

# Diagnostic de la corrosion des structures en béton armé par mesure simultanée du potentiel de corrosion, de la résistivité du béton d'enrobage et de la vitesse de corrosion des armatures

Fabrice Deby<sup>1</sup>, Gabriel Samson<sup>1</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. Le design géométrique de la sonde est simple : un courant est injecté par une contre-électrode annulaire et la réponse en potentiel est mesurée au centre, au niveau d'une électrode de référence. Afin d'inverser les mesures réalisées en surface pour en déduire la résistivité du béton d'enrobage et la vitesse de corrosion des armatures, l'ensemble du dispositif expérimental a fait l'objet d'un jumeau numérique fondé sur un modèle 3D éléments finis.

**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 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 DIAMOND 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  $\mu\text{A}$  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. A noter qu'une sonde monitoring à introduire dans le béton a également été créée ; le principe de la mesure reste le même mais elle n'est pas présentée ici.

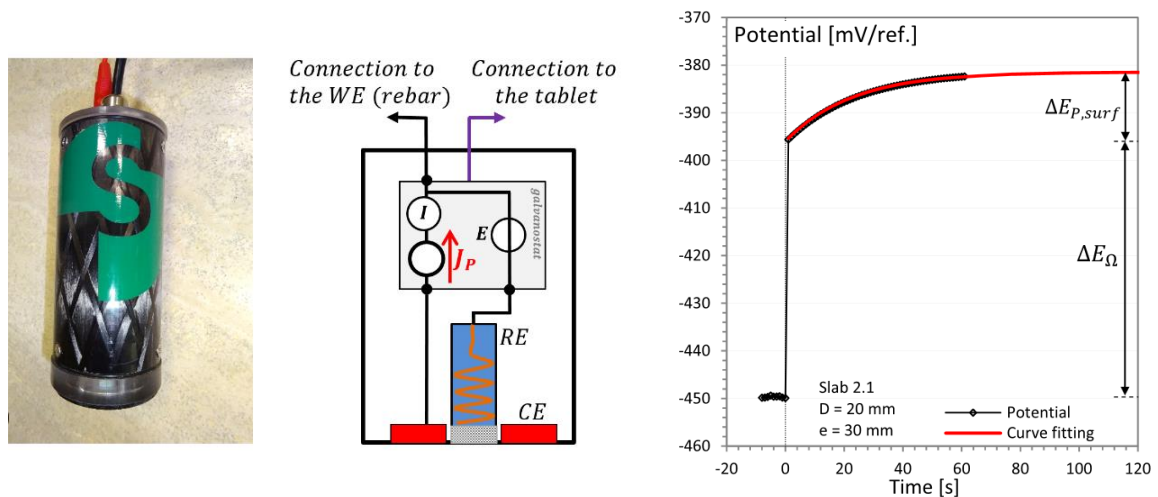
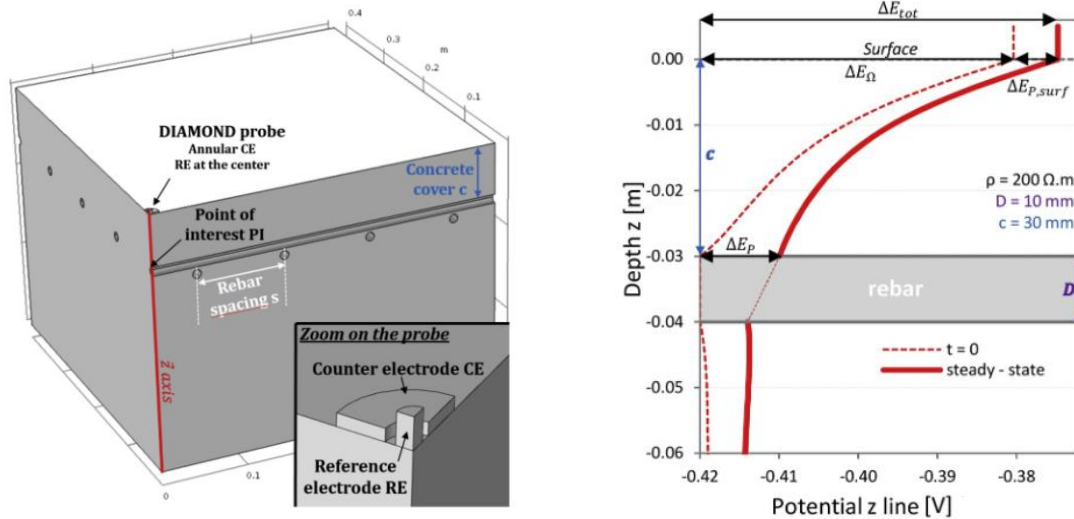


FIGURE 1. Design de la sonde et exemple de réponse en potentiel mesurées en fonction du temps

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 par des abaques présentés partie III.
- 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 ( $\Delta E_P/j_{pi}$ ) estimée elle aussi par des abaques présentés partie III qui évalue la polarisation sur l'armature  $\Delta E_P$  et la densité de courant reçue  $j_{pi}$ .

Dans les deux derniers cas, 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.

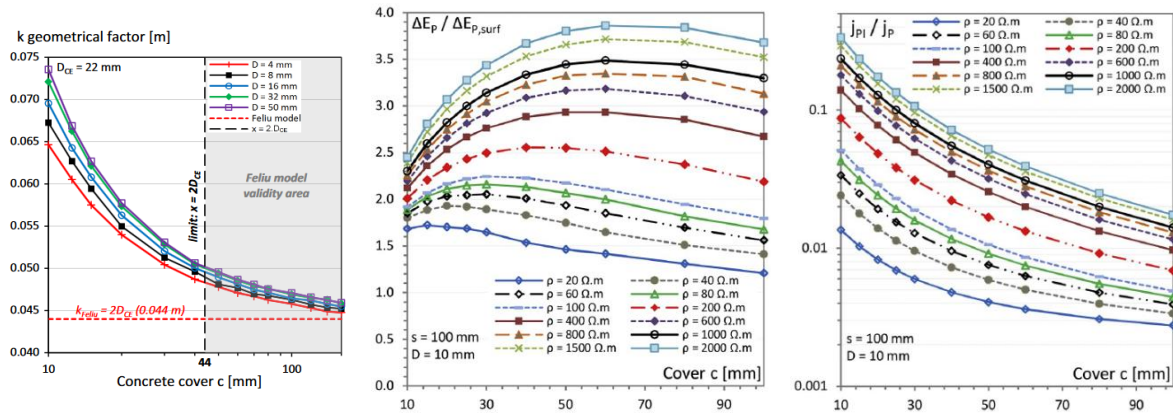


**FIGURE 2.** Modèle EF 3D et exemple de champ de potentiel associé en réponse instantanée et en régime établi pour une polarisation galvanostatique

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. 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. RESISTIVITE DU BETON D'ENROBAGE ET VITESSE DE CORROSION

Dans cette partie sont présentés des exemples d'abaques construits à l'aide du jumeau numérique. La résistance du béton (chute ohmique  $\Delta E_{\Omega}/j_p$ ), mesurée par le saut instantané en potentiel au début de la mesure galvanostatique, est transformée en résistivité  $\rho$  du béton d'enrobage. Pour cela, différentes configurations sur une large gamme de résistivité ont permis d'extraire du jumeau numérique le facteur géométrique  $k$  correspondant de telle sorte que  $\rho = k \cdot \Delta E_{\Omega}/j_p$ . La Fig. 3 présente ainsi l'abaque du facteur géométrique de la sonde en fonction de l'épaisseur du béton d'enrobage et du diamètre de l'armature. Ce facteur géométrique tend vers une valeur théorique égale à deux fois le diamètre de la contre électrode. Pour des valeurs d'enrobage usuelles inférieures à 5 cm, la valeur  $k$  est assez éloignée de cette valeur théorique d'autant plus que l'enrobage est faible. Le recours au jumeau numérique permet donc de remonter plus finement à la résistivité du béton d'enrobage.



**FIGURE 3.** Abaqués pour évaluer la résistivité du béton d’enrobage, corriger la chute ohmique et déterminer la densité de courant reçue sur l’armature (valable sur une gamme  $\rho$  [20 – 2000  $\Omega\cdot\text{m}$ ],  $c$  [5 – 70 mm] et des densités de courants de corrosion inférieures à 1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

Deux autres abaques sont présentés sur la Fig. 3. Ils permettent d’exploiter la mesure du saut de potentiel en surface du béton en régime permanent  $\Delta E_{p,surf}$ . Il convient de remonter à la polarisation de l’armature  $\Delta E_p$ , polarisation plus forte que celle mesurée en surface du fait de l’atténuation de la réponse par l’épaisseur du béton d’enrobage. Ainsi le ratio  $\Delta E_p / \Delta E_{p,surf}$  est évalué numériquement pour différentes configurations à partir notamment de la résistivité, de l’épaisseur d’enrobage, du diamètre des armatures et de leurs espacements pour construire les abaques correspondants. De la même façon, la densité de courant reçue par l’armature  $j_{p1}$  est évaluée à partir de la densité de courant injectée par la contre électrode en surface  $j_p = J_p / S_{CE}$ . Le ratio  $j_{p1} / j_p$  est donc calculé là encore dans différentes configurations pour construire les abaques présentés Fig. 4. Ces deux abaques permettent donc de remonter au potentiel et à la densité de courant au droit de la sonde sur l’armature afin de calculer sa résistance de polarisation et estimer alors sa vitesse de corrosion.

#### IV. CONCLUSION

La sonde DIAMOND est un dispositif innovant permettant conjointement de mesurer le potentiel de corrosion, d’évaluer la résistivité du béton d’enrobage et la vitesse de corrosion des armatures à partir d’une seule mesure de potentiel sous sollicitation galvanostatique.

La méthodologie associée est fondée sur un jumeau numérique 3D de l’ensemble du dispositif expérimental afin d’inverser via des abaques les mesures réalisées en surface du béton par la sonde pour remonter aux informations sur le réseau d’armatures.

#### 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.