

DiaCor : sondes innovantes pour l'évaluation de la vitesse de corrosion des armatures dans le béton armé

Anterrieu Olivier¹, Deby Fabrice², Marc Breidy¹, Lassoued Mansour¹

¹ SETEC LERM, 23 rue de la Madeleine, 13631, Arles, France

² Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), INSA UPS 135 Avenue de Rangueil – 31077 TOULOUSE CEDEX, France

RESUME Afin de déterminer l'état et l'évolution de la corrosion des armatures dans le béton armé, un nouveau principe de sonde a été développé dans le cadre du projet DIAMOND (DIAGnostic corrosion et MONitoring pour la Durabilité des ouvrages en béton armé). Ces sondes, dites sondes DiaCor, permettent de mesurer la vitesse de corrosion (V_{cor}), le potentiel de corrosion (E_{cor}) et la résistivité (Rho) du béton d'enrobage. Deux gammes de sondes ont été développées pour évaluer l'état actuel (sonde de surface) et l'évolution (sonde de monitoring) de la corrosion des armatures. Des jumeaux numériques 3D ont été réalisés afin de déterminer le design optimal des sondes. De plus, des abaques permettant d'appliquer des facteurs correctifs à la mesure de V_{cor} ont été produites en tenant compte de l'influence de la géométrie et de la position du treillis d'armature. Les sondes ont ensuite été testées sur site.

Mots-clefs Vitesse de corrosion, surveillance, durabilité, sonde

Key-words Corrosion rate, monitoring, durability, probe

I. INTRODUCTION

Environ 80% des défaillances observées sur les structures en béton armé sont générées par les phénomènes liés à la corrosion des armatures. A un stade précoce de développement, la corrosion altère principalement l'esthétique de l'ouvrage (fissuration, épaufrure, mise à nu des armatures...). Dans les cas les plus sévères, la structure est elle-même endommagée avec d'importants risques de perte de capacité portante voire d'effondrement de l'ouvrage. Par conséquent, il est primordial de caractériser l'état de corrosion des armatures et d'évaluer la cinétique du phénomène de corrosion dès lors qu'il est initié. En ce sens, deux types de sondes de mesure de la vitesse de corrosion ont été développées dans le cadre du projet DIAMOND - DIAGnostic corrosion et MONitoring pour la Durabilité des ouvrages en béton armé (2016-2019) - dont Setec LERM était un des pilotes. Contrairement aux dispositifs existants, ces sondes, dites sondes DiaCor, permettent les mesures conjointes et colocalisées de la vitesse de corrosion (V_{cor}), du potentiel de corrosion (E_{cor}) et de la résistivité (Rho) du béton d'enrobage, en prenant en

compte explicitement le caractère 3D de la mesure et les différents paramètres influents grâce à un jumeau numérique.

II. CONCEPT ET SIMULATIONS NUMERIQUES

Deux types de sondes DiaCor ont été développées. La première gamme de sondes, dite sonde DiaCor de surface, permet d'évaluer le niveau de corrosion des armatures à un instant donné et donc de « VOIR » quel est le degré d'activité de corrosion. La seconde gamme de sondes, dite sonde DiaCor de monitoring, permet de faire une surveillance temporelle de la mesure de la vitesse de corrosion et donc de « PREVOIR » la cinétique d'évolution de la perte de section des armatures en assurant un suivi dans le temps. La Fig. 1 présente les deux modèles de sondes DiaCor.



FIGURE 1. Modèles des sondes DiaCor (surface à gauche, monitoring à droite)

L'originalité des sondes DiaCor repose sur un design optimisé pour la mesure sur site et sur la prise en considération du phénomène de corrosion comme étant un véritable problème physique 3D. Afin de tenir compte de la distribution complexe de la sollicitation électrique galvanostatique lors de la mesure de V_{cor} , des simulations numériques ont été réalisées sur un jumeau numérique 3D de structures en béton armé en tenant compte des influences combinées de la géométrie des sondes ainsi que du diamètre, de l'écartement et de l'enrobage des armatures soumises à différents courants d'intensités contrôlées. Ces modélisations 3D ont été réalisées par le LMDC à l'aide d'un logiciel aux éléments finis. Elles visaient à résoudre le problème par "inversion" des mesures de surface, au moyen de simulations numériques permettant l'étude de la transmission de la sollicitation électrique pour des géométries complexes (Samson et al., 2018 et 2020). Ces modélisations ont conduit à la génération successive de différents jeux d'abaques : résistivité puis densité de courant locale liée à V_{cor} en tenant compte de la résistivité mesurée par la sonde elle-même, de l'enrobage, du diamètre et de l'espacement des armatures. Les modélisations montrent que la répartition des lignes de courant dépendant également de la densité de courant de corrosion. Les abaques sont donc différents selon le taux de corrosion.

Au final, trois jeux d'abaques ont été calculés pour trois "gammes" de taux de corrosion (0,01, 0,5 et 0,1 $\mu A/cm^2$) couvrant la plupart des cas possibles rencontrés. Le résultat final est issu d'une moyenne pondérée entre ces abaques, par calcul itératif automatique.

Le jumeau numérique construit pour l'inversion de la mesure repose sur les équations électrocinétiques classiques couplées aux lois de comportement électrochimique des aciers dans le béton, les équations de Butler-Volmer (Laurens et al., 2016). La Fig. 2 illustre la géométrie 3D du jumeau numérique où apparaissent le volume de béton, le réseau d'armatures caractérisé par son enrobage, le diamètre des barres et leurs espacements. Les paramètres physiques associés sont la résistivité du béton et les paramètres électrochimiques de l'acier associés aux équations de Butler-Volmer, les constantes de Tafel.

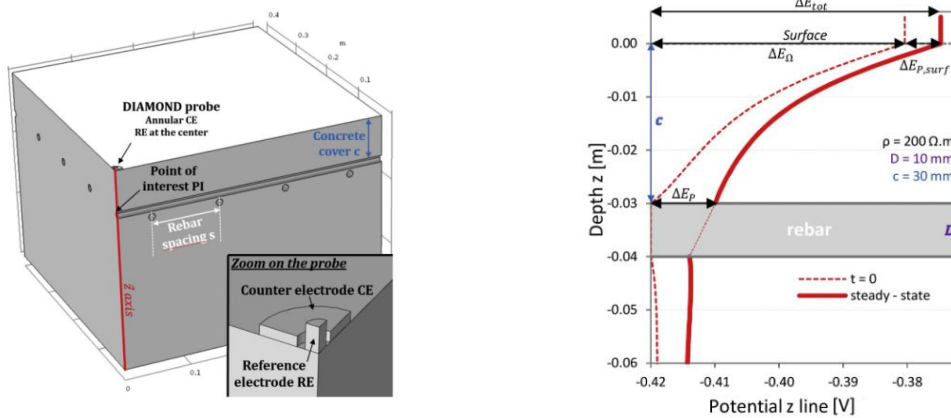


FIGURE 2. Modèle EF 3D et exemple de champ de potentiel associé en réponse instantanée et en régime établi pour une polarisation galvanostatique

III. EXEMPLE DE VALIDATION EN LABORATOIRE

Cette partie présente les résultats d'un pré-test de validation expérimentale menée avant une campagne beaucoup plus large et toujours en cours. L'objectif principal est de valider les propriétés électrochimiques mesurées avec la sonde DiaCor par comparaison avec des méthodes directes telles que les essais de Tafel.

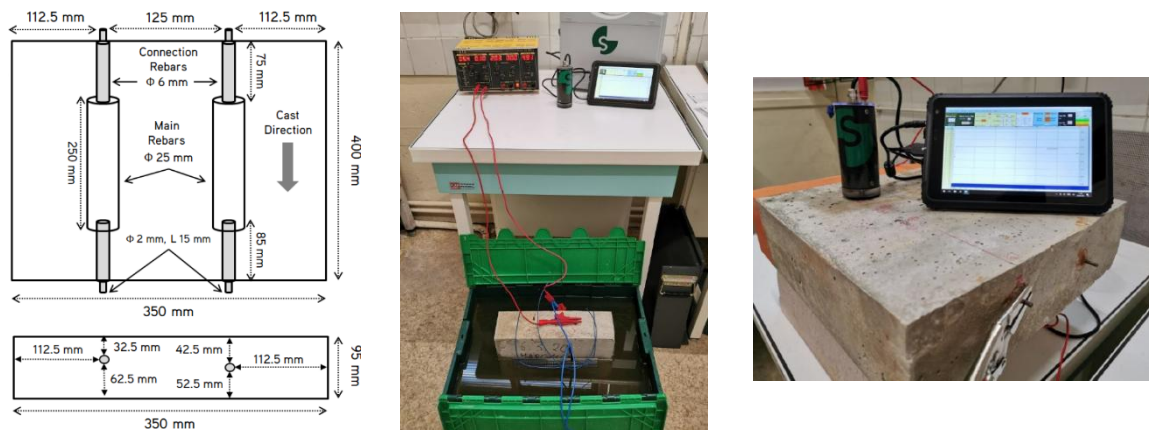


FIGURE 3. Schémas des corps d'épreuve, dégradation accélérée et mesure par la sonde DiaCor

Pour cela, une éprouvette rectangulaire en béton est coulée (Fig. 3), avec deux armatures en acier, non connectées, d'enrobages différents (20, 30, 40 et 50 mm), puis contaminée avec des chlorures en la plongeant dans une solution saline et en imposant champ électrique (Fig. 3). L'état de

contamination en chlorures de la dalle est alors supposé uniforme. L'évolution du potentiel de corrosion, de la résistivité du béton d'enrobage et du courant de corrosion est mesurée avec la sonde DiaCor, avant et après contamination (Fig. 3).

A la fin de ces essais, la dalle contaminée est carottée autour des armatures pour extraire 2 cylindres (Fig. 4). Les paramètres estimés par DIACOR sont alors mesurés au moyen d'un essai de Tafel pour une géométrie cylindrique qui permet d'accéder directement à ces paramètres (Fig. 4).

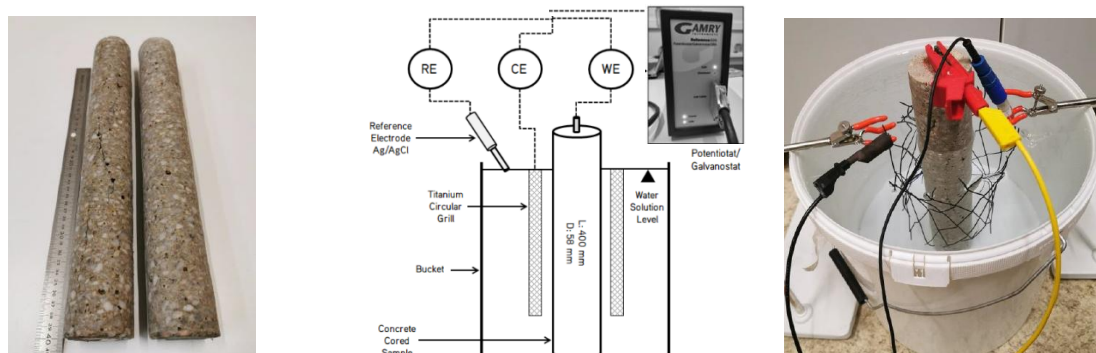


FIGURE 4. Carottages des armatures, schéma de l'essai de Tafel et montage de l'essai

Le tableau 1 synthétise les résultats obtenus. Les valeurs obtenues par DiaCor sont les moyennes sur les 2 faces, au-dessus de chaque barre pour laquelle 3 points de mesure sont positionnés en son long. Pour chaque paramètre, 4 enrobages sont donc intégrés pour un total de 12 mesures.

TABLEAU 1. Résultats des essais sur la dalle (moyenne ; écart-type)

	Non contaminée DiaCor	Contaminée DiaCor	Contaminée Tafel
Ecor [mV / Ag/AgCl/KCl sat]	- 20 ; 14	- 566 ; 15	- 524
Rho [$\Omega \cdot m$]	113 ; 39	55 ; 23	89
icorr [$\mu A/cm^2$]	0,15 ; 0,06	5,5 ; 1,8	8,9

Les valeurs obtenues par DiaCor sont encourageantes. Après contamination, le potentiel de corrosion Ecor chute et la densité de courant de corrosion icorr augmente très fortement. La résistivité Rho du béton diminue par la présence des chlorures. Les valeurs obtenues sur dalle contaminée sont confortées par les essais de Tafel malgré une sous-estimation de Rho et icorr.

III. EXEMPLE D'UTILISATION IN SITU

Un exemple de diagnostic corrosion effectué avec la sonde de surface DiaCor sur des éléments cantilevers d'un parking est proposé : le potentiel de corrosion, la résistivité du béton d'enrobage et la vitesse de corrosion sont évalués.

Sur la base d'un rapport d'inspection précédent, certains des cantilevers souffrent d'une dégradation liée à la corrosion. Le rapport a révélé que ces cantilevers sont carbonatés, la profondeur de carbonatation atteignant 150 à 200 mm à comparer à l'enrobage des cadres (Φ 8 mm) variant de 5 et 40 mm. L'activité de corrosion est donc le résultat de cette carbonatation. Cette forte carbonatation est probablement due à des cycles d'humidification/séchage : de l'eau issue des chéneaux mal conçus et non entretenus vient en effet ruisseler sur les cantilevers.

Une cartographie de potentiel de corrosion des cantilevers issue indique que les renforts proches des joints de dilatation ont généralement des valeurs de potentiels plus électro-négatives révélant les zones les plus à risque (Fig. 5). C'est donc autour de ces zones que la sonde de DiaCor a été utilisée.

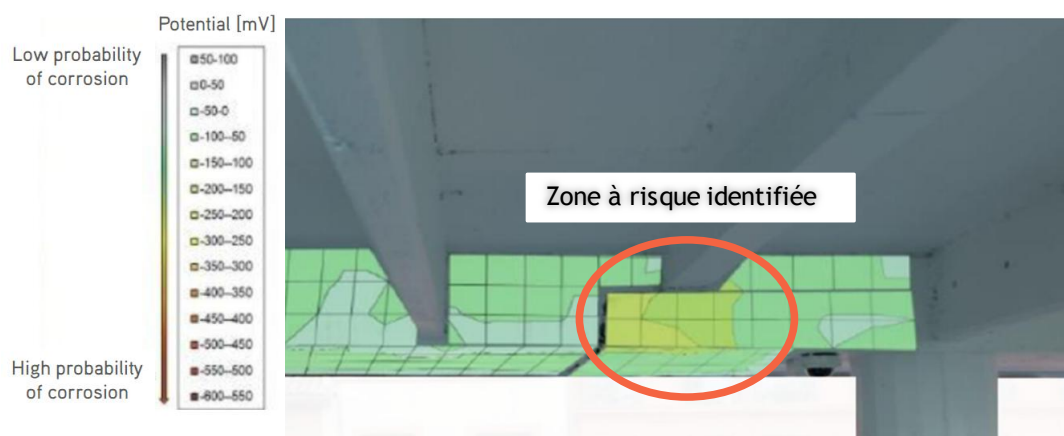


FIGURE 5. Cartographie de potentiel des cantilevers

Un total de 10 points de mesures a été effectué sur les trois cantilevers. Les emplacements approximatifs de chaque mesure (point), ainsi que les paramètres géométriques béton-acier correspondants sont indiqués ci-dessous (Fig. 6).

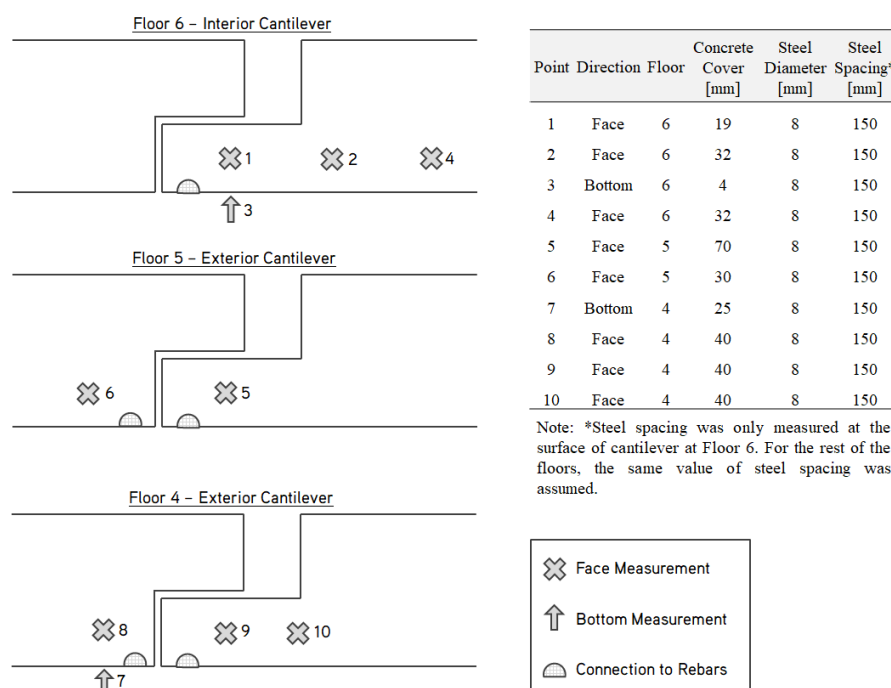


FIGURE 6. Schéma de principe des emplacements mesurés avec la sonde Diamond et les paramètres géométriques béton-acier correspondants

Les résultats des 9 points de mesure sont présentés ci-dessous dans le tableau 2. La résistivité de du béton d'enrobage donnent des valeurs comprises entre 140 et 1500 $\Omega \cdot m$, à l'exception d'une

mesure très élevée à 3200 $\Omega.m$. L'étendue des valeurs mesurées est en adéquation avec un béton carbonaté (Polder et al., 2000).

Pour les résultats de densité de courant de corrosion, aucune différence majeure de valeurs entre les niveaux n'a été observée. Toutes, sauf une, ont montré un niveau négligeable d'activité de corrosion, avec des valeurs inférieures à 0,1 $\mu A/cm^2$.

TABLEAU 2. Résultats des mesures obtenues par la sonde DiaCor sur les cantilevers

Location			Output			
Point	Direction	Floor	Ecor [mV/ref]	Rho [$\Omega.m$]	icor [$\mu A/cm^2$]	Vcor [$\mu m/year$]
1	Face	6	-104.8	1486	0.038	0.4
2	Face	6	49.7	900	0.087	1.0
4	Face	6	-181.5	587	0.033	0.4
5	Face	5	-114.6	389	0.034	0.4
6	Face	5	64.4	3194	0.084	1.0
7	Bottom	4	-134.3	140	0.043	0.5
8	Face	4	-130.8	215	0.052	0.6
9	Face	4	-158.3	290	0.048	0.6
10	Face	4	-135.4	263	0.168	1.9

Ces résultats semblent contradictoires par rapport aux observations visuelles, où des taches de corrosion et des fissures sont bien visibles sur les cantilevers. Il convient alors de préciser que les résultats présentés ici correspondent à une photographie à un instant donné de la vie de l'ouvrage. Les dernières semaines avant cette inspection ayant été sèches avec très peu de précipitations, on peut supposer que la cinétique de corrosion a fortement ralenti. Dans un contexte hivernal plus humide favorisant l'engorgement des chéneaux, les vitesses de corrosion devraient être bien supérieures : l'état hydrique du béton explique donc probablement les faibles vitesses rencontrées.

IV. CONCLUSION

La sonde DiaCor est un dispositif innovant permettant conjointement de mesurer les 3 paramètres prépondérants dans l'évaluation de la corrosion. La méthodologie d'inversion est fondée sur un jumeau numérique 3D. Les premiers résultats expérimentaux sont positifs et seront confortés par une campagne expérimentale ambitieuse couvrant davantage de configurations. Le retour In Situ est également bon et témoigne d'une facilité d'utilisation de la sonde par les opérateurs. Elle permet une exploitation directe des résultats dans le cadre de diagnostic d'état et s'avère utile dans le cadre de travaux de surveillance/maintenance/réparation.

REFERENCES

G. Samson, F. Deby, J.L. Garciaz, M. Lassoued, An alternative method to measure corrosion rate of reinforced concrete structures, *Cement & Concrete Composites*, Volume 112, 2020

G. Samson, F. Deby, J.L. Garciaz, J.L. Perrin, A new methodology for concrete resistivity assessment using the instantaneous polarization response of its metal reinforcement framework, *Construction and Building Materials*, Volume 187, 2018

S. Laurens, P. Hénocq, N. Rouleau, F. Deby, E. Samson, J. Marchand, & B. Bissonnette. (2016). Steady-state polarization response of chloride-induced macrocell corrosion systems in steel reinforced concrete — numerical and experimental investigations. *Cem. Concr. Res.*, 79, 272-290

R. Polder, C. Andrade, B. Elsener, Ø. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert and M. Raupach, Test methods for on site measurement of resistivity of concrete, *Materials and Structures*, Volume 33, 2000