

TRAITEMENTS ÉLECTROCHIMIQUES DE RÉHABILITATION DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ DÉGRADÉS PAR CORROSION

Véronique BOUTEILLER

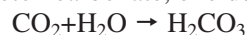
Chargée de Recherches, Université Paris Est, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées,
58 bd Lefebvre 75015 paris, France, veronique.bouteiller@lcpc.fr

1. LA CORROSION DES ARMATURES DANS LES BÉTONS

Afin d'augmenter la résistance à la traction des bétons, des armatures ont été intégrées. Les armatures habituellement utilisées sont en acier au carbone. Dans un béton sain, les armatures sont passivées car elles sont dans un environnement fortement alcalin (diagramme potentiel-pH du fer de Pourbaix). Toutefois cette situation dans le début de la vie d'un ouvrage en béton armé va évoluer : les armatures peuvent progressivement se corroder en raison, soit du phénomène de carbonatation, soit de la pénétration des ions chlorure soit enfin du mélange des deux. La corrosion est la première cause de dégradation des structures en béton armé. Lorsque le fer s'oxyde, les produits de corrosion formés occupent un volume plus important ce qui engendre la fissuration du béton. Les agressions par carbonatation et/ou par ions chlorure sont alors facilitées et le phénomène de corrosion s'amplifie ce qui peut conduire à l'éclatement du béton et à la mise à nu des armatures. La perte de section des armatures corrodées nécessite le re-calcul de la capacité portante de l'ouvrage et pose, par conséquent, la question de la durée de vie de l'ouvrage.

1.1. La corrosion par carbonatation

Le caractère basique d'un béton dépend de sa teneur en portlandite ou hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). La consommation de la portlandite qui réagit avec le dioxyde de carbone atmosphérique pour donner du carbonate de calcium et de l'eau (Eq. 1) va conduire à une diminution du pH. La valeur de pH d'un béton sain est égale à 13 alors que pour un béton carbonaté, elle devient voisine de 9.



puis $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O}$ Equation 1
Dans ce nouvel environnement, les armatures ne sont plus passivées et la corrosion va pouvoir démarrer.

Dans ce cas de figure, la corrosion est de type « généralisée » et des pertes de section d'armature peuvent être calculées.

La carbonatation répond à une loi de diffusion telle que $dx/dt = D_0/x$ avec x la distance, t le temps, et D_0 le coefficient de diffusion (une constante).

Les facteurs qui peuvent retarder la carbonatation d'un béton sont essentiellement : une teneur en ciment plus importante, une plus grande compacité, une épaisseur d'enrobage plus conséquente, un environnement atmosphérique moins chargé en dioxyde de carbone, une atmosphère sèche, ...

La carbonatation d'un béton peut être révélée à l'aide d'un indicateur coloré : la phénolphthaléine. Cet indicateur prend la couleur rose lorsque le béton est « sain » et devient incolore lorsque le béton est « carbonaté ». Au laboratoire, des déterminations quantitatives de pH sont extrêmement utiles pour connaître l'évolution de la basicité du béton.

1.2. La corrosion par les ions chlorure

Les ions chlorure (Cl^-) proviennent essentiellement des sels de déverglaçage et/ou des embruns marins mais dans certains cas ils peuvent avoir été ajoutés lors du gâchage du béton (cas du CaCl_2 qui joue le rôle d'accélérateur de prise ou bien gâchage à l'eau de mer). La pénétration des ions chlorure jusqu'aux armatures en quantité suffisante (on parle de concentration critique) va conduire à la rupture du film passif et constitue l'initiation de la corrosion. La concentration critique en ions chlorure est de 0,4 % par rapport au poids de ciment (EN206). La concentration critique peut également être exprimée en rapport Cl^- sur OH^- . Cette notion de seuil critique est bien acceptée mais la valeur même du seuil est très incertaine pour les raisons suivantes : le pH d'un béton varie avec la formulation choisie, la nature des ions chlorure, libres ou totaux, est encore en discussion, les méthodes de dosages utilisées sont diverses, ... Après l'initiation, la corrosion entre dans une phase dite de propagation.

La corrosion en présence d'ions chlorure est de type « localisée par piqûres » : un acier peut se rompre lorsque la piqûre (qui est perpendiculaire à la barre d'acier) est suffisamment avancée par exemple. Enfin, il faut noter que les ions chlorure ne modifient pas la valeur de pH du béton.

Les facteurs qui peuvent retarder la pénétration des ions chlorure dans un béton sont essentiellement : une plus grande compacité et une épaisseur d'enrobage plus conséquente (il est d'ailleurs préconisé un enrobage de 5 cm en bord de mer au lieu de 3 cm).

Pour connaître quantitativement la teneur en ions chlorure dans un béton il convient de faire un carottage, de scier des tranches suivant la profondeur, de doser les chlorures libres

et totaux par une méthode potentiométrique. Les résultats sont énoncés en % de chlorure en poids par rapport au poids de ciment.

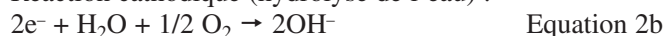
1.3. Les équations de la corrosion du fer

Après la dép passivation de l'acier, la corrosion peut démarquer selon les réactions chimiques anodique (Eq 2a) et cathodique (Eq2b) suivantes :

Réaction anodique (oxydation du fer) :

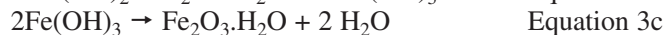
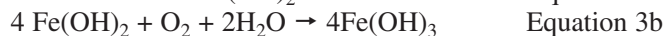


Réaction cathodique (hydrolyse de l'eau) :



Il faut noter que pour que la corrosion ait lieu il faut de l'oxygène et de l'eau.

La fissuration du béton ne provient pas de l'espèce Fe^{2+} qui est soluble dans l'eau mais bien de sa transformation (Figure 1), par exemple en hydroxyde ferreux (Eq. 3a) ou ferrique (Eq. 3b) qui donnera à terme un produit de corrosion (Eq. 3c).



L'espèce Fe_2O_3 occupe un volume deux fois plus grand que celui du fer. Après hydratation, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ gonfle, devient poreuse et peut occuper jusqu'à 10 fois plus de volume d'où des contraintes à l'interface acier/béton très importantes qui vont générer des fissures dans le béton.

2. DIAGNOSTIC DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ DÉGRADÉS PAR CORROSION

2.1. Le diagnostic

Le diagnostic est une étape primordiale à prendre en compte dans le choix d'une solution de réparation. Par conséquent il ne faut négliger ni le temps ni l'argent à lui consacrer.

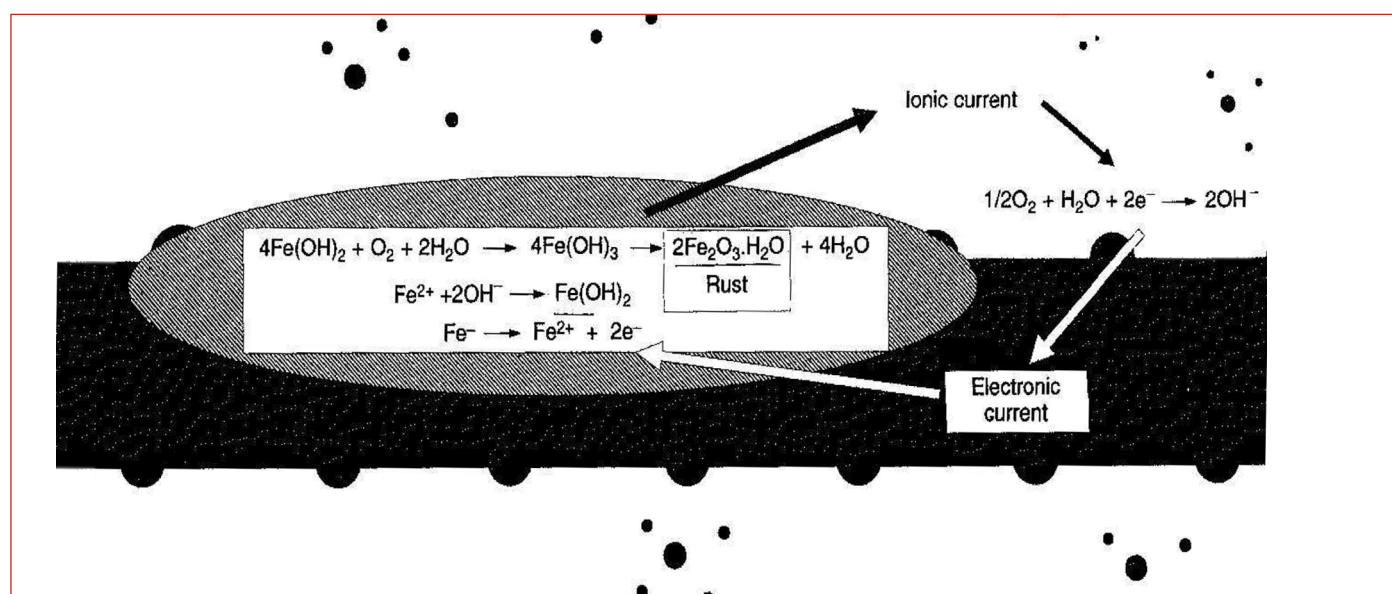


Figure 1: Les réactions de formation de la rouille [d'après Broomfield].

Le diagnostic commence toujours par une inspection visuelle de la structure qui va notamment permettre de localiser les fissures, les coulures de rouille, les épaufures, etc. et pouvoir donner une idée sur la gravité de la dégradation statistiquement sur l'ensemble de l'ouvrage.

Il faut ensuite déterminer quelle pourrait être la cause des dégradations rencontrées. Une fissure n'est pas forcément due à un phénomène de corrosion (réactions gonflantes par ex). L'auscultation au marteau peut permettre de détecter les zones de non adhérence de l'enrobage béton sur les armatures. D'autres méthodes (caméra infra-rouge, radar, ultra-sons, etc.) peuvent également être utilisées à plus grande échelle. La localisation des armatures, leur diamètre et leur enrobage sont autant d'éléments à connaître sur l'ouvrage. Pour décrire la corrosion, les techniques électrochimiques telles que les mesures de potentiel et de vitesse de corrosion sont incontournables mais l'interprétation des résultats peut s'avérer délicate (influence de la température, de l'humidité relative, de la formulation du béton, de l'agression, du matériel utilisé, etc.) et il faut donc faire appel à des personnes compétentes. La mesure de la résistivité peut parfois s'avérer utile. Pour caractériser le matériau il faut s'intéresser à la carbonatation et aux ions chlorure. Les résultats quantitatifs sont toujours préférables aux résultats qualitatifs (il faut souvent traiter les deux approches). Il faut également connaître la formulation du béton lui-même (nature du ciment, dosage, type de granulats, etc.).

3. RÉHABILITATION DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ DÉGRADÉS PAR CORROSION

Dans un contexte de réparation des ouvrages en béton armé dégradés par corrosion, diverses solutions existent : les inhibiteurs de corrosion, le remplacement des armatures au carbone par des armatures galvanisées ou des armatures inoxydables, l'utilisation de peintures ou autres types de revêtements de surface, les réparations traditionnelle ou électrochimiques. Dans ce texte, seront uniquement explicitées la réparation dite « traditionnelle » (c'est-à-dire classiquement utilisée) et les réparations électrochimiques.

3.1. La réparation traditionnelle

La réparation traditionnelle est localisée : elle consiste en une purge du béton non adhérent, une reconstitution des armatures et/ou une repassivation des armatures et d'une reconstitution de béton d'enrobage. D'après le retour d'expérience, ce type de réparation conduit à l'éclatement du béton dans les zones non traitées contigües, environ 5 à 10 ans après. Ce manque de durabilité a été attribué essentiellement à une faible compatibilité entre le béton d'origine et le béton de réparation de reconstitution de l'enrobage et/ou à un effet de pile entre les zones traitées et non traitées.

3.2. Les réparations électrochimiques

Les réparations de type électrochimiques sont plus récentes que la réparation traditionnelle. Toutefois, elles ne permet-

tent pas de s'affranchir de la réparation traditionnelle au préalable des réparations électrochimiques car le monolitisme du béton et la continuité des armatures doivent être assurés. Les réparations électrochimiques ont théoriquement pour avantage de traiter l'ensemble des armatures et donc d'éviter des effets de pile indésirables. Les traitements électrochimiques tels que la protection cathodique, la réalcalinisation et la déchloruration peuvent être mis en œuvre selon deux procédés différents :

- Dans le procédé par courant imposé, il faut utiliser une alimentation électrique. Les armatures (=cathode) sont connectées au pôle négatif et l'anode est reliée au pôle positif de l'alimentation. La densité de courant à débiter est choisie (généralement 1 A/m^2 d'acier) et elle reste constante dans le temps. Un électrolyte assure la bonne conductivité électrique entre l'anode et la cathode.
- Dans le procédé par courant galvanique, il n'y a pas d'alimentation électrique. Les armatures (=cathode) sont directement connectées à l'anode (qui est dite « sacrificielle »). Le courant galvanique débité dépend de « la demande » de l'acier. Un électrolyte assure la bonne conductivité électrique entre l'anode et la cathode.

Remarque : Les traitements par courant imposé sont les mieux connus du point de vue de leur efficacité car les courants débités sont plus élevés que ceux obtenus par courant galvanique. Ils sont également plus faciles à contrôler.

Lors d'un traitement électrochimique de protection cathodique, de réalcalinisation ou de déchloruration, l'hydrolyse de l'eau autour des armatures génère des ions hydroxyle (OH^-) et le champ électrique créé provoque la migration des anions de l'armature vers l'anode et la migration des cations dans le sens inverse.

Le schéma général d'un traitement électrochimique est illustré sur la Figure 2.

3.2.1. La protection cathodique

L'objectif de la protection cathodique est d'abaisser le potentiel électrochimique de l'armature vers une valeur seuil appelée potentiel de protection qui est telle que la vitesse de corrosion de l'acier devienne négligeable. La protection cathodique par courant imposé (avec une densité de courant de l'ordre de 2 à 20 mA/m^2 d'acier) est un traitement à vie de l'ouvrage.

La protection cathodique de l'acier dans le béton fait l'objet de la norme européenne NF-EN 12 696 (juillet 2000) qui est en cours de révision en 2009. Les critères de protection énoncés dans cette norme portent sur :

- le potentiel à courant coupé ($-750\text{ mV Ag/AgCl } 0,5\text{ M KCl}$),
- la décroissance du potentiel d'au moins 100 mV après coupure de courant sur une période de 24h,
- la décroissance d'au moins 150 mV pour des durées de coupures de courant plus longues.

Cette norme s'applique surtout à la protection cathodique par courant imposé. Les recommandations pour l'utilisation d'anodes galvaniques sont assez vagues voire inexistantes. D'autre part, il ne faut pas confondre protection cathodique et prévention cathodique dont la densité de courant est 10 fois plus petite.

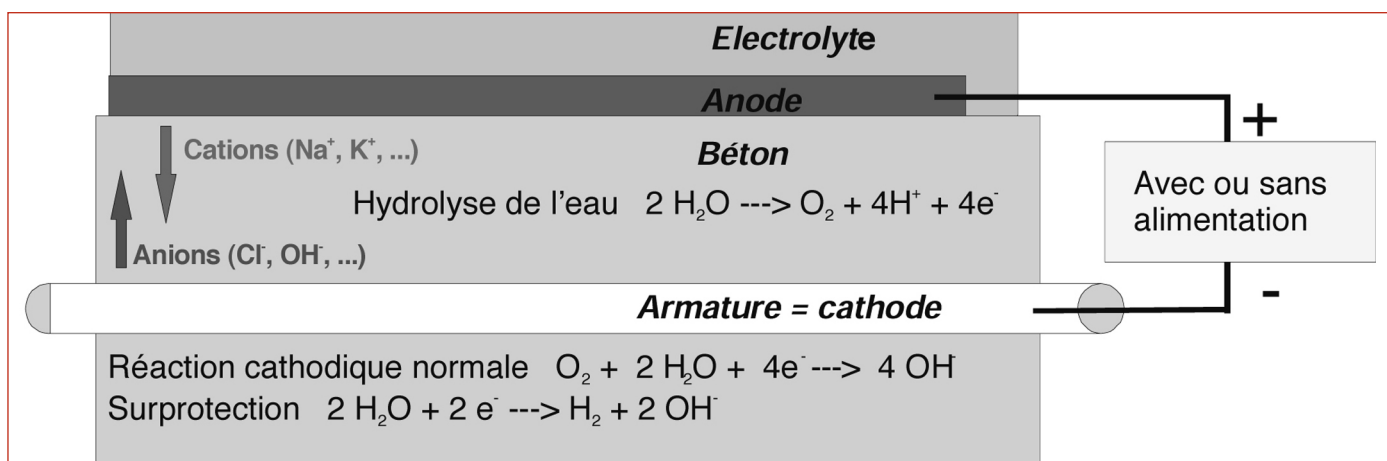


Figure 2: Schéma d'un traitement électrochimique.

Quelques étapes de l'application d'une protection cathodique sont illustrées sur la Photo 1 (de gauche à droite) : pose du treillis qui sert d'anode sur le parement béton, connexion des armatures et boîtier de connexion des anodes et des cathodes

3.2.2. La réalcalinisation

L'objectif du traitement de réalcalinisation est de redonner une alcalinité élevée au béton et donc d'empêcher la corrosion des armatures. Lors du traitement électrochimique, la réalcalinisation se produit en deux zones différentes du béton : dans la première zone constituée par l'armature elle-même, l'hydrolyse de l'eau génère la formation d'ions hydroxyle (OH^-); dans la seconde zone, constituée par l'enrobage béton, les ions alcalins (cations) contenus dans l'électrolyte migrent vers les armatures. La réalcalinisation, réalisée avec une densité de courant imposé de 1A/m^2 d'acier, est un traitement qui va durer de 1 à 2 semaines. La réalcalinisation fait l'objet d'une spécification technique européenne FD CEN/TS 14038-1 (janvier 2005). La densité de courant imposé ne doit pas dépasser 4A/m^2 de surface d'armature (sinon il y a risque de fissuration du béton) et l'alimentation électrique utilisée est limitée en

tension à 50V. Le traitement est suivi en enregistrant la charge en A/h et une valeur de 200A.h/m^2 est donnée pour indiquer la fin du traitement. L'efficacité du traitement est évaluée à l'aide de phénolphthaleine (coloration rose sur un anneau de 10 mm autour de l'acier ou bien diamètre de la barre).

La mise en place d'un traitement de réalcalinisation par courant imposé est illustrée sur la Photo 2 (de gauche à droite et de haut en bas) : purge du béton non adhérent, reconstitution du béton d'enrobage et pose du treillis anodique, projection de la pâte cellulosique (qui sert d'électrolyte), connexion des anodes et des cathodes dans le boîtier électrique, lecture de la tension et du courant de l'alimentation continue.

3.2.3. La déchloration

L'objectif du traitement de déchloration est d'extraire le plus grand nombre d'ions chlorure de l'enrobage béton de manière à ce que le film passif sur les armatures ne soit pas rompu et/ou que la propagation de la corrosion soit freinée. Les ions chlorure (anions) migrent depuis l'armature vers l'anode placée sur le parement béton sous l'action du champ électrique. Au niveau des armatures polarisées,

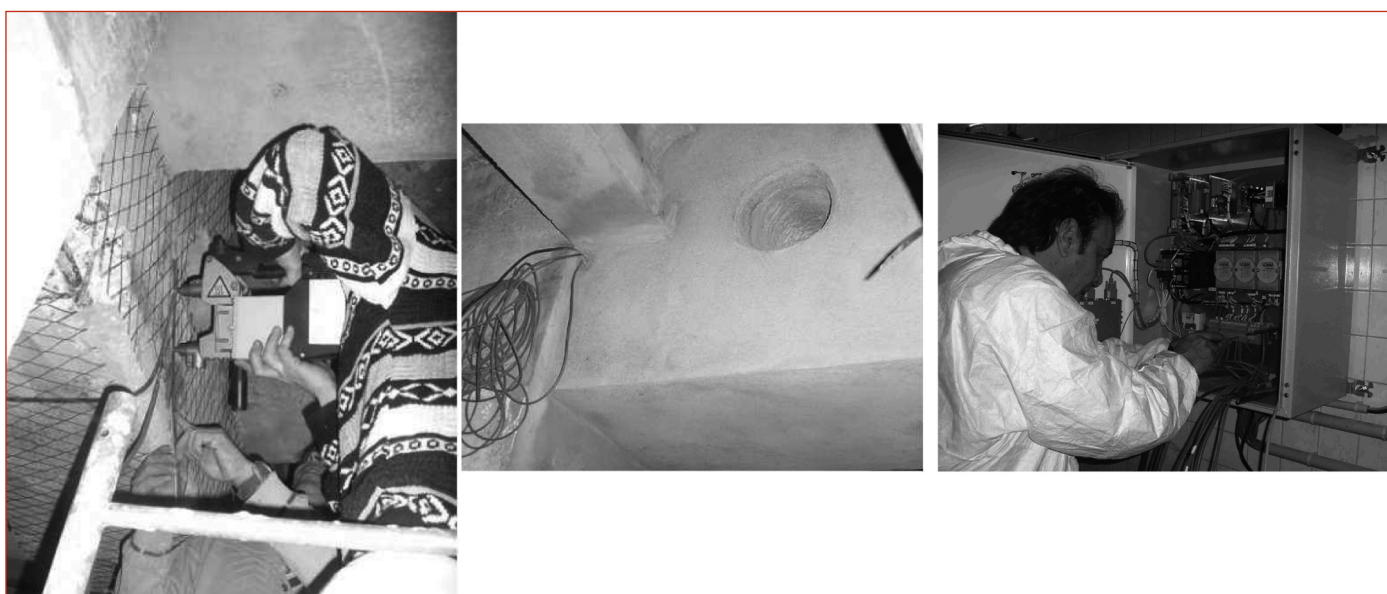


Photo 1 : Illustration du traitement de protection cathodique (crédit photo Freyssinet).



Photo 2 : Illustration du traitement de réalcalinisation par courant imposé (crédit photo Renofors).

l'hydrolyse de l'eau génère des ions hydroxyle (OH^-). La déchloruration par courant imposé (avec une densité de courant imposé de 1A/m^2 d'acier) est un traitement qui va durer de 4 à 8 semaines.

La déchloruration fait l'objet d'un projet de spécification technique européenne prCEN/TS 14038-2 qui est en cours de discussion.

La mise en place d'un traitement de déchloruration par courant galvanique est illustrée sur la Photo 3 (de gauche à droite et de haut en bas) : sablage du béton, enduction du béton d'une pâte électrolytique adéquate, pose des anodes en sandwich dans de la pâte électrolytique, mise en place du système de régulation en humidité de l'électrolyte, connexion à l'armature et connexions des anodes et des cathodes au boîtier de connexions.

3.3. Quelques réflexions sur les traitements électrochimiques

A ce jour, et en France, les traitements électrochimiques sont assez peu utilisés, le retour d'expérience est donc faible et les éléments de réponse concernant l'efficacité sur le long terme de ces traitements sont rares. Toutefois, les études menées en laboratoire montrent des résultats qui semblent prometteurs.

Les principales limites de ces traitements électrochimiques sont un béton d'enrobage trop compact (mais alors en général il n'y a pas de dégradations), une quantité d'ions chlorure très importante y compris au-delà du premier lit d'armatures, une carbonatation très profonde et au delà du premier lit d'armature, des armatures non continues électriquement, des parements béton de géométrie difficile voire en dentelle, ... Il faut se montrer vigilant quant à la réparation des ouvrages comportant des câbles de précontrainte car ceux-ci sont sensible à la fragilisation par l'hydrogène. De même pour les bétons comportant beaucoup d'alcalins ou des granulats potentiellement réactifs, le trai-

tement de réalcalinisation qui ajoute encore des alcalins n'est pas conseillé pour des raisons de réactions gonflantes alcalis-silice potentielles.

Le choix de ces traitements électrochimiques nécessite également un effort en communication pour expliquer leurs fonctionnements et une remise en question du contenu du cahier des charges classique (quel traitement, quel procédé (courant imposé ou courant galvanique), quelles attentes, quelles performances, quels moyens de mesures, etc.)

De plus, les méthodes de mesures non destructives de type cartographie de potentiels et mesure de vitesse de corrosion sont souvent difficiles à interpréter au regard du chantier étudié. Il faut donc toujours veiller à recouper les résultats électrochimiques avec ceux des caractérisations analytiques qualitatives (indicateurs colorés par ex) et quantitatives (pH, dosage d'ions chlorure essentiellement, mais aussi dosage d'alcalins dans le cas d'une réalcalinisation par ex).

Dans le cas d'ouvrages tels que des piles de ponts en milieu marin, la protection cathodique par courant imposé est recommandée car elle permet de traiter aussi bien les parties de piles en zone de marnage que les parties aériennes atmosphériques. Cependant ce type de traitement est posé à vie et un suivi est nécessaire. Il faut alors se montrer vigilant quant au suivi à effectuer (le prendre en compte dès le début de la réparation) et à sa traçabilité.

Les réalcalinisations et les déchlorurations sont des traitements temporaires assez aisés à mettre en œuvre sur des ouvrages de géométrie classique y compris en sous-face ou intrados. Après dépose, généralement le parement béton n'est pas significativement modifié.

Les traitements électrochimiques en utilisant le procédé par courant galvanique posent encore de nombreuses questions (efficacité, performances, moyens de mesures, dimensionnement, durée de vie des anodes, pertinence des anodes noyées dans le béton, etc.) dont certaines sont étu-



Photo 3 : Illustration du traitement de déchloration par courant galvanique (crédit photo Freyssinet).

diées au sein du CEFRACOR (Centre Français anticorrosion) dans un groupe de travail crée en 2008.

Enfin, les normes et recommandations sur les traitements électrochimiques sont en cours de révision et/ou de projet étant donné les avancées des recherches menées.

4. BIBLIOGRAPHIE

Ci-après, figure une liste succincte des livres, normes et autres informations dans le domaine thématique de la réhabilitation des bétons armés dégradés par corrosion.

4.1. Quelques ouvrages généraux

- Atlas d'équilibres électrochimiques à 25°C, M. Pourbaix, Gauthiers-Villars, 1963
- Steel corrosion in concrete, A. BENTUR, E & FN Spon, 1997
- Corrosion of steel in concrete, J. P. Broomfield, E & FN Spon, 1997
- La corrosion et la protection des armatures dans le béton, A. Raharinaivo, Presses des Ponts et Chaussées, 1998
- Corrosion of steel in concrete – prevention, diagnosis, repair, L. Bertolini, Wiley VCH, 2000

- Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion, G. Taché, Association Française de Génie Civil, 2003
- Durabilité des bétons «méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité», AFPC-AFREM, décembre 1997, LMDC, Toulouse
- Durabilité du béton armé et des ses constituants : maîtrise et approche performantielle, V. Baroghel-Bouny, LCPC, Novembre 2008
- Les méthodes électrochimiques appliquées au diagnostic et à la réhabilitation du béton armé concerné par la corrosion, A. Rahariniavo, LCPC, juin 2005

4.2. Quelques études scientifiques

- Cathodic protection and cathodic prevention, P. Pedeferra et al., Construction and Building Materials, Vol. 10, p. 391, 1996
- Action COST 509 Corrosion and protection of metals in contact with concrete (1991-1996)
- Action COST521 Corrosion of steel in reinforced concrete structures (1997-2002)
- A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete, W. Yeih *et al.*, Construction and Building Materials, Vol. 19, p. 516, 2005
- Electrochemical chloride extraction : efficiency and side effects, J. C. Orellan *et al.*, Cement and Concrete Research, Vol. 34, p. 2. 27, 2004
- Electrochemical chloride extraction of a beam polluted by chlorides after 40 years in the sea, V. Bouteiller *et al.*, J. Phys. IV, Vol. 136, p. 331, 2006

4.3. Quelques articles scientifiques sur les méthodes de mesures pour contrôler l'efficacité des traitements électrochimiques

- Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar, C. Alonso, C. Andrade, M. Castellote and P. Castro, Cem. Concr.Res. Vol. 30, (2000), pp. 1047-055.
- Round robin test on chloride analysis in concrete Part 1: Analysis of total chloride content, M. Castellote and C. Andrade, Mater. Struct. Vol. 34, (2001), pp. 532 (Procedure A3-C4*).
- Round robin test on chloride analysis in concrete Part 2: Analysis water soluble chloride content, M. Castellote and, C. Andrade, Mater. Struct. Vol. 34, (2001), pp. 589 (procedure B1).
- Half cell potential measurements – Potential mapping on reinforced concrete structures, B. Elsener, Mater. Struct. Vol. 36, (2003), pp. 461-471.

- Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method, C. Andrade and C. Alonso, Mater. Struct. Vol. 37, (2004), pp. 623-643.

4.4. Normes et recommandations

- ASTM C876-91 «Standard test method for half cell potentials of uncoated reinforced steel in concrete» (1999)
- RILEM TC-154-EMC «Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion», Materials and Structures, Half cell potential measurements – Vol. 36, p. 461, 2003
- RILEM TC-154-EMC «Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion», Materials and Structures, Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforced in concrete by means of the polarisation resistance method – Vol. 37, p. 623, 2004
- NF EN 12696 «Protection Cathodique de l'acier dans le béton», juillet 2000
- FD CEN/TS 14038-1 «Ré-alkalinisation électrochimique et traitements d'extraction des chlorures applicables au béton armé – Partie 1 Ré-alkalinisation», janvier 2005
- prCEN/TS 14038-2 «Ré-alkalinisation électrochimique et traitements d'extraction des chlorures applicables au béton armé – Partie 2 déchloruration», avril 2004
- NF EN206-1 « Béton », avril 2004

4.5. Quelques actes de congrès et manifestations

- Concrete Solutions, Saint Malo, France, 2006
- Nucperf, Cadarache, France, mars 2006
- Eurocorr, Freiburg, Allemagne, 2007
- Concrete under Severe Conditions, Tours, France, 2007
- Ecole thématique de la corrosion, Hauteville-sur-Mer, France octobre 2007
- CEFRACOR – Rencontre n° 10 – Protection cathodique galvanique appliquée au béton armé – Paris, France, 2007
- Durability of Building Materials and Constructions, Istanbul, Turquie, 2008
- International Congress on Durability Concrete Structures, Hangzhou, Chine, 2008
- International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape town, Afrique du Sud, 2008