

Evaluation de la performance d'une réparation ou comment le monitoring et l'auscultation viennent en appui des observations visuelles

Tiffany Desbois¹, Benoit Thauvin¹

¹ Cerema, Direction Ouest, F-22000 Saint-Brieuc, France

RESUME

Comment peut-on évaluer la performance d'une réparation de béton armé dans le temps ? Cet article présente une expérimentation menée sur un quai sur pieux en béton armé présentant des désordres, notamment des fractures aux arêtes inférieures de la poutre, dus à la corrosion de ses aciers. Celui-ci a été réparé sur une moitié par une réparation qualifiée de lourde consistant en une purge supérieure à l'enrobage et la réalisation d'un béton projeté ; sur l'autre moitié elle consiste en une purge légère et la projection voie humide d'un mortier de réparation. En quelques emplacements de ces zones, une protection cathodique par courant galvanique a été intégrée en complément. Deux approches complémentaires ont été utilisées afin de suivre et d'évaluer la performance de ces réparations. La première consiste en du monitoring qui permet notamment à l'aide d'électrodes de référence de connaître en quelques points de l'ouvrage le potentiel des armatures. La deuxième comprend de l'auscultation depuis le parement, avec des mesures de potentiels et des mesures de résistivités.

Un bilan 9 ans après les réparations permet de mettre en avant l'intérêt d'un tel suivi dans l'évaluation de leur performance. Ce retour d'expériences amène des pistes pour le déploiement de cette évaluation à d'autres projets de réparation.

Mots-clés évaluation, monitoring, auscultation, béton armé, réparation

Key-words evaluation, monitoring, auscultation, reinforced concrete, repair

I. CONTEXTE

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 $Fe(OH)_3$. Deux causes peuvent expliquer l'amorçage de la corrosion [Baron et Ollivier, 2002] :

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

En environnement marin, la corrosion des armatures du béton armé résulte donc d'un phénomène électrochimique majoritairement dû aux ions chlorure [Cetmef, 2011]. Une réhabilitation s'impose alors pour arrêter, ralentir ou empêcher la corrosion. Celle-ci peut être de deux types : traditionnelle consistant en une purge suivie de la reconstitution du béton ou électrochimique [Cetmef, 2011], [AFNOR, 2022].

En 2002, le projet CONREPNET [Tilly and Jacobs, 2007] rappelait que l'équivalent de 50% du budget européen pour la construction était affecté à la réhabilitation ou à la remise à neuf d'infrastructures détériorées. Dans 54% des cas, les dégradations avaient pour origine le phénomène de corrosion. La moitié des réhabilitations menées dans ce contexte (corrosion) se soldait alors par un échec. La recherche et la maîtrise de techniques de réhabilitation du béton armé efficaces, durables et si possible économiques est donc un enjeu majeur pour les maîtres d'ouvrages. Un autre enjeu réside dans le suivi dans le temps de ces réparations afin d'évaluer leur efficacité et leur pérennité mais également de programmer le moment opportun d'une nouvelle réhabilitation.

Les résultats d'une expérimentation menée sur un appontement en béton armé ont été utilisés afin de déterminer l'intérêt du monitoring et de l'auscultation en complément des observations visuelles pour évaluer la performance d'une réparation.

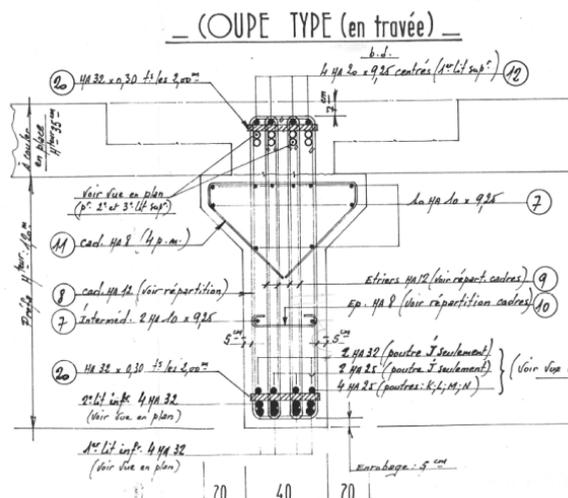
II. MÉTHODOLOGIE

A. Présentation de l'ouvrage

L'appontement retenu a été choisi, du fait de sa représentativité vis-à-vis de son exploitation, de son exposition, de son âge (mise en service en 1983 sans grosse réparation), de sa géométrie et de la nature de ses dégradations. Ce quai situé sur une côte française est constitué de poutres en béton armé. Seule une poutre de l'ouvrage de 9m de longueur, 86cm de hauteur et 40cm de largeur a été utilisée.



(a)



(b)

FIGURE 1. (a) Etat de la poutre en 2012, avant réparation, présentant une fracture longitudinale continue à proximité du talon – (b) Plan de ferrailage de la poutre

La poutre étudiée se situe en zone d’embrun avec une sous-face située à +5,80 en côte marine. Aussi le talon de la poutre n’est au contact de l’eau de mer que lors des grandes marées, soit quelques jours par an. Le diagnostic préalable a mis en avant une corrosion importante due à la pénétration des ions chlorures et se manifestant en surface par une fracture à proximité du talon, longitudinale et continue sur toute la longueur de la poutre, dans la zone fortement ferrillée (Figure 1).

B. Présentation de la réparation

La réparation a été réalisée en novembre 2012 pour une première phase, suivie en juillet 2015 de reprise d’une partie de la zone réparée, du fait d’une infiltration d’eau. Ainsi, la présente étude correspond à un retour d’expérience sur neuf années après la réparation initiale.

La poutre étudiée a été divisée en quatre parties afin de tester différentes solutions de réparation, allant de la réparation traditionnelle à la réparation traditionnelle cumulée à de la réparation électrochimique. Le Tableau 1 récapitule les réparations et les protections réalisées sur l’ouvrage. Le schéma 1 présente le principe d’implantation de ces zones de réparation le long de la poutre.

TABLEAU 1. Réparations et protections réalisées par zone de la poutre

		Réparation	
		Purge importante (7 à 10 cm) + béton projeté par voie sèche	Purge légère, limitée au béton dégradé + mortier de réparation par voie humide
Protection cathodique	Pas d’anode	Zone 1A	Zone 2A
	Anodes	Zone 1B	Zone 2B

Les anodes des zones 1B et 2B ont été installées de la manière suivante :

- En 1B, positionnement d’anodes sacrificielles dans le béton ancien, à proximité de la zone de réparation avec 5 anodes forées en quinconces par face. Ces anodes en zinc, de forme cylindrique, mesurent 46×100 mm (diamètre × longueur). Elles sont introduites dans un trou foré en utilisant un mortier d’enrobage. Par la suite elles sont reliées entre elles par un câble d’interconnexion qui assure la connexion électrique avec les armatures.
- En 2B, positionnement d’anodes sacrificielles en zone non réparée avec 5 anodes forées en quinconces par face. Il s’agit des mêmes anodes qu’en zone 1B. En complément une anode composée de zinc enrobé d’un activateur intégré, avec une porosité suffisante pour contenir les produits de la corrosion des anodes a été installée. Cette anode en forme de prisme a une hauteur de 38mm et une largeur de 83mm. Sa longueur peut être comprise entre 1,7 et 2,3m (la longueur mise en œuvre n’est pas connue). Elle est fixée aux armatures par des ligatures et est située dans la zone réparée du talon

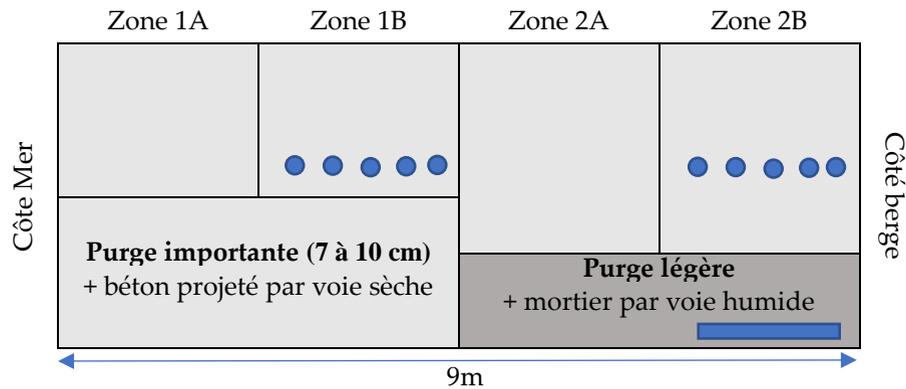


Schéma 1 : Vue en élévation de l'âme de la poutre côté extérieur du quai

C. Présentation des approches de suivi des solutions de réparation

C.1 Monitoring

Par zone, ont été installées deux électrodes de référence Mn/MnO₂ de façon tête-bêche. Celles-ci permettent de mesurer les potentiels des armatures à raison d'une mesure par heure, depuis février 2013 [Vennesland et al., 2007], [Raupach et al., 2013], [Bouteiller et al., 2021]. L'installation permet également de mesurer les courants débités par les chapelets d'anodes ("ampèremètre" en série avec la ligne d'anodes). Par ailleurs un système d'interrupteur dans le circuit permet de couper la protection et d'effectuer des mesures de dépolarisation.

Les courants débités et les dépolarisations sont des indicateurs qui permettent d'apprécier l'efficacité et la pérennité de la protection cathodique (débits et consommation des anodes). Bien que ces informations ne soient pas accessibles avec le contrôle non destructif et qu'elles soient intéressantes, les résultats de ces mesures ne seront pas développés dans la suite de cet article.

C.2 Auscultation depuis le parement

Des mesures non destructives de type électrochimiques ont été réalisées lors de cinq campagnes de mesures, sur toute la surface de la poutre, depuis le parement. La continuité électrique des armatures de la poutre a en premier lieu été vérifiée. La première campagne correspondait à des mesures avant la mise en place des quatre solutions de réparation de la poutre en béton armé.

Résistivités

La résistivité du béton est le rapport entre la tension appliquée et le courant résultant, dans une cellule qui a une géométrie spécifique indépendante des propriétés du matériau, décrivant la résistance électrique [Polder, 2001].

Les mesures ont été effectuées selon la méthode dite « Wenner » qui utilise quatre électrodes équidistantes qui sont maintenues à la surface du béton. Les deux électrodes extérieures induisent le courant mesuré et les deux intérieures mesurent la chute du potentiel résultant. La Figure 2 reprend ce principe.

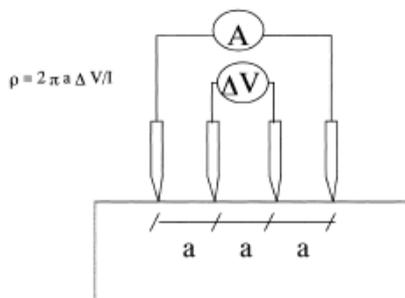


FIGURE 2. Schéma de la méthode à 4 points [Polder, 2001]

La résistance R calculée à partir de la méthode à quatre points ($R=U/I$) permet d'obtenir la résistivité (r), à partir de l'équation suivante :

$$r = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \tag{1}$$

avec a la distance entre les électrodes ($a = 5$ cm dans la présente application)

Sa dimension correspond donc à une résistance multipliée par une longueur, du type $\Omega \cdot m$.

L'appareil utilisé est le Résipod de chez Proceq. Comme les recommandations le préconisent [Polder, 2001], les mesures ont été effectuées dans les mailles entre les aciers. Ainsi, 2 à 8 mesures par maille ont été effectuées.

Potentiels de corrosion

Le potentiel de corrosion se mesure par la différence de potentiel entre une électrode de référence placée sur la surface du béton et l'armature d'acier située en dessous. Du fait de la présence d'enrobage du béton, les potentiels d'électrode de l'acier ne peuvent pas être mesurés directement sur l'armature. Les potentiels sont donc influencés par la chute ohmique dans l'enrobage, le courant de macro-pile et éventuellement des potentiels de jonction (Figure 3).

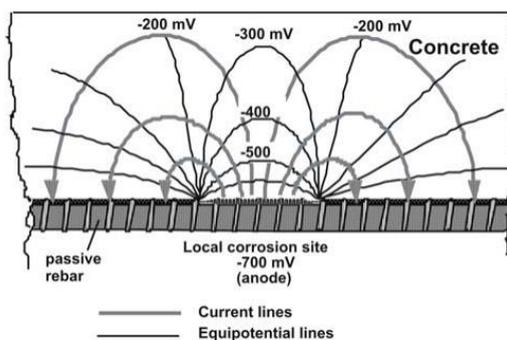


FIGURE 3. Vue schématique du champ électrique et de la circulation de courant dans la macro-pile active/passive de l'acier dans le béton [Elsener, 2003]

Les valeurs absolues de potentiel ne permettent pas de déterminer directement le risque de corrosion, celles-ci étant influencées par les conditions environnementales, notamment la température et la nature et l'état du béton, saturation et pollution par les chlorures notamment. Par contre, leur représentation spatiale à l'aide de cartographie permet de visualiser les gradients de potentiels afin d'identifier les zones à risque de corrosion.

Le principe de la mesure est représenté sur le schéma de la Figure 4.

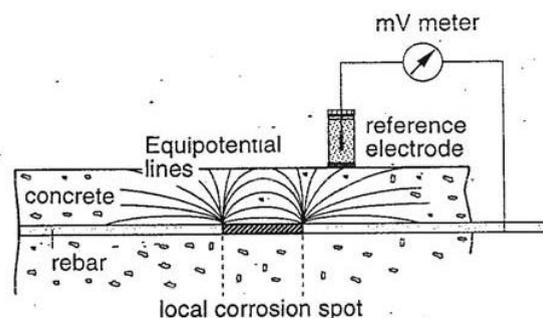


FIGURE 4. Principe et principaux composants des mesures de potentiel d'électrode [Elsener, 2003]

L'appareil utilisé pour cette expérimentation est un Canin de la marque Proceq dont l'électrode de référence est une électrode cuivre-sulfate de cuivre, considérée pour un travail sur site comme la plus robuste et comme assez précise [Elsener, 2003].

III. RÉSULTATS

A. Résultats du monitoring

La Figure 5 présente les résultats obtenus par le monitoring concernant les potentiels des armatures dans les quatre zones de la poutre. Il s'agit des résultats bruts, sans correction pour prendre en compte l'effet des conditions environnementales. Cette figure montre la stabilité dans le temps du potentiel dans la zone 1A (le saut de potentiels de l'année 2017 reste non expliqué). Dans les zones 2A et 2B, une réparation a eu lieu en juillet 2015, expliquant le saut de potentiel à cette date. Les potentiels sont relativement stables dans la zone 2A également. Dans les zones où des anodes sont présentes (1B et 2B), les potentiels fluctuent plus en fonction de l'activité de ces dernières.

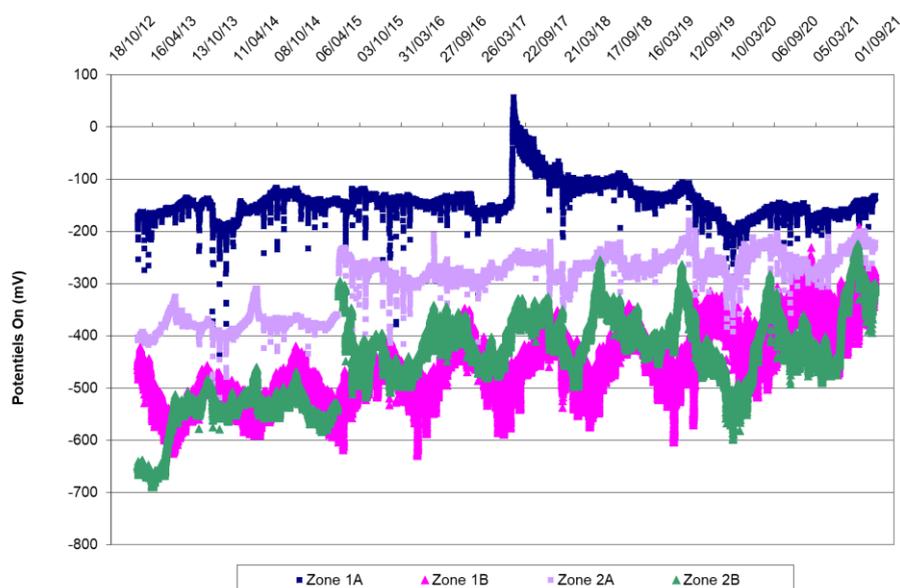


FIGURE 5. Évolution des potentiels On (par rapport à l'électrode Ag/AgCl) des différentes zones de la poutre étudiée et réparée entre 2012 et 2021

Ce suivi des potentiels d'armatures permet d'évaluer les solutions de réparation et leurs influences sur les armatures :

- Comparaison des zones de réparations « lourde » et « légère » sans anodes (1A et 2A) : les potentiels sont moins électro-négatifs sur la réparation lourde (-150 mV) que sur la réparation légère (environ -300 mV), ce qui est le signe d'une meilleure protection des armatures contre la corrosion. Ceci met en avant l'importance de bien purger lorsque l'on fait de la réparation traditionnelle. Toutefois, l'écart se réduit avec le temps entre 1A et 2A.
- Comparaison des zones avec ou sans anodes ayant subies une purge importante (1A et 1B) : l'effet des anodes est significatif avec un abaissement des potentiels de l'ordre de -300 mV les 4 premières années. Mais cet abaissement a tendance à se réduire avec le temps : environ -200 mV sur la dernière année de suivi.
- Comparaison des zones avec et sans anodes ayant subies une purge légère (2A et 2B) : là aussi l'effet des anodes est significatif mais moins qu'entre 1A et 1B (abaissement d'environ -150 mV qui a tendance à se réduire avec le temps). La profondeur de purge et la qualité de la projection a donc un effet sensible sur l'efficacité de la PC.
- Comparaison des deux zones avec anodes (1B et 2B) : Comportement très proche.

B. Résultats des auscultations

Les résultats présentés dans ce paragraphe sont bruts, sans correction pour prendre en compte l'effet des conditions environnementales.

Les mesures de résistivités (Figure 6) permettent de faire ressortir les résistivités plus élevées du béton projeté par voie sèche en zones 1A et 1B (environ 150kOhm.cm) par rapport à l'ancien béton (environ 20kOhm.cm). Notons que compte-tenu de la faible hauteur de la réparation en zones 2A et 2B et de la forte densité de ferrailage en talon de poutre, il n'a pas pu être réalisé de mesures de résistivité sur le mortier projeté par voie humide.

Ces mesures semblent donc être pertinentes pour évaluer la qualité du matériau de réparation.

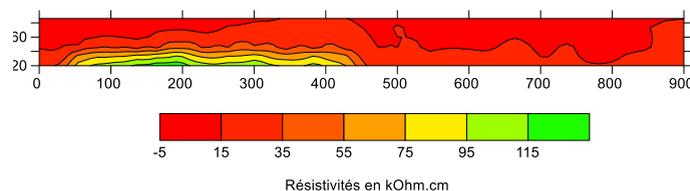


FIGURE 6. Exemple de représentation spatiale des valeurs de résistivités mesurées en septembre 2019 le long de la poutre, face intérieure

La représentation cartographique des mesures de potentiels effectuées depuis le parement permet d'apprécier le comportement spécifique de chaque solution de réparation (Figure 7). Les mesures non destructives sont cohérentes avec les données du monitoring et les confortent en permettant de les étendre à des surfaces importantes (§III.A Résultats du monitoring) :

- 1A/1B : Impact significatif des anodes
- 2A/2B : Impact sensible des anodes (mais moins fort qu'entre 1A et 1B)

- 1A/2A : meilleure protection en 1A
- 1B/2B : meilleure protection en 2B ou différence de monitoring ?

En cohérence avec les données issues des électrodes de référence (et du suivi du courant débité), les mesures de potentiels semblent indiquer une perte d'efficacité des anodes avec le temps se traduisant par des potentiels sensiblement moins électro-négatifs qu'en 2013 dans les zones sous protection (zones 1B et 2B).

Il en est de même dans la zone de "réparation traditionnelle" réalisée dans les règles de l'art qui montre en 2019 une zone localisée de chute de potentiel qui pourrait être l'indication de l'apparition d'une zone anodique et donc de corrosion.

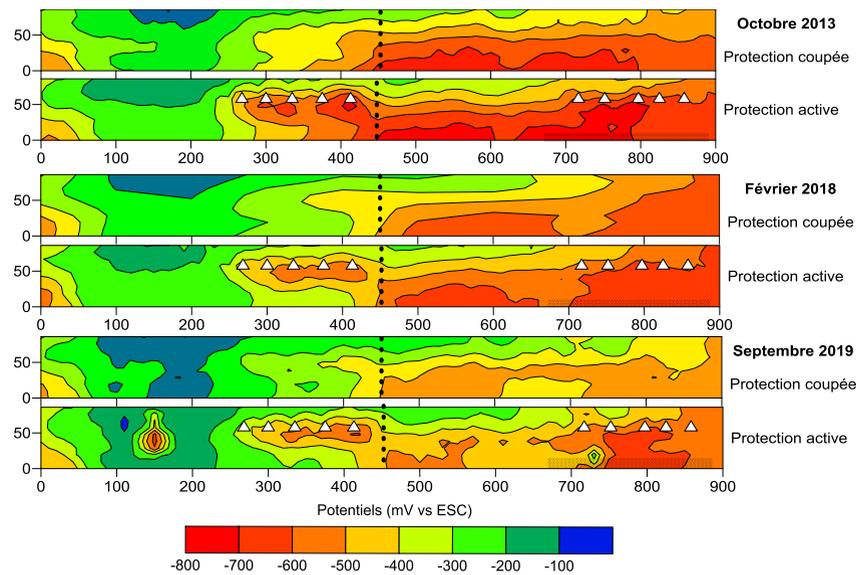


FIGURE 7. Exemple de valeurs de potentiels mesurées le long de la poutre, face extérieure

IV. BILAN

Le monitoring permet d'évaluer l'effet des anodes sur le potentiel des armatures (en comparant les zones avec ou sans anodes) et d'évaluer l'effet du type de purge et du matériau de réparation sur le potentiel des armatures (en comparant les deux zones sans anodes). Les auscultations permettent quant à elles d'évaluer l'effet du type de purge et du matériau de réparation sur des zones plus étendues, ainsi que d'avoir une vision plus globale sur l'ouvrage.

Le suivi effectué à partir de mesures réalisées in situ sur le parement est sensible aux conditions environnementales. La température est un paramètre d'influence majeure. D'autres paramètres comme l'hygrométrie, les hauteurs de marées, le vent et l'ensoleillement ont probablement également une influence mais plus difficile à apprécier. Il est ainsi recommandé de réaliser les auscultations à la même période de l'année, de préférence en période estivale.

Le monitoring et l'auscultation montrent que la réparation traditionnelle effectuée dans les règles de l'art (purge suffisante et béton projeté voie sèche) offre clairement une meilleure protection des armatures contre la corrosion que la réparation traditionnelle « légère » (purge limitée et mortier projeté par voie humide). Ils montrent également que la protection cathodique

est plus performante lorsque la purge est importante avec un béton projeté voie sèche. A ce stade, le suivi ne permet pas de classer le niveau de protection contre la corrosion entre la réparation traditionnelle effectuée dans les règles de l'art et la réparation par protection cathodique.

Neuf ans après les premières réparations, il apparaît peu d'évolution dans les zones sans anodes. Il apparaît que la zone avec une réparation "légère" aura une durée de vie probablement plus faible, ce qui est corroboré par les observations visuelles qui voient apparaître à partir de 2018 des fissures et plus récemment des taches de rouille dans cette zone (2A et 2B).

REFERENCES

AFNOR (2022). Protection cathodique de l'acier dans le béton, NF EN ISO 12696, AFNOR, Mai 2022

Baron, J., Ollivier, J.P. (2002). La durabilité des bétons. Paris : Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 453 p. ISBN 2-85978-184-6

Bouteiller, V., Adélaïde, L., Marie-Victoire, E., Bouichou, M., Thauvin, B., Villain, G. (2021). Non destructive testing and corrosion health monitoring of reinforced concrete slabs exposed to chloride ions. *Proc. of the 3rd CACRCS Workshop Capacity Assessment of Corroded Reinforced Concrete Structure*, Nov 30th – Dec. 3rd

Cetmef (2011). Altération du béton en site maritime. *Collection Partager les savoirs*. Octobre 2011.

Cetmef (2011). Réparation des bétons altérés. *Collection Partager les savoirs*. Octobre 2011.

Elsener, B., Andrade, J., Gulikers, J., Polder, R., Raupach, M. (2003). Half-cell potential measurements – Potential mapping on reinforced concrete structures. Recommendations RILEM TC 154-EMC « Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion ». *Materials and Structures*, 36.

Polder, R.B. (2001). Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendation. *Construction and Building Materials*, 15.

Raupach, M., Gulikers, J., Reichling, K. (2013). Condition survey with embedded sensors regarding reinforcement corrosion. *Materials and Corrosion*, 64, 141-146.

Tilly, G.P., Jacobs, J. (2007). CONREPNET - Concrete repairs - Performance in service and current practice, *IHS BRE Press*, Watford, UK. Vennesland, O., Raupach, M., Andrade, C. (2007). Recommendation of Rilem TC 154-EMC : « Electrochemical techniques for measuring corrosion in concrete » - measurements with embedded probes. *Materials and Structures*, 40, 745-758.