

# Diagnostic de la corrosion du béton armé par la sonde DIACOR : étude numérique et expérimentale

Fabrice Deby<sup>1</sup>, Gabriel Samson<sup>1</sup>, Marc Breidy<sup>2</sup>, Jean-Luc Garciaz<sup>2</sup>, Mansour Lassoued<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LMDC, INSAT/UPS Génie Civil, 135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse cedex 04 France

<sup>2</sup>LERM SETEC, 23 Rue de la Madeleine, 13631 Arles cedex France

**RESUME** Ce travail fait partie du projet DIAMOND (<https://www.projet-diamond.com/>) qui a permis de développer une solution technique complète et innovante de diagnostic de la corrosion. Un nouveau type de sonde a été mis au point permettant à la fois de mesurer le potentiel de corrosion, d'évaluer la résistivité du béton d'enrobage et la vitesse de corrosion des armatures. Afin d'inverser les mesures réalisées en surface l'ensemble du dispositif expérimental a fait l'objet d'un jumeau numérique fondé sur un modèle 3D éléments finis. Les premiers résultats expérimentaux tendent à confirmer le bon comportement de la sonde

**Mots-clefs** Béton Armé ; corrosion ; potentiel ; résistivité ; vitesse

## I. INTRODUCTION

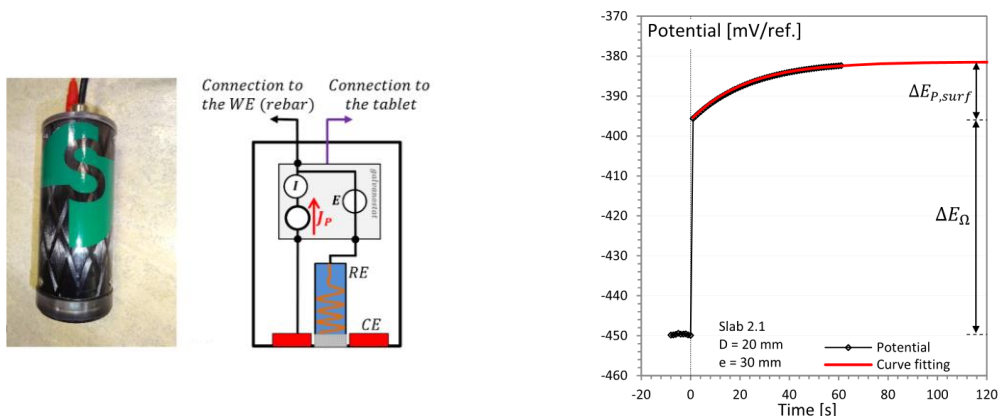
La corrosion des armatures représente 80% des pathologies observées pour les structures de Génie Civil en béton armé. Elle est responsable de pertes financières considérables dues aux besoins de maintenance et de réparation. Plusieurs méthodes d'évaluation de l'activité de corrosion existent : potentiel de corrosion, résistivité et résistance de polarisation linéaire. La vitesse de corrosion peut être déterminée grâce à la mesure de la résistance de polarisation tandis que les autres méthodes ne fournissent qu'une estimation du risque de corrosion. Les appareils utilisés pour déterminer la vitesse de corrosion sont peu nombreux et les hypothèses de calcul associées souvent insuffisantes pour décrire le caractère tridimensionnel du problème (Mitzithra et al., 2015).

La sonde DIACOR développée dans le projet DIAMOND permet de mesurer à la fois le potentiel de corrosion, d'évaluer la résistivité du béton d'enrobage et la vitesse de corrosion des armatures en s'appuyant sur un jumeau numérique 3D.

## II. PRINCIPE DE LA MESURE ET JUMEAU NUMERIQUE

La sonde DIACOR fonctionne selon une mesure électrochimique à 3 électrodes : l'électrode de travail (WE, i.e. le réseau d'armatures) est reliée électriquement à la sonde, elle-même constituée d'une contre électrode (CE) permettant d'injecter un courant continu (de 1 à 25  $\mu$ A suivant les cas) et d'une électrode de référence (RE) pour mesurer la réponse en potentiel (fonctionnement

galvanostatique). La mesure est surfacique, à savoir que la sonde est positionnée sur le béton, au droit d'une armature. La contre-électrode est un disque de 22 mm de diamètre constitué d'un fil d'argent enroulé en spirale autour d'un espace central où est placée l'électrode de référence de 5 mm de diamètre. La continuité électrolytique entre les électrodes de la sonde et la surface du béton est assurée par un feutre fin de 1 mm. La géométrie de la sonde (Fig. 1) comprenant également l'électronique de pilotage constitue au final un cylindre de 50 mm de diamètre et 130 mm de haut permettant ainsi un encombrement réduit qui facilite les mesures in-situ. Une sonde monitoring noyée dans le béton existe également même mais elle n'est pas présentée ici.



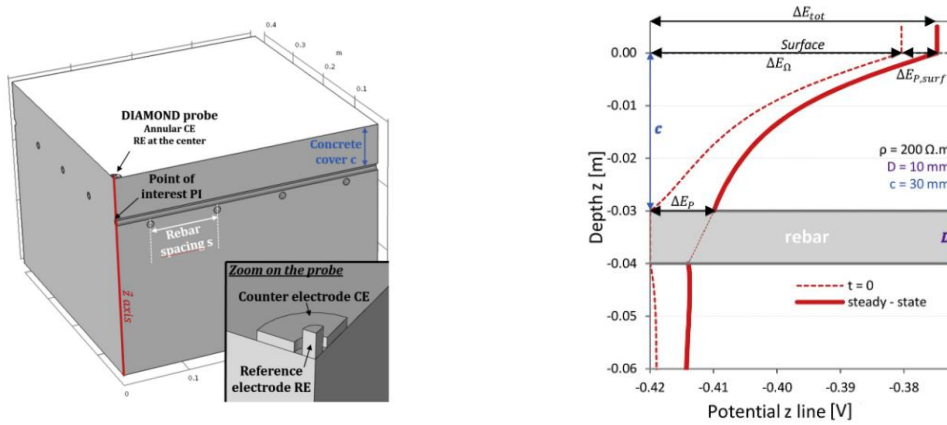
**FIGURE 1.** Design de la sonde et exemple de réponse en potentiel mesurée en fonction du temps

Une simple tablette tactile reliée à la sonde enregistre alors les données de mesure. Une courbe typique de polarisation enregistrée en cours de mesure est présentée Fig. 1. De cette courbe sont extraites 3 informations pour quantifier l'état de corrosion de la structure en béton armé inspectée :

- Le potentiel de corrosion est mesuré directement lorsqu'aucune sollicitation électrique n'est appliquée à l'armature, c'est-à-dire avant  $t=0$  sur la courbe.
- Lorsque la sollicitation galvanostatique (injection du courant continu  $J_p$ ) débute à  $t=0$ , un saut instantané de potentiel en surface du béton  $\Delta E_{\Omega}$  est mesuré par l'électrode de référence. La chute ohmique correspondante ( $\Delta E_{\Omega}/J_p$ ) est alors convertie en résistivité du béton d'enrobage.
- La réponse en régime permanent  $\Delta E_{p,surf}$  obtenue à stabilisation de la courbe en surface est ensuite utilisée pour déterminer la vitesse de corrosion de l'armature via la résistance de polarisation ( $\Delta E_p/j_{pi}$ ) en évaluant la polarisation sur l'armature  $\Delta E_p$  et la densité de courant reçue  $j_{pi}$ .

Dans les deux derniers points, le processus d'exploitation de la mesure est fondé sur des abaques obtenus par simulations numériques. La méthodologie exige que le diamètre des armatures et l'épaisseur du béton d'enrobage soient connus mais ce travail d'inspection (par méthode radar par exemple) constitue un préliminaire nécessaire à un diagnostic fiable de corrosion.

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). Il est construit à l'aide d'un modèle éléments finis en 3D et permet de simuler numériquement les mesures de la sonde

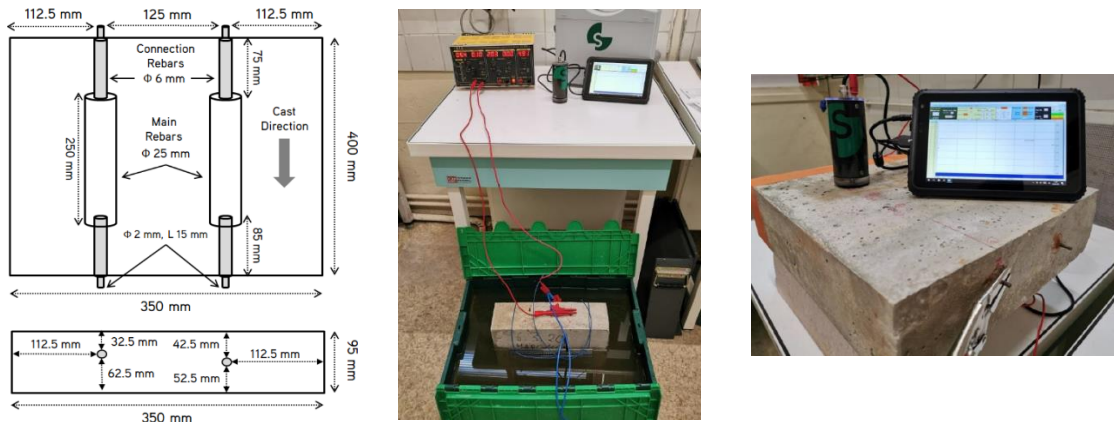


**FIGURE 2.** Modèle EF 3D et exemple de champ de potentiel associé en réponse instantanée et en régime établi pour une polarisation galvanostatique

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.

### III. RESULTATS EXPERIMENTAUX

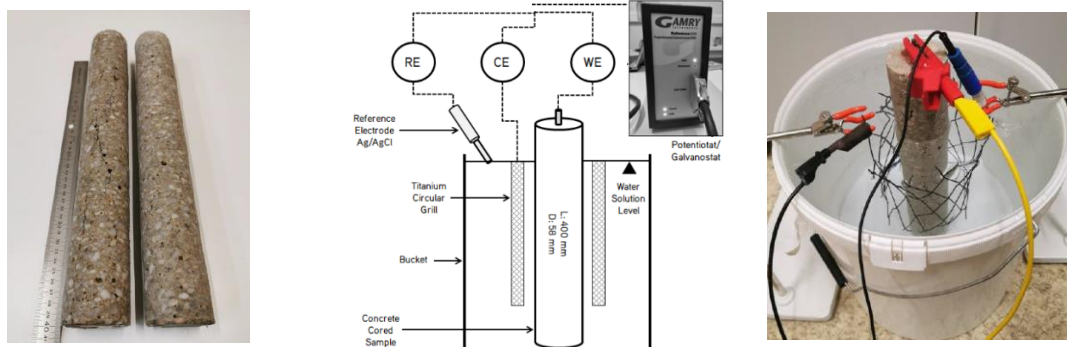
Cette partie présente les résultats d’un pré-test de validation expérimentale menée avant une campagne beaucoup plus large et toujours en cours. L’objectif principal est de valider les propriétés électrochimiques mesurées avec la sonde DIACOR par comparaison avec des méthodes directes telles que les 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, 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
$E_{corr}$ [mV / Ag/AgCl/KClsat]	- 20 ; 14	- 566 ; 15	- 524
$\rho$ [ $\Omega$ .m]	113 ; 39	55 ; 23	89
$i_{corr}$ [ $\mu$ A/cm <sup>2</sup> ]	0,15 ; 0,06	5,5 ; 1,8	8,9

Les valeurs obtenues par DIACOR sont encourageantes. Après contamination, le potentiel de corrosion  $E_{corr}$  chute et la densité de courant de corrosion  $i_{corr}$  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  $i_{corr}$ .

#### IV. CONCLUSION

La sonde DIAMOND 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.

#### REFERENCES

M.E. Mitzithra, F. Deby, J.P. Balayssac, & J. Salin. (2015). Proposal for an alternative operative method for determination of polarisation resistance for the quantitative evaluation of corrosion of reinforcing steel in concrete cooling towers. *Nucl. Eng. Des.*, 288, 42-55.

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.