre 1989 et 2006, tous domaines confondus (quais, bâtiments d'habitation, bâtiments commerciaux, parking, ponts), 162 sont toujours en fonctionnement au 1er janvier 2007. Les causes du non fonctionnement des 13 autres installations sont les suivantes [32] :

- mauvais dimensionnement ;
- mauvaise qualité du travail : attention insuffisante aux détails et manque de contrôle qualité lors de l'assemblage (discontinuité électrique de la cage d'armatures par exemple) ;
- mauvais système : utilisation d'anodes inappropriées ;
- inspection/suivi : insuffisance du régime de surveillance pour la détection précoce des anomalies.

Dans l'étude sur la PC (PCCI et PCCG) aux Pays-Bas [33], une distinction est faite entre les systèmes installés avant 2001 et ceux installés après 2001, concernant les causes éventuelles de non fonctionnement. Le recensement réalisé montre ainsi que par le passé il y avait plus de cas de défaillance dus à des problèmes de connexions (5 avant 2001 contre 1 depuis 2001), de même pour les unités d'alimentation (8 avant 2001 contre 1 après 2001) et également les anodes primaires étaient endommagées plus fréquemment. Toutefois concernant les endommagements d'anode locale, ils semblent plus importants sur les nouveaux systèmes. Ce dernier point est expliqué dans la publication par l'utilisation de la PC de manière plus importante ces dernières années pour les ponts, donc dans des environnements plus agressifs. Sur les autres points, des efforts ont donc été réalisés par les entreprises pour améliorer les produits utilisés. Il faut toutefois souligner qu'une étude menée sur dix structures en béton armé et consistant à interrompre le courant de protection apporté par la PCCI, a conclu qu'après un minimum de 5 ans de PCCI et l'arrêt de la PC pour défaillance ou autre, l'acier reste passivé pour au moins 24 mois et ce malgré la présence de chlorures et donc le risque de corrosion [63].

2.3.4 Points de vigilance d'après les auteurs

Plusieurs publications tirent des recommandations de leurs retours d'expérience.

Concernant la conception et le dimensionnement du système de protection cathodique

- Les anodes et la configuration dans laquelle elles seront utilisées doivent être sélectionnées, dimensionnées et installées en accord avec les meilleures pratiques et le système exploité, dans des plages de fonctionnement sûres [47].
- Aux extrémités des systèmes de PC, correspondant souvent aux extrémités des ouvrages, la protection envisagée peut être sous-évaluée. Il est donc nécessaire de faire attention à ces zones, et de vérifier le dimensionnement par un essai de convenance [50].
- Il faut tenir compte des difficultés d'installation dans les zones de béton fortement armées et soumises aux marées [50].
- Il est important que le système de PC ne soit pas traité seul, mais plutôt en le considérant en lien avec les autres systèmes électriques de la structure [40]. En effet, cela peut amener à une protection inadéquate des armatures, ou à des interférences par exemple entre le redresseur et les autres systèmes électriques [47]. C'est le cas par exemple d'un système de PCCI installé sur un pont du New Jersey qui n'a pas fonctionné pour contrôler la corrosion, car les concepteurs n'avaient pas, dans leur dimensionnement, considéré la présence de formes métalliques ondulées dans le bas du tablier. Compte tenu de leur importante surface de contact, une majorité du courant de la PC a été reçue par les formes ondulées et une quantité insuffisante a été reçue par l'armature [47].
- Le test de conception initiale, également appelé essai de convenance, est primordial. Il peut amener à des changements importants dans la conception [50].
- Les tests adéquats du système de PC peuvent prendre du temps et nécessiter des modifications et des mises en service et suivis répétés [50].
- Il est important d'avoir un protocole pour la sélection et l'utilisation des systèmes de PC sous forme de recommandations nationales par exemple [40].
- En complément à un bon dimensionnement, un cahier des charges précis est nécessaire pour l'installation [47] et pour le suivi.
- La conception devrait également inclure une sélection attentive du placement des redresseurs et une protection contre la foudre et le vandalisme [47].
- Il faudrait que le remplacement de l'unité d'alimentation et de l'unité de suivi par les systèmes d'un autre fournisseur soit aisé dans le cadre d'un changement de contrat de maintenance [61].

Concernant l'installation du système de protection cathodique

- Il faut s'assurer de la qualité des câbles, des travaux de câblage, des rainures de câblage, des systèmes de marquage et d'identification et des schémas de montage [61].
- Quand des systèmes d'anode en treillis ou en ruban sont utilisés et qu'ils sont recouverts de béton projeté ou alors quand des revêtements conducteurs sont utilisés, il faut s'assurer de l'adhérence au substrat [61].

— Dans le processus d'installation du système de PC doit être inclus un système d'assurance et de contrôle de la qualité [47].
— Un programme de test rigoureux doit être exigé pour s'assurer qu'il n'y ait pas de courts-circuits, en particulier dans les systèmes à courant imposé [47].

Concernant le suivi du système de protection cathodique

— D'après les réponses au questionnaire de l'étude sur la PC aux États-Unis [47], les éléments du système de PC demandant le plus de maintenance sont le redresseur, les câbles et les fils.
— Dans la plupart des expériences ayant entraîné la défaillance du système de PC, celle-ci est le résultat d'une surveillance et d'une maintenance insuffisantes [47].
— Le contractant qui réalise l'installation doit être responsable du fonctionnement de l'installation pour au moins 10 ans (garantie) comprenant notamment la gestion des anomalies, qui pourraient survenir au cours de cette période. Le gestionnaire doit également avoir la possibilité de vérifier si l'installation fonctionne correctement à tout moment au cours de cette période [61].
— Dans des zones où le béton a été réparé, par exemple, par béton projeté, la dépolarisation peut être plus lente. L'auteur émet l'hypothèse que ceci est probablement dû au procédé par voie sèche, très dense et également que cela peut être dû à une réparation trop récente, sous-entendu, une cure non achevée [50].
— Le marché de réhabilitation doit inclure un contrat de maintenance. L'étude australienne [49] recommande un contrat de 2 ans. Aux Pays-Bas, des contrats de maintenance entre l'entreprise installant la PC et les maîtres d'ouvrages couvrent généralement une période de 10 ans et comprennent des vérifications de routine ainsi que le remplacement des composants de l'installation défaillants [33].
— Il est important d'avoir un protocole pour le stockage des données de suivi de la PC et leur exploitation [40].

Concernant les anodes et les autres matériaux et matériels du système de protection cathodique

— La performance et la qualité des matériaux des anodes sont cruciaux pour un succès global des systèmes de PC [47].
— Les unités d'alimentation et de suivi (contrôle) doivent être fabriquées et entretenues par une entreprise spécialisée [61].

Concernant le personnel intervenant sur le système de protection cathodique

— Le contractant doit avoir un bon système qualité, une personne responsable de la qualité et de la documentation relative à la construction sur site. Cela doit être décrit précisément dans les documents d'appel d'offres [61].
— Un système de PC doit être conçu, installé et pris correctement en charge par un personnel expérimenté au cours de la période de service (en interne ou externalisé) [61].

— Une communication adéquate entre les consultants pour la conception, leurs sous-traitants et les entreprises en charge de la construction et leurs sous-traitants est primordiale [40].
— Il est impératif d'avoir des personnes ayant les connaissances, les qualifications nécessaires et de l'expérience pour décider du système de PC [47].

2.3.5 Cas particulier des ouvrages précontraints

Comme cela a été présenté succinctement dans le paragraphe 2.2.1, une attention particulière doit être portée aux structures pré ou post-contraintes, afin d'éviter leur sur-protection et l'emprisonnement d'hydrogène conduisant à une fragilisation de l'acier. Certaines recommandations préconisent, à ce titre, d'éviter l'utilisation d'anodes discrètes ou d'anodes en bande dans les structures précontraintes par post-tension [28]. Ainsi, la conception d'un système de PC pour un ouvrage précontraint nécessite plus de prudence, notamment en ce qui concerne la densité de courant, l'espacement des anodes, la délimitation des zones et le nombre de capteurs pour la surveillance [51].

Toutefois dans le cas de la PCCG, l'un des avantages cités, du fait de la densité de courant faible, concerne le risque réduit de fragilisation des armatures de précontrainte par l'hydrogène [39].

3 Recommandations relatives à l'utilisation de la protection cathodique pour les ouvrages maritimes en béton armé

Pour prévenir les risques de corrosion, la première des recommandations consiste à définir un enrobage et une qualité de béton suffisants pour garantir la durée de vie attendue au regard de l'agressivité de l'environnement considéré [64], [65], [66], [5], [18]. Le soin porté à l'étanchéité est un des autres points clés pour la durabilité de l'ouvrage. Sur les ouvrages existants dégradés ou soumis à un risque de corrosion, ces recommandations sont vaines et il est alors nécessaire de déployer des techniques de réhabilitation qui permettent de limiter la corrosion des armatures à une corrosion résiduelle et ce pour une durée la plus longue possible.

Dans ce contexte, les différents exemples issus de la revue bibliographique montrent la faisabilité de l'utilisation d'une protection cathodique des structures en béton armé situées en environnement maritime. Toute chose égale par ailleurs (respect des règles de l'art), il semble que ce soit la technique de réhabilitation la plus durable. Cependant, son coût initial s'avère plus important qu'une réparation classique. Il convient donc lors de la comparaison financière des différentes solutions possibles de réparation, de considérer les coûts non pas uniquement de la réparation, mais également du suivi et de la maintenance, c'est-à-dire raisonner en termes de coûts sur la durée de vie totale de l'ouvrage [47]. En complément, d'après Sohanghpurwala [47], le marché actuel de réhabilitation par protection cathodique n'est pas suffisant pour générer de la compétitivité et de l'innovation. Considérant que les besoins en matière de réhabilitation sont avérés et importants, il convient donc d'après lui de sensibiliser, informer et rassurer les maîtres d'ouvrages gestionnaires vis-à-vis de ces techniques (certification, formations, chantiers tests, recommandations, normes, etc.). Ainsi il considère que la démocratisation de ces techniques devrait conduire à une réduction des coûts, à des innovations et des améliorations techniques.

3.1 Choix du type de protection cathodique

Dans leurs domaines d'application respectifs, les deux types de protection cathodique conviennent à l'environnement maritime. L'utilisation de la PCCG est plus récente, donc avec un recul moindre, même si elle présente de bons résultats. Le choix entre ces deux types de protection nécessite d'avoir les informations adéquates, à commencer par un diagnostic complet, comprenant une reconnaissance du ferraillage (position et densité d'armatures) ainsi que des mesures de teneur en chlorures, de potentiel, de résistivité et de vitesse de corrosion. Il faut que les contraintes du site en termes d'accessibilité et d'environnement soient considérées. Des lacunes sur ces points pourraient avoir des conséquences sur le montage et la conduite des marchés de réparation et *in fine* sur l'efficacité de la réparation. En effet, cela pourrait entraîner un choix erroné de protection (type de protection, densité de courant, positionnement de la protection) avec des surcoûts éventuels. Il convient par exemple d'appliquer la méthodologie de sélection décrite dans le guide de l'AFGC [11] comprenant quatre étapes : le diagnostic, les exigences et les contraintes, l'étude technico-économique et la mise au point du marché de réparation.

La distinction principale entre ces deux techniques, hormis la nécessité pour la PCCI d'avoir une source de courant à proximité, est le courant délivré par l'installation. Ce dernier s'avère beaucoup plus élevé pour la PCCI donc potentiellement plus adapté à des ouvrages étant dans un environnement maritime sévère avec des teneurs en chlorures très élevées et une activité

de corrosion avérée. Toutefois, les publications citées dans ce rapport ne donnent ni de critères de choix entre une PCCI et une PCCG, ni de démarche de choix de la densité de courant pour une réparation donnée.

3.2 Suivi

Il ressort de la bibliographie réalisée que le point le plus critique pour avoir une PC en état de fonctionnement est son suivi. Dans une première phase, après la mise en place de la protection, il est préconisé que le suivi soit effectué par l'entreprise ayant réalisé l'installation. Cela permet à l'entreprise de vérifier le système qu'elle a mis en place et également de revoir l'installation si besoin. La durée pendant laquelle ce suivi doit être réalisé par l'entreprise installatrice varie selon les recommandations des auteurs, cependant un minimum de 2 à 3 ans semble primordial.

Le suivi dans le temps de la protection, à réaliser au minimum tous les ans, voire dans les premiers temps, plusieurs fois par an, doit permettre de vérifier l'efficacité du système, d'évaluer sa durabilité, et d'assurer sa maintenance. Ce suivi nécessite du personnel qualifié qui doit avoir été formé. De plus, un relais doit être assuré entre l'entreprise en charge de la protection cathodique et de la première phase de suivi, et le gestionnaire en charge du suivi ultérieur. Dans le cas où le maître d'ouvrage – gestionnaire n'est pas en mesure d'assurer ce suivi (par manque de moyens humains ou de compétences), il convient de prendre en considération le coût d'un suivi externalisé lors des pré-études.

Ce suivi, qui pour le maître d'ouvrages gestionnaire constitue une contrainte forte, est dorénavant facilité par l'avancée des technologies utilisées : acquisition de données en continu, récupération des données et programmation à distance.

3.3 Qualité de réalisation de la Protection Cathodique (PC)

D'autres points nécessitent d'être traités avec attention par le maître d'ouvrage.

Il faut qu'il s'assure que l'entreprise en charge des travaux soit compétente dans le domaine, qu'elle ait déjà réalisé de telles protections. Elle doit être en mesure de fournir ses procédures d'exécution. Elle doit inclure au plan qualité tous les éléments nécessaires dont voici quelques exemples : les plans avec les zones protégées, le plan de détail du câblage, la notice définissant le type d'anode et la mise en place de ces anodes, le phasage précis des opérations, les caractéristiques et la mise en place des appareils de contrôle et de mesure.

Les systèmes d'anode utilisés doivent être des systèmes déjà testés et utilisés, sur lesquels il y a un recul suffisant ou alors une expérience prototype doit être réalisée (innovation).

Lors de la préparation des armatures, la norme NF EN 12696 [28] préconise qu'aucun primaire, ni revêtement isolant ou résistif ne soit utilisé.

Pour s'assurer du bon fonctionnement de l'installation, il paraît incontournable d'avoir des électrodes de référence. De plus, des mesures de température et d'humidité relative devraient pouvoir être réalisées sur l'ouvrage grâce à des capteurs, permettant une acquisition en continu lors des contrôles de la PC.

Enfin, pour vérifier le dimensionnement il est primordial qu'un test de conception initial soit réalisé. Ce test, également appelé essai de convenance, amène très souvent l'entreprise à revoir son dimensionnement, notamment pour mieux prendre en compte les extrémités des ouvrages.

3.4 Perspectives

Les publications citées dans ce rapport ne couvrent pas toutes les interrogations possibles. Parmi celles pour lesquelles des précisions manquent, on peut citer les suivantes :

- Des éléments relatifs aux spécificités du milieu maritime et à la présence de chlorures dans le béton.
- L'effet du marnage sur le fonctionnement ou la performance de la protection.
- Le comportement / la durabilité des anodes, de la protection et de l'installation dans un milieu riche en chlorures.
- Les perturbations / parasitages, avec la protection cathodique, des pieux métalliques ou des rideaux de palplanches.
- Le dimensionnement de la protection distinguant la zone de marnage et la zone d'embruns.
- La simulation numérique.

Ces points sont donc des pistes à creuser afin d'améliorer la connaissance de l'utilisation d'une telle technique en environnement maritime.

Bibliographie

[1] TUUTTI K. : *Corrosion of steel in concrete.* Swedish and Cement and Concrete Institute, Stockholm, 1982.

[2] J. BARON et OLLIVIER J.P. : *La durabilité des bétons.* Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 2002. 453 p.

[3] I. VERVISCH FORTUNÉ : *Sensibilité de la technique d'émission acoustique à la corrosion des armatures dans le béton.* Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

[4] CHAUSSADENT T. : *État des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé.* Numéro 29 de Ouvrages d'art. Études et recherches des LPC, 1999. 80 p.

[5] AFNOR : *NF EN 206-1, Norme : Béton – Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité*, avril 2004.

[6] F. DEBY : *Approche probabiliste de la durée des bétons en environnement marin.* Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

[7] F. DE LARRARD : *Construire en béton : L'essentiel sur les matériaux.* Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 2002. 197 p.

[8] U. ANGST, B. ELSENER et C.K. LARSEN : Critical chloride content in reinforced concrete – a review. *Cement and Concrete Research*, 39(12):1122–1138, 2009.

[9] CETMEF. *Réparation des bétons altérés. Rapport du département multimodalité du CETMEF*, septembre 2011. 62 p.

[10] B. THAUVIN : Choix des réparations. Formation PFC, Paris, 13 et 14 novembre 2012.

[11] AFGC – CEFRACOR : Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion. documents scientifiques et techniques. Rapport technique, AFGC – CEFRACOR, novembre 2003.

[12] STRRES. *Reprise des bétons dégradés. Guide n°1 FABEM.*, juin 2008. 469 p.

[13] H. AL HAJJAR : *Applicabilité et efficacité d'une protection galvanique aux aciers de précontrainte.* Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.

[14] AFNOR : *NF EN 1504-2, Norme : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 2 : systèmes de protection de surface pour le béton*, avril 2005.

[15] AFNOR : *NF EN 1504-10, Norme : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 10 : application sur site des produits et systèmes et contrôle de la qualité des travaux*, avril 2004.

[16] AFNOR : *NF P95-101, Norme : Ouvrages d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Reprise du béton dégradé superficiellement - Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés*, novembre 1993.

[17] AFNOR : *NF P95-107, Norme : Ouvrages d'art - Réparation et renforcement des maçonneries - Spécifications relatives aux techniques et aux matériaux utilisés*, avril 2002.

[18] MEFE MEEDDAT : *Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux. Fascicule n°65 : Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou précontraint. Document annexé à l'arrêté du 30 mai 2012*, 2012. 289p.

[19] A. RAHARINAIVO, G. GRIMALDI, G. ARLIGUIE, T. CHAUSSADENT, V. POLLET et TACHE G. : *La corrosion et la protection des aciers dans le béton.* Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1998. 168 p.

[20] G.P. TILLY et J. CONREPNET JACOBS : *Concrete repairs – Performance in service and current practice.* IHS BRE Press, United Kingdom, 2007.

[21] LCPC-SETRA. *Protection des bétons par application de produits à la surface du parement*, décembre 2002. 104 p.

[22] AFNOR : *GA P18-902, Guide d'application : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Recommandations pour la sélection des systèmes de protection de surface des bétons destinés aux ouvrages de génie civil*, mai 2004.

[23] AFNOR : *NF EN 1504-3, Norme : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, exigences, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 3 : réparation structurale et réparation non structurale*, février 2006.

[24] AFNOR : *NF P95-103, Norme : Ouvrages d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Traitement des fissures et protection du béton - Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés*, juin 2014.

[25] AFNOR : *FD CEN/TS 14038-1, Fascicule de documentation : Ré-alcalinisation électrochimique et traitements d'extraction des chlorures applicables au béton armé. Partie 1 : Ré-alcalinisation*, janvier 2005.

[26] MIETZ J. : Electrochemical realkalisation for rehabilitation of reinforced concrete structures. *Material and Corrosion*, 46:527–533, 1995.

[27] *BSI.DD CEN/TS 14038-2, Norme : Traitements électrochimiques de réalcalinisation et d'extraction de chlorures applicables au béton armé. Extraction de chlorures*, Février 2011.

[28] AFNOR : *NF EN ISO 12696, Norme : Protection cathodique de l'acier dans le béton*, février 2017.

[29] CEFRACOR. *Anodes galvaniques pour le traitement de la corrosion des armatures des constructions en béton*, documents scientifiques et techniques cefracor dst 2012/1 édition, 2012. 42 p.

[30] AFNOR : *NF EN 15257, Norme : Protection cathodique – Niveaux de compétence et certification du personnel en protection cathodique*, mars 2007.

[31] A.R. BIRD, M.P. COPE et A. RIX : Repair and maintenance of marine structures by cathodic protection. Disponible sur : http://www.marineandcivil.com.au/CP-in-Marine-Structures.pdf (consulté le 14.03.2013).

[32] C. NERLAND, J. ERI, K.A. GREFSTAD et O. VENNESLAND : 20 years of cathodic protection of reinforced concrete structures in norway – facts and figures from 160+ installations. *In Eurocorr* [77].

[33] R.B. POLDER, G. LEEGWATER, D. WORM et W.M.G. COURAGE : Service life and life cycle cost modelling of cathodic protection systems for concrete structures. *In International Congress on Durability of Concrete* [78].

[34] M. BRUNS et M. RAUPACH : Kathodischer korrosionsschutz am eider-sperrwerk als barriere gegen makroelementkorrosion. *Restoration of Buildings and Monuments*, 15(5):355–366, 2009.

[35] ROSENBOM K. MORK J.H., MAYER S. : Cathodic protection of reinforcement in concrete. *In Eurocorr* [77].

[36] FREYSSINET : Terminal de south hook, la force d'une offre de groupe, sols & structures. *Le magazine du groupe Freyssinet*, 225, premier semestre 2007. 22-23.

[37] STRIBY L. : La protection cathodique de la digue flottante par anodes sacrificielles : diagnostic du dispositif. Club ouvrages maritimes - Compte-rendu de la réunion du 22 juin 2005 au Port de Monaco. pp. 14-18.

[38] ELALOUI N. : Digue de protection en caissons préfabriqués en béton armé. *In XIIèmes journées nationales génie côtier – génie civil*, Cherbourg, 2012.

[39] S.F. DAILY : Using cathodic protection to control corrosion of reinforced concrete structures in marine environments. *In Australasian corrosion association conference*, Sydney, New South Wales, Australia, 1999. 7p.

[40] S.R. SHARP et M.C. BROWN : Survey of cathodic protection systems on virginia bridges. research report - final report vtrc 07-r35, Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, 2007. 40 p.

[41] FREYSSINET : *Rapport annuel*, 2006. 24 p.

[42] J. COSTA, M. RESTLY et C. LEON : Controlling corrosion on the la unidad bridge in campeche, mexico. *Concrete Repair Bulletin*, pages 14–16, January/February 2009.

[43] ELECTRO TECH CP. : Galvanic cathodic protection of la unidad bridge. *Concrete repair bulletin*, pages 36–38, november/december 2009.

[44] J. SPRIESTERSBACH, A. MELZER, J. WISNIEWSKI et et AL. : 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. *In Eurocorr* [79].

[45] FREYSSINET : Soils & structures. *The Freyssinet group magazine*, 218, september/december 2003. 20 p.

[46] FOSROC : Understanding steel corrosion in structures and buildings. Plaquette commerciale.

[47] A.A. SOHANGHPURWALA : Cathodic protection for life extension of existing reinforced concrete bridge elements. a synthesis of highway practice. Rapport technique, National Cooperative Highway Research Program Synthesis 398, 2009.

[48] S.D. CRAMER, Jr. B.S. COVINO, S.J. BULLARD, G.R. HOLCOMB, J.H. RUSSELL, F.J. NELSON, H.M. LAYLOR et S.M. SOLTESZ : Corrosion prevention and remediation strategies for reinforced concrete coastal bridges. *Cement & Concrete Composites*, 24:101–117, 2002.

[49] KOOISTRA B. LAWSON M., LATHAM D. et AL. : Seaview wharf : A concrete cp case study. *In Seaview wharf : A concrete CP case study* [80].

[50] I. GODSON : Cathodic protection to swanson dock west in melbourne. *Concrete in Australia*, 36(3):45–53, 2010.

[51] I. GODSON et Z. LOURENCO : Impressed current cathodic protection of prestressed concrete including case study of calliope access jetty in new zealand. *In Eurocorr* [77].

[52] L. BERTOLINI, M. GASTALDI, M.P. PEDEFERRI et E. REDEALI : Prevention of steel corrosion in concrete exposed to seawater with submerged sacrificial anodes. *Corrosion Science*, 44(7):1497–1513, 2002.

[53] G.T. PARTHIBAN, T. PARTHIBAN, R. RAVI, V. SARASWATHY, N. PALANISWAMY et V. SIVAN : Cathodic protection of steel in concrete using magnesium alloy anode. *Corrosion Science*, 50:3329–3335, 2008.

[54] L. BERTOLINI, F. BOLZONI, T. PASTORE et P. PEDEFERRI : Effectiveness of a conductive cementitious mortar anode for cathodic protection of steel in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(4):681–694, 2004.

[55] J.S. REOU et K.Y. ANN : The distribution of hydration products at the steel-concrete interface for concretes subjected to electrochemical treatment. *Corrosion Science*, 52: 2197–2205, 2010.

[56] L. BERTOLINI et E. REDAELLI : Throwing power of cathodic prevention applied by means of sacrificial anodes to partially submerged marine reinforced concrete piles : Results of numerical simulations. *Corrosion Science*, 51:2218–2230, 2009.

[57] A. RAHARINAIVO : Les méthodes électrochimiques appliquées au diagnostic et à la réhabilitation du béton armé concerné par la corrosion. *ERLPC, Ouvrages d'art OA 51*, juin 2005.

[58] GAUTHIER C. : Réparation d'un appontement au port du havre. *In Rencontre CEFRACOR n°14*, Paris, 2012.

[59] CONSEIL GENERAL 35 : Cctp pont routier du barrage de la rance.

[60] P. PÉCHON, S. HENDRICKX, O. MARCEL, O. MARCEL, R. LE BLEENNEC et BOUVIER : Adaptation of a receiving terminal to new operation conditions. *In LNG Conference* [81], page 8.

[61] K.A. GREFSTAD : Cathodic protection applied on norwegian concrete bridges. experiences and recommendations. *In Eurocorr* [82].

[62] S.P. HOLMES, G.D. WILCOX, P.J. ROBINS, G.K. GLASS et A.C. ROBERTS : Responsive behaviour of galvanic anodes in concrete and the basis for its utilisation. *Corrosion Science*, 53:3450–3454, 2011.

[63] C. CHRISTODOULOU, G. GLASS, J. WEBB, S. AUSTIN et C. GOODIER : Assessing the long term benefits of impressed current cathodic protection. *Corrosion Science*, 52:2671–2679, 2010.

[64] AFNOR : *NF EN 1990/A1/NA, Norme : Eurocode – Base de calcul des structures – Annexe nationale à la NF EN 1990/A1 :2006*, décembre 2007.

[65] AFNOR : *NF EN 1992-1-1, Norme : Eurocode 2 – Calcul des structures en béton – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments*, octobre 2005.

[66] AFNOR : *NF EN 1992-2, Norme : Eurocode 2 – Calcul des structures en béton – Partie 2 : Ponts en béton – Calcul et dispositions constructives*, mai 2006.

[67] AFNOR : *NF EN 1504-1, Norme : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 1 : définitions*, décembre 2005.

[68] AFNOR : *NF EN 1504-4, Norme : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 4 : collage structural*, mars 2005.

[69] AFNOR : *NF EN 1504-5, Norme : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, exigences, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 5 : produits et systèmes d'injection du béton*, juillet 2013.

[70] AFNOR : *NF EN 1504-6, Norme : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, exigences, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 6 : ancrage de barres d'acier d'armature*, novembre 2006.

[71] AFNOR : *NF EN 1504-7, Norme : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 7 : protection contre la corrosion des armatures*, novembre 2006.

[72] AFNOR : *NF EN 1504-8, Norme : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 8 : maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité*, mars 2005.

[73] AFNOR : *NF EN 1504-9, Norme : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Définitions, exigences et maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 9 : principes généraux d'utilisation des produits et systèmes*, novembre 2008.

[74] AFNOR : *NF P95-102, Norme : Ouvrages d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Béton projeté - Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés*, avril 2002.

[75] AFNOR : *NF P95-104, Norme : Ouvrages d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Spécifications relatives à la technique de précontrainte additionnelle*, décembre 1992.

[76] AFNOR : *NF P95-106, Norme : Ouvrages d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Spécifications relatives aux fondations des ouvrages*, août 1993.

[77] *Eurocorr*, 2007.

[78] *International Congress on Durability of Concrete*, 2012.

[79] *Eurocorr*, Aachen, 1999.

[80] *Coasts & Ports Australasian Conference*, 2003.

[81] *LNG Conference*, 2001.

[82] *Eurocorr*, 2005.

Tables et listes

Table des figures

1 Diagramme potentiel-pH simplifié du fer à 25°C, en solution aqueuse, pour une concentration molaire d'ions Fe^{2+} de 10^{-2} mol/l 5
2 Schéma des étapes de la corrosion (Tuutti [1]) 6
3 Sélection des techniques de réparation [10] 9
4 Schéma du phénomène de macro-piles [10] 10
5 Principe de la protection cathodique par courant imposé pour le béton armé [29] 15
6 Échelle des potentiels des couples oxydo-réducteurs OH^-/O_2,H_2O, Fe/Fe^{2+} et Zn/Zn^{2+} 15
7 Principe de la protection cathodique par courant galvanique pour le béton armé [29] 16
8 Nombre de structures avec PC aux Pays-Bas par année d'installation [33] 21
9 Pont d'Öland [35] 22
10 Système d'enveloppe sur les pieux en Floride [39] 23
11 Anode de zinc adhésive appliquée sur la pile d'un pont en Floride [39] 23
12 Ponts de Virginie situés en environnement maritime : pont de Willoughby (à gauche), pont-tunnel Hampton roads (au milieu) et pont de View Street (à droite) [40] 24
13 Application d'une anode Al-Zn-In à l'arc sur la pile d'un pont au Texas [39] . . . 25
14 Pont La Unidad - Installation complète du système de PC avec une enveloppe et du zinc métallisé [42] 25
15 Port d'Honningsvag [35] 26
16 Construction en béton dans le golfe Arabique un an et demi après réparation (1999) [44] 26
17 Nombre d'installation de systèmes de protection cathodique par an (1973-1989) [47] 27
18 Anode treillis en titane sur le quai d'accostage à Hong Kong [39] 28
19 Conception initiale avec deux anodes ruban longitudinalement sur chaque face de la poutre (3 sur la base) [50] 29

Liste des tableaux

1 Essais à réaliser lors des contrôles de la PCCG 19
2 Périodicité des mesures pour les contrôles de suivi de la PCCG 19
3 Comparaison des avantages de la PCCI et de la PCCG 33
4 Comparaison des inconvénients de la PCCI et de la PCCG 34

© 2018 - Cerema

Le Cerema, l'expertise publique pour le développement et la cohésion des territoires
Le Cerema est un établissement public qui apporte un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre d'études et d'expertise, il a pour vocation de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au cœur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, organismes de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Cet ouvrage a été imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement (norme PEFC) et fabriqué proprement (norme ECF).
impression : Jouve 01 44 76 54 40
Coordination-Maquettage : Service éditions Cerema Eau, mer et fleuves
Achevé d'imprimer : Mars 2018
Dépôt légal : Décembre 2017
ISBN : 978-2-37180-240-7
ISSN : 2417-9701
Prix : 37 euros
Illustration couverture ou crédits photos : Poutre repiquée © Grand Port Maritime de Guadeloupe

Editions du Cerema
Cité des mobilités,
25 avenue François Mitterrand
CS 92803
69674 Bron Cedex

Cerema Eau, mer et fleuves
Service Qualité Édition
134 rue de Beauvais
CS 60039
60280 Margny-Lès-Compiègne

www.cerema.fr

La collection « Connaissances » du Cerema

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

Protection cathodique du béton armé

Retour d'expérience

Les ouvrages ou les parties d'ouvrage en béton armé immergés dans l'eau de mer, soumis à la marée ou aux éclaboussures, sont fortement exposés à la corrosion, du fait de la carbonatation, mais surtout de la pénétration des chlorures dans les interstices du béton d'enrobage des armatures en acier. La protection cathodique est une des techniques de protection des armatures. Son principe consiste à porter le potentiel du métal à un niveau dit de passivation, en utilisant une anode installée dans le même électrolyte. Elle peut être appliquée soit en préventif pendant la phase d'incubation, soit en protection lors de la phase de propagation de la corrosion. De divers retours d'expérience de son application à des ouvrages en béton armé dans le monde et en France, quelques enseignements sont tirés.

Sur le même thème

Altération du béton en site maritime cetmef octobre 2011.

Réparation des bétons altérés cetmef octobre 2011.

Guide d'utilisation du béton en site maritime cetmef avril 2008.

La protection cathodique des aciers dans le béton « atmosphérique » cerema mars 2017.

Aménagement et développement des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

Prix 37€
ISSN : 2417-9701
ISBN : 978-2-37180-240-7

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement - www.cerema.fr
Cerema Eau, mer et fleuves - 134, rue de Beauvais CS 60039 - 60280 Margny Lès Compiègne - Tél. : +33 (0)3 44 92 60 00
Siège social : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél. : +33 (0)4 72 14 30 30