

Estimation de l'état de corrosion de l'acier dans le béton armé par mesure de résistivité électrique

A. Q. Nguyen

LMDC, INSA/UPS Génie Civil, 135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse cedex 04 France

e-mail : aqnguyen@insa-toulouse.fr

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ. L'objectif de cette étude est de déterminer l'état électrochimique des aciers du béton armé à l'aide d'une inversion de mesure de résistivité électrique. Une nouvelle procédure de mesure utilisant un dispositif quadripolaire linéaire est présentée. Des mesures de résistivité au droit des armatures sont réalisées et une procédure d'inversion numérique permettant de déterminer les caractéristiques du béton et de l'acier est mise en place. La présence de l'armature diminue significativement la résistivité apparente à cause d'un effet de court-circuit qui confine le courant à l'intérieur du volume de béton situé au-dessus et au voisinage de l'acier. Cette chute de résistivité dépend de différents facteurs tels que l'épaisseur d'enrobage, la résistivité du béton et surtout l'état électrochimique de l'acier. Les simulations numériques permettent de retrouver la résistivité réelle du béton ainsi que les paramètres électrochimiques de l'acier en utilisant le modèle électrochimique de Butler-Volmer. Les résultats obtenus montrent l'intérêt de cette méthodologie afin d'étudier le risque de corrosion de l'acier dans les structures en béton armé.

ABSTRACT. The objective of this study is to use the electrical resistivity, by an original measurement methodology, to determine the electrochemical state of the steel. A new measurement procedure using the linear quadripole device is presented. Resistivity measurements performed over the reinforcing bar and a numerical inversion procedure are carried out to determine the characteristics of the concrete and the steel. The presence of the reinforcement significantly reduces the resistivity due to a short-circuit effect which confines the current inside the volume of concrete investigated over and in the vicinity of the reinforcing steel bar. This resistivity drop depends on various factors such as the cover thickness and especially the electrochemical state of the steel. Numerical simulations are made to find the actual resistivity of concrete as well as electrochemical parameters of the steel via the Butler-Volmer model. The results show the interest of the proposed methodology to estimate the corrosion state of steel in reinforced concrete structures.

MOTS-CLÉS : Contrôle non destructif, résistivité électrique, béton armé, corrosion, durabilité.

KEY WORDS: non-destructive evaluation, electrical resistivity, reinforced concrete, corrosion, durability.

La résistivité électrique est la caractéristique spécifique d'un matériau à s'opposer à la circulation du courant électrique. Elle est définie comme la résistance d'un cube unitaire d'un mètre de côté face au passage du courant. Contrairement à la résistance, la résistivité est une grandeur intrinsèque du matériau. Elle a pour unité l'ohm.mètre [$\Omega.m$] dans le système international et s'exprime par l'équation suivante :

$$\rho = \frac{\Delta V S}{I L} \quad [1]$$

Où ρ : résistivité électrique [$\Omega.m$], L : longueur de l'échantillon [m], S : section plane de l'échantillon [m^2], ΔV : différence de potentiel électrique [V], I : l'intensité du courant [A]. Issue de la géophysique, la mesure de résistivité électriques est utilisée en génie civil pour examiner les différentes caractéristiques du béton telles que sa porosité, sa teneur en eau et sa teneur en ions. La circulation du courant électrique dépend en effet fortement de la conductivité de la phase liquide présente dans le réseau poreux du béton.

Différents travaux dans la littérature ont confirmé la relation entre résistivité et corrosion. En général il est rapporté qu'une faible résistivité indique un fort risque de corrosion. Morris et al. [MOR 02] ont avancé que la résistivité électrique est un paramètre pour évaluer le risque de corrosion de l'acier, indépendamment de la formulation du béton et des conditions environnementales auxquelles il est exposé. Pour des échantillons immergés dans une solution saline, l'acier est considéré comme en état de corrosion actif lorsque la résistivité du béton est inférieure à 100 $\Omega.m$ et en état passif quand celle-ci est supérieure à 300 $\Omega.m$. Polder et al. [POL 00] ont proposé d'utiliser une cartographie de résistivité pour localiser les zones les plus perméables dans une structure, où le risque de la pénétration des ions chlorures est potentiellement plus élevé. Pour effectuer des mesures de résistivité fiables, tout en négligeant la présence des armatures, il est généralement recommandé de placer le dispositif de mesure le plus loin possible de celles-ci et d'utiliser un dispositif linéaire quadripolaire avec un écartement entre électrodes important [MIL 90]. Néanmoins, ces recommandations restent très difficiles à satisfaire sur une structure réelle en béton armé. La prise en compte de la présence de l'acier est donc indispensable pour évaluer correctement la résistivité du béton.

2. Bases théoriques

La mesure de résistivité peut se faire sur site par l'emploi d'un dispositif quadripolaire. C'est un dispositif qui comporte 4 électrodes séparant les circuits d'injection de courant et de mesure de potentiel (**Figure 1**). La mesure consiste à faire circuler dans le matériau ausculté un courant électrique entre deux électrodes (C1 et C2) et de mesurer la différence de potentiel entre les deux autres (P1 et P2), toutes les électrodes étant en contact avec la surface du matériau ausculté. La résistivité mesurée à partir d'une surface de la structure en béton armé est appelée résistivité apparente, calculée grâce à la relation [2]. Il ne s'agit pas de la résistivité réelle du béton si le milieu n'est pas semi-infini et homogène.

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)} \quad [2]$$

Avec ΔV : chute de potentiel entre P1 et P2 [V], I : intensité du courant [A], r_1 , r_2 , r_3 et r_4 respectivement les distances entre les électrodes de potentiel (P1 et P2) et les deux points d'injection (C1 et C2) (voir **Figure 1**).

Les perturbations causées par la présence des aciers dans le béton sur la mesure de résistivité électrique ont été mises en évidence dans différents travaux de recherche. [POL 00; SEN 08] ont rapporté que les barres d'acier influencent la mesure de résistivité, c'est pourquoi ils recommandent d'éloigner le dispositif des armatures d'acier afin de minimiser leur influence. Breysse et al. [BRE 05] ont recommandé de positionner le dispositif de mesure perpendiculairement aux barres d'aciers ou en diagonal à l'intérieur d'une maille d'aciers pour limiter leurs effets. Ces recommandations présentent cependant un défaut car il est nécessaire dans certains cas de réduire l'écartement des électrodes de courant, or, selon [MIL 90], un faible écartement diminue fortement la fiabilité de la mesure de résistivité.

Lorsque les mesures sont effectuées aux limites des structures auscultées, elles sont également fortement influencées par les effets de bord. Ces effets provoquent une surestimation de la résistivité réelle [MIL 91; LAT 02]. Lataste [LAT 02] a constaté que pour une injection du courant parallèle au bord, la résistivité mesurée est toujours surestimée par rapport à la résistivité apparente du matériau obtenue à mi-hauteur d'une poutre. Gower et al. ont confirmé que l'effet de bord est d'autant plus important que la structure examinée est de faibles dimensions que ce soit en épaisseur ou en plan [GOW 99].

Dans nos travaux de recherche nous avons montré par voie numérique et expérimentale qu'on pouvait se servir des aciers présents dans les structures examinées afin de s'affranchir des effets de bord [NGU 16]. En effet, nous avons mis en évidence que les mesures réalisées directement au-dessus d'un acier sont fortement influencées par ce même acier. Ceci a pour conséquence de confiner les courants électriques dans le volume de

Afin de prendre en compte l'influence de l'acier dans les mesures de résistivité électrique, l'équation de Butler-Volmer a été utilisée [3]. Cette équation modélise les échanges de charges à l'interface acier-béton et a été validée dans de nombreux travaux de recherche tels que ceux de [NAS 10; CLE 12; SOH 13; MIT 15] :

$$j = j_{corr} \left[\exp \left(\ln(10) \frac{E - E_{corr}}{\beta_a} \right) - \exp \left(-\ln(10) \frac{E - E_{corr}}{\beta_c} \right) \right] \quad [3]$$

Avec j : la densité de courant d'échange [A/m^2], j_{corr} : densité du courant de corrosion [A/m^2], E : potentiel électrique [V], E_{corr} : potentiel de corrosion [V], β_c et β_a les coefficients cathodique et anodique de Tafel [V/decade].

3. Proposition d'une nouvelle technique de mesure de résistivité électrique

Nous proposons une nouvelle procédure de mesure basée sur l'usage d'un dispositif quadripolaire. Deux électrodes de courant C1 et C2 sont fixées à 20cm l'une de l'autre. La troisième électrode P1 est fixée à 3cm de C1 tandis que P2 est déplacée tous les centimètres le long du profil de mesure, entre P1 et C2 (**Figure 1**).

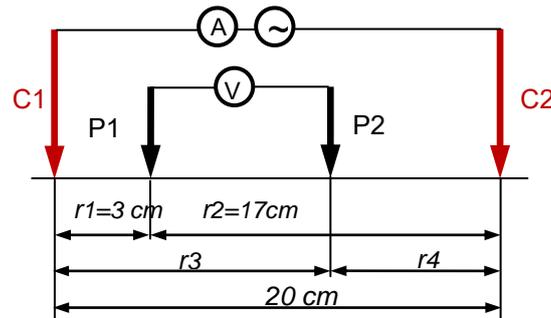


Figure 1 : Schéma de la procédure de mesure proposée

Le point P1 a été placé délibérément à 3cm de C1, ni trop proche ni trop loin de la source de courant, car si P1 est trop proche le potentiel est très élevé et donc il devient une source d'instabilité de mesures. En revanche si P1 est trop loin son potentiel est alors trop faible et l'écart de potentiel entre P2 et P1 n'est pas suffisant en certains points pour que la mesure soit supérieure aux bruits de mesures. Par cette méthode les différences de potentiel par rapport à une valeur fixe qui est le potentiel au point où se situe P1 sont mesurées. Cette méthode de mesure nous permet de balayer tous les points entre P1 et C2 ce qui nous permet ensuite de tracer une courbe de potentiel des points en surface entre les sources de courant. Sachant que le potentiel du point au centre de C1 et C2 est théoriquement nul, cette courbe est donc décalée par soustraction d'une valeur identique en tout point (qui est la valeur de ΔV correspondant à $r3 = 10$ cm) pour que la courbe de potentiel passe par 0 en son centre (**Figure 2**). L'intérêt de cette procédure de mesure est qu'elle ne nécessite pas d'appareils avec plusieurs canaux de mesure tels que ceux utilisés avec des dispositifs multi-électrodes. Un appareil basique à deux voies d'injection du courant et deux voies de potentiel est donc suffisant.

Au cours de nos travaux nous avons souligné la difficulté d'exploiter directement la courbe de potentiel obtenue. Afin de rendre cette courbe plus explicite nous l'avons transformée en courbe de résistivité en utilisant une configuration dite symétrique, dans laquelle les électrodes de potentiel P1 et P2 sont supposées toujours positionnées symétriquement l'une et l'autre par rapport au centre de la ligne de mesure (**Figure 3**). Par exemple si P1 est située à $r1$ de C1 alors P2 s'écarte aussi d'une même distance $r1$ de C2. Cette configuration symétrique « fictive » n'est donc qu'une façon d'exploiter la courbe de potentiel, car une courbe de résistivité est plus facile à interpréter qu'une courbe de potentiel.

Dans cette configuration, la résistivité apparente mesurée est calculée selon la relation [4] modifiée de l'équation [2]. Théoriquement, cette formule donne une valeur de résistivité réelle si le milieu ausculté est homogène et semi-infini.

$$\rho_{app} = \frac{\pi \Delta V}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} I} \quad [4]$$

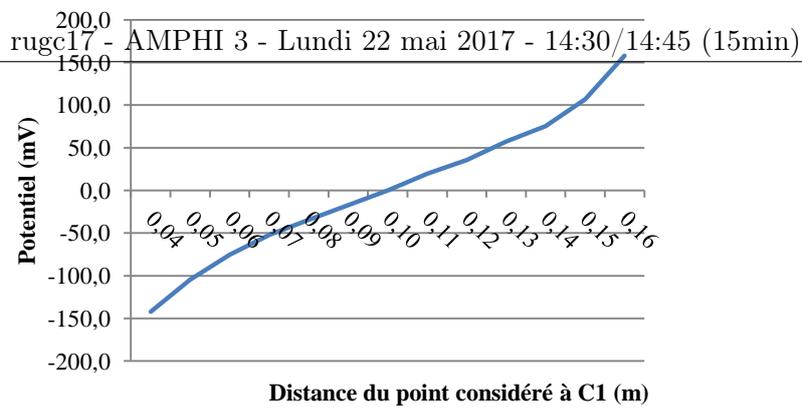


Figure 2 : Courbes de potentiel avant et après le décalage en fonction de la distance r_3 du point de mesure à C1

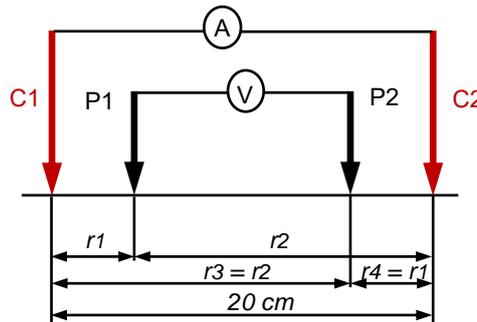


Figure 3 : Configuration symétrique pour l'évaluation de la résistivité électrique

4. Méthodologie

4.1. Etude expérimentale

Afin d'étudier l'effet de l'état électrochimique de l'acier sur la mesure de résistivité, nous avons travaillé sur des dalles de béton totalement carbonatées où les aciers présents sont dans un état électrochimique de corrosion dit « actif » et sur des dalles composées d'un même béton mais non carbonatées où les aciers sont dans un état électrochimique de corrosion dit « passif ». Au total six dalles ont été coulées pour cette étude. Trois dalles sont conservées dans une enceinte de carbonatation accélérée jusqu'à obtention de la carbonatation totale (dalles carbonatées), les trois dalles restantes sont conservées dans les conditions normales (dalles non carbonatées). Dans chacun des deux groupes il y a une dalle armée et deux dalles non armées dont une est conservée comme témoin. Pour s'assurer que le béton soit bien carbonaté, nous avons retiré de la dalle carbonatée témoin une carotte sur laquelle nous avons effectué un test à la phénolphthaléine.

La formulation de béton est présentée dans le **Tableau 1**. Toutes les dalles ont été coulées en même temps avec une même gâchée. Un rapport E/C élevé a été choisi afin de garantir l'obtention d'un béton à forte porosité et de faciliter ainsi la carbonatation.

Tableau 1 : Formulation du béton

Gravier 4/12.5 mm	970 kg/m ³
Sable 0/4 mm	770 kg/m ³
Ciment CEM I 52.5R	280 kg/m ³
Eau	198 kg/m ³
E/C	0,71
Porosité	18,8%

Chaque dalle mesure 50x25x12 cm (**Figure 4**). Quatre barres d'acier de diamètre 10mm ont été introduites dans la dalle armée avec deux épaisseurs d'enrobage différentes de 2 et 4cm. Les mesures sont réalisées directement au-dessus de l'acier pour les dalles armées et aux mêmes positions pour les dalles non armées afin de conserver les mêmes configurations géométriques de mesures (**Figure 5**). Les dalles étudiées ont été immergées dans de l'eau saturée de chaux jusqu'à saturation totale de la porosité. Dans cette campagne de mesure le béton est ainsi considéré comme un matériau homogène.

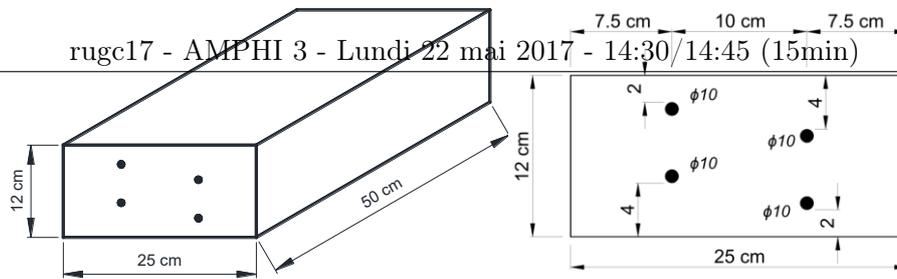


Figure 4 : Dalle armée, vue générale et vue de côté

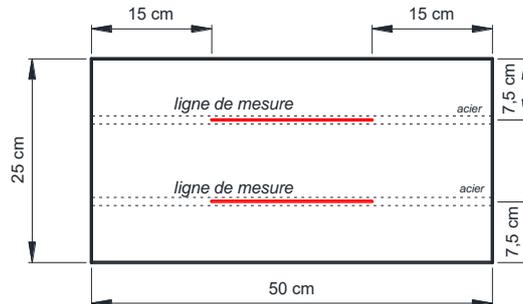


Figure 5 : Position des mesures sur dalle armée

4.2. Etude numérique

Les simulations numériques des mesures de résistivité sont réalisées avec COMSOL Multiphysics, un logiciel commercial basé sur la méthode des éléments finis. Ces simulations ont pour objectif de déterminer la résistivité réelle du béton ainsi que les paramètres électrochimiques de l'acier par une procédure d'inversion des résultats expérimentaux afin d'étudier son état de corrosion. Pour ce faire deux modèles numériques de dimensions identiques aux corps d'épreuves de la campagne expérimentale sont créés, correspondant à deux dalles : une non armée et l'autre armée (Figure 6). Afin de modéliser l'acier et son comportement, les aciers sont modélisés comme des tubes creux sur la surface desquels la densité de courant est contrôlée par l'implantation de l'équation de Butler-Volmer. Des valeurs de potentiel électrique calculées sont ainsi obtenues par la simulation du dispositif de mesure utilisé dans la campagne expérimentale et ont été exploitées par le biais de la configuration symétrique explicitée dans la formule [4] afin de tracer la courbe de résistivité numérique. L'inversion numérique revient ici à déterminer les paramètres inconnus (résistivité du béton et paramètres électrochimiques de l'acier) permettant de minimiser l'écart entre la simulation et la mesure. La procédure de cette étude d'inversion numérique est illustrée par la Figure 7.

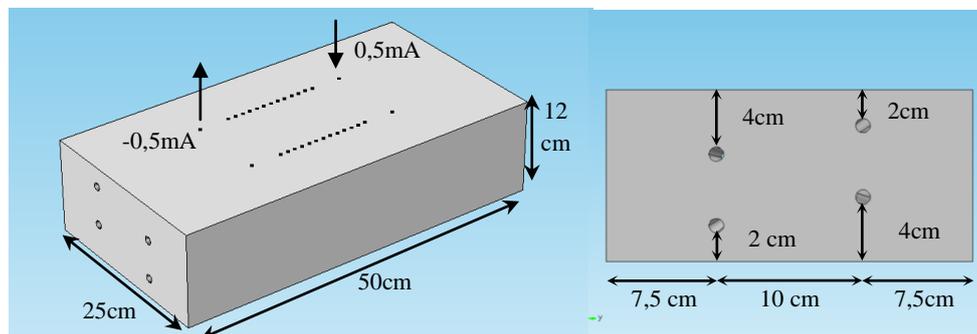


Figure 6 : Détails géométriques du modèle armé de simulation dans COMSOL Multiphysics ®

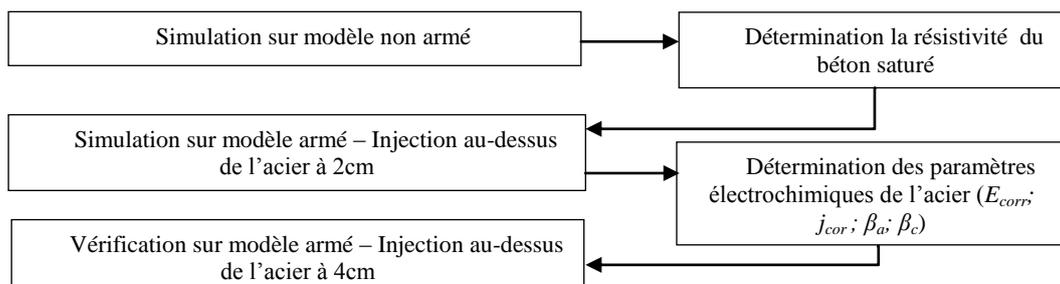


Figure 7 : Organigramme de la procédure d'inversion à partir des résultats numériques sur COMSOL

5.1. Résultats expérimentaux

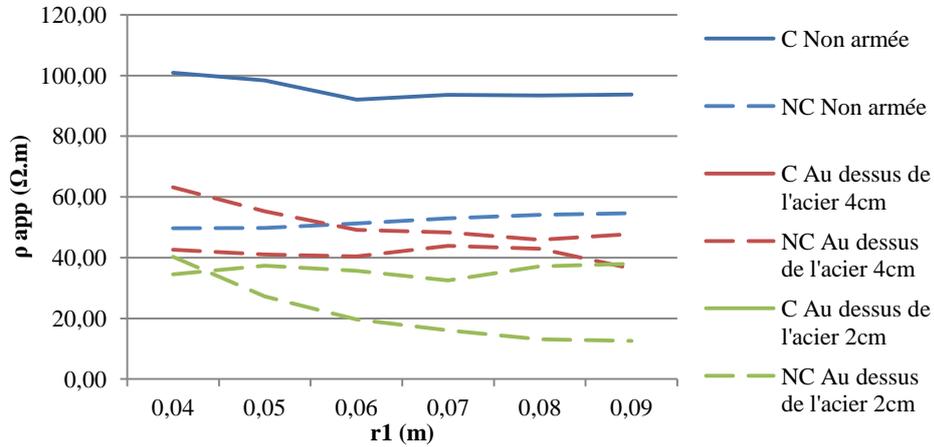


Figure 8 : Résistivités apparentes obtenues sur dalle armée et non armée, non carbonatée (ligne continue) et carbonatée (ligne pointillée)

Tableau 2 : Chute de la résistivité moyenne à 1 jour pour l'acier passif et actif

	Acier passif (dalle Non Carbonatée)	Acier actif (dalle Carbonatée)
2cm	16,23 $\Omega.m$ (31,00%)	73,90 $\Omega.m$ (77,48%)
4cm	10,85 $\Omega.m$ (20,83%)	43,77 $\Omega.m$ (45,89%)

L'ensemble des résultats expérimentaux est présenté sur la **Figure 8**. La résistivité apparente mesurée est exprimée en fonction de la distance $r1$ entre électrodes de potentiel – électrodes de courant. La relation entre les deux grandeurs a été démontrée dans [NGU 16]. Théoriquement plus la valeur de $r1$ croît plus la résistivité apparente est en lien avec la résistivité réelle en profondeur du béton ausculté (faible variation). En règle générale, il est impossible d'exploiter cette relation sauf dans le cas d'un milieu semi-infini sans acier et présentant un gradient uniquement sur la profondeur ce qui ne représente pas la réalité des mesures de terrain.

On observe que globalement la résistivité mesurée sur les dalles carbonatées est plus forte que celle mesurée sur les dalles non carbonatées. La carbonatation diminue d'une part la porosité du béton et d'autre part l'alcalinité de la solution interstitielle, rendant la teneur en eau volumique moins importante et la phase liquide moins conductrice. La conduction du courant dans le béton est donc moins favorisée sur le béton carbonaté que sur le béton non carbonaté [TUU 82; CLA 99]

En outre, une chute de résistivité mesurée est observée avec la présence de l'acier, que le béton soit non carbonaté ou carbonaté : les courbes de résistivité apparente de l'acier 2cm et 4cm se trouvent toujours au-dessous de celle de la dalle non armée. Cela peut être expliqué par l'effet de court-circuit. En effet, le béton est un matériau relativement résistif tandis que l'acier est électriquement conducteur. La résistivité de l'acier étant de l'ordre 10^{-6} $\Omega.m$, largement plus faible à celle du béton, les armatures d'acier constituent un chemin préférentiel pour le courant électrique, ce qui explique des résultats bien inférieurs à ceux des dalles non armées. Le **Tableau 2** montre par ailleurs la chute de résistivité dans différents cas de mesure, sur deux types de béton étudiés, correspondant à deux états de corrosion de l'acier : passif pour le béton non carbonaté et actif pour le béton carbonaté. Cette chute de résistivité a été calculée avec la relation [5] :

$$\text{Chute de résistivité} = \left(1 - \frac{\text{Moyenne des mesures au droit de l'acier}}{\text{Moyenne des mesures sur dalle non armée}} \right) \cdot 100\% \quad [5]$$

Les résultats présentés dans le **Tableau 2** montrent que l'épaisseur et la résistivité électrique du béton d'enrobage sont des facteurs déterminants dans l'effet de court-circuit : plus l'acier se trouve près de la surface et plus le béton est électriquement résistif, alors plus l'effet de court-circuit est significatif. Il est également observé que la chute de résistivité est plus importante sur l'acier actif que sur l'acier passif (sur l'acier 2cm, 77,48% pour l'acier actif contre 31% pour l'acier passif, et sur l'acier 4cm ; 45,89% et 20,83% respectivement). Ainsi l'état passif ou actif de l'acier influence fortement la résistivité mesurée. En effet, tant que le béton n'est pas carbonaté l'acier est protégé par un film passif. Pour l'acier actif, ce film passif est détruit, favorisant la polarisation de l'acier sous l'effet d'un courant externe. Ce phénomène peut être caractérisé grâce à la mesure de résistance de polarisation R_p de l'acier lorsqu'un courant lui est appliqué. Pour l'acier actif, la résistance de

polarisation R_p est plus faible que pour l'acier passif. Par conséquent, le transfert de charge électrique à l'interface acier-béton est plus facile sur l'acier actif, ce qui se traduit par une chute de la résistivité apparente mesurée.

5.2. Résultats de l'inversion numérique

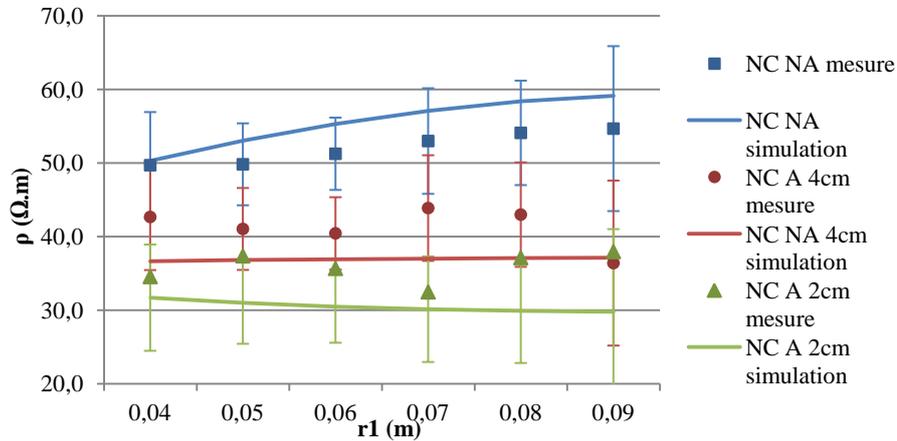


Figure 9 : Résultats de simulation et de mesure sur dalles carbonatées saturées

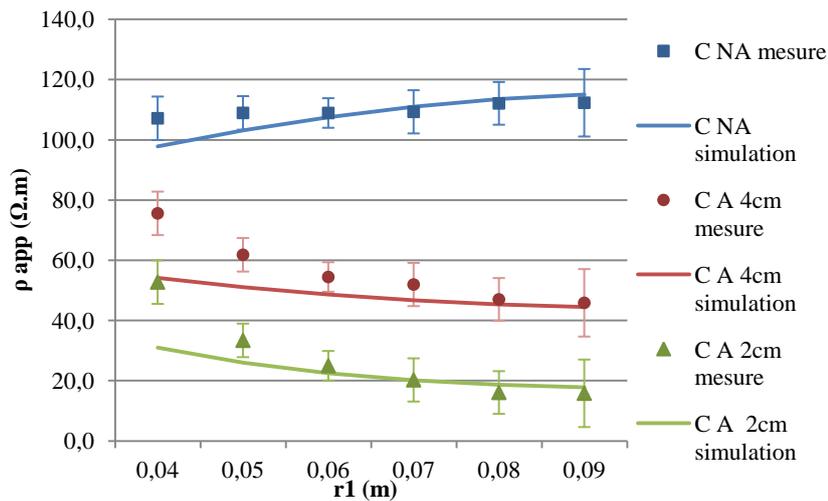


Figure 10 : Résultats de simulation et de mesure sur dalles non carbonatées saturées

Les résultats de simulation sont présentés dans les **Figure 9** et **Figure 10**. Les barres d'erreur, correspondant à l'écart type de mesure, sont déterminées grâce à un test de répétabilité basé sur une série de 15 mesures sur un même béton et à une même position. Ces barres représentent l'intervalle de confiance de 99%, il y a donc 99% de chance que la vraie résistivité se trouve dans cet intervalle. Le **Tableau 3** présente l'ensemble des résultats (résistivité électrique du béton et paramètres de Butler-Volmer de l'acier) trouvés par inversion numérique des mesures ainsi que les écarts entre les résultats de la simulation et des mesures. Les résultats obtenus semblent cohérents avec ceux trouvés par [SOH 13] sur un béton de même composition et les matériaux similaires sauf pour la densité de courant de corrosion j_{corr} . Le rapport entre $j_{corr,a}$ de l'acier actif et $j_{corr,p}$ de l'acier passif est de 5, ce qui signifie que, pour l'acier actif, l'échange de charges électriques à l'interface acier-béton est bien plus élevé que pour l'acier passif. Cela correspond à un effet de court-circuit plus fort, qui explique la chute plus prononcée de résistivité au-dessus de l'acier actif. Cette constatation démontre l'intérêt de mettre en œuvre cette procédure de mesure pour étudier l'état de corrosion (passif ou actif) de l'acier. En comparant les paramètres de Butler-Volmer des aciers, l'état de corrosion des aciers peut être estimé ce qui permet d'envisager d'utiliser cette technique pour identifier des zones de corrosion potentielle à l'échelle de l'ouvrage.

Tableau 3 : Résultats issus de l'inversion
 rugc17 - AMPHI 3 - Lundi 22 mai 2017 - 14:30/14:45 (15min)

		Béton non carbonaté (acier passif)	Béton carbonatée (acier actif)
Résistivité réelle du béton $\rho_{\text{béton}}$		36 Ω .m	56 Ω .m
Paramètres électrochimiques de l'acier	j_{corr}	2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
	E_{corr}	-150 mV	-650 mV
	β_a	500 mV/dec	120 mV/dec
	β_c	80 mV/dec	150 mV/dec
Ecart entre la simulation et les mesures	Non armé	6,7%	1,5%
	Au-dessus de l'acier à 2cm	14,9%	16,4%
	Au-dessus de l'acier à 4cm	10,4%	13,62%

6. Conclusion

Une nouvelle procédure de mesure utilisant le dispositif quadripolaire linéaire associée à un processus d'inversion par simulation numérique est proposée dans cet article. Il est également proposé d'utiliser l'effet de court-circuit généré par les aciers qui permet de confiner le courant dans la zone d'enrobage autour de l'acier. Cet effet de court-circuit a été démontré numériquement et expérimentalement par une diminution forte de la résistivité apparente mesurée. L'influence de l'épaisseur d'enrobage et de l'état électrochimique de l'acier sur l'effet de court-circuit a été mise en évidence : la chute de résistivité est d'autant plus importante que l'acier est dépassivé et qu'il se trouve près de la surface. La simulation des mesures permet de proposer une procédure d'inversion des résultats expérimentaux afin de retrouver la résistivité du béton d'enrobage et les paramètres électrochimiques de l'acier. Les résultats trouvés sont cohérents avec les gammes de valeurs disponibles dans la littérature avec une densité de courant j_{corr} de l'acier actif 5 fois plus grande que celle de l'acier passif. Ces résultats démontrent la pertinence de la méthodologie de mesure proposée consistant à exploiter l'effet de court-circuit par l'armature ainsi que du processus d'inversion basé sur un modèle numérique simulant les mesures de résistivité en utilisant l'équation de Butler-Volmer.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [BRE 05] BREYSSE D., ABRAHAM O. « *Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton* ». Paris, France : Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 2005. 560 p. (Association Française de Génie Civil; Confédération Française pour les Essais Non Destructifs).
- [CLA 99] CLAISSE P. A., EL-SAYAD H. I., SHAABAN I. G. « Permeability and Pore Volume of Carbonated Concrete ». *Materials Journal*. May 1999. Vol. 96, n°3, p. 378-381.
- [CLE 12] CLÉMENT A., LAURENS S., ARLIGUIE G., DEBY F. « Numerical study of the linear polarization resistance technique applied to reinforced concrete for corrosion assessment ». *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. Vol. 16, n°3-4, 2012, p. 491-504.
- [GOW 99] GOWERS K. R., MILLARD S. G. « Measurement of concrete resistivity or assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique ». *ACI Material Journal*. Vol. 96, n°5, 1999, p. 536-541.
- [LAT 02] LATASTE J. F., Evaluation non destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton armé par mesure de résistivité électrique, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, 2002.
- [MIL 91] MILLARD S. G. « Reinforced concrete resistivity measurement techniques ». *ICE Proceedings*. Vol. 91, n°1, 1991, p. 71-88.
- [MIL 90] MILLARD S. G., GHASSEMI M. H., BUNGEY J. H. « Assessing the electrical resistivity of concrete structures for corrosion durability studies ». *3rd Symposium on corrosion of reinforcement in concrete construction*. Wishaw, Scotland, 21-24 Mai 1990, Edition: Elsevier Science, Society of Chemical Industry, 1990, p. 303-313.
- [MIT 15] MITZITHRA M. E., DEBY F., BALAYSSAC J. P., SALIN J. « Proposal for an alternative operative method for determination of polarisation resistance for the quantitative evaluation of corrosion of reinforcing steel in concrete cooling towers ». *Nuclear. Engineering Design*. Vol. 288, 2015, p. 42-55.
- [MOR 02] MORRIS W., VICO A., VAZQUEZ M., DE SANCHEZ S. R. « Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements ». *Corrosion Science*. Vol. 44, n°1, 2002, p. 81-99.
- [NAS 10] NASSER A., CLÉMENT A., LAURENS S., CASTEL A. « Influence of steel-concrete interface condition on galvanic corrosion currents in carbonated concrete ». *Corrosion Science*. Vol. 52, n°9, 2010, p. 2878-2890.
- [NGU 16] NGUYEN A. Q. « Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique ». Thèse de Doctorat, Université de Toulouse Midi-Pyrénées, 2016.
- [POL 00] POLDER R., ANDRADE C., ELSENER B., VENNESLAND Ø., GULIKERS J., WEIDERT R., RAUPACH M. « Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete ». *Materials and Structures*, Vol. 33, n°10, 2000, p. 603-611.
- [SEN 08] SENGUL O., GJØRV O. E. « Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction ». *ACI Material Journal*. Vol. 106, n°6, 2008, p. 541-547.
- [SOH 13] SOHAIL M. G. « Corrosion of Steel in Concrete: Development of an Accelerated Test by Carbonation and Galvanic Coupling ». Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2013.
- [TUU 82] TUUTTI K. « Corrosion of steel in concrete », Suède. 1982. 469 p. Sweden Cement and Concrete Research Institute