

# Vers un dimensionnement plus robuste des systèmes de maintenance électrochimique

Abdel Razzak EL ZOHBY

*Université de Toulouse, UPS, INSA, LMDC 135 avenue de Rangueil, 31077, Toulouse Cedex 4, France*

## RESUME

La fin de la durée de vie prévue pour de nombreuses constructions en béton armé érigées entre 1950 et 1970 ainsi que la problématique majeure de l'empreinte carbone des nouvelles constructions impose aujourd'hui aux techniques de maintenance et de réhabilitation une performance et une durabilité accrues. Face aux défis posés par la corrosion, la maintenance électrochimique s'impose comme la seule stratégie viable pour prévenir les défaillances structurelles. Cependant, malgré son potentiel, des points essentiels liés à la durabilité de ces systèmes de maintenance restent encore dans l'ombre. Cette étude fournit une analyse approfondie des phénomènes de distribution des lignes de courant dans le béton. La répartition 3D obtenue montre qu'une approche physique globale est nécessaire à l'optimisation de ces techniques électrochimiques. Les aspects évolutifs des mécanismes se produisant aux interfaces électrochimiques sont également étudiés. Une augmentation significative de la résistance de polarisation a été ainsi constatée, à l'interface anodique et cathodique, atteignant 40 % dans certains cas, sans aucune altération de la matrice cimentaire (pas d'acidification ou dégradation).

**Mots-clés :** béton armé, maintenance électrochimique, courants de polarisation, interfaces électrochimiques, durabilité.

## I. INTRODUCTION

Au premier plan de l'infrastructure, les structures en béton armé, qu'il s'agisse d'édifices architecturaux, de réseaux de ponts vitaux ou de constructions diverses, constituent la forme de construction prédominante dans le monde entier (Liberati et al., 2014; Yakut, 2004). Or, une grande partie de ces structures, construite entre les années 1950 et 1970, voit désormais la fin imminente de leurs durées d'exploitation. Couplé aux problématiques de durabilité du béton armé, ce vieillissement représente une préoccupation majeure dans le domaine de l'ingénierie civile (Böhni, 2005; Stratfull, 1957). Ces préoccupations étaient déjà présentes dans les années 90, comme celles mentionnées dans un rapport au gouvernement fédéral en 1993, indiquant que 44% des plus de 500.000 ponts aux Etats-Unis souffraient de problèmes structurels ou devaient être soumis à des limitations de poids (Cramer et al., 2002). La France était également l'un des pays qui a réalisé très tôt que les infrastructures, en particulier celles en béton armé, ont une durée de vie non permanente.

En 2019, la mission d'information du Sénat français sur la sécurité des ponts a constaté que seuls 23,5 % des ponts du réseau routier national (RRN) ont été construits après 1995 (MAUREY et al., 2019). Un quart de ces ponts ont été construits entre 1951 et 1975, et ont donc atteint, ou vont bientôt atteindre, la fin de leur durée d'exploitation. Dans cette optique, des stratégies de maintenance et de réhabilitation doivent être largement généralisées, afin de préserver ces ouvrages, et ainsi atténuer l'empreinte carbone qui serait associée à des projets de démolition et de construction (Bostanci et al., 2018).

Dans le domaine de la corrosion, cause première de défaillance de ces structures (François et al., 2018; Sanchez et al., 2017) et source d'impact économique majeur (Koch et al., 2016), la maintenance électrochimique apparaît comme la seule solution viable afin de préserver les structures existantes ou de prévenir les dommages dans le cas de nouvelles constructions. Trois techniques de maintenance électrochimique se sont ainsi développées : la protection cathodique, la déchloruration et la ré-alcalinisation.

Quelle que soit la technique électrochimique mise en œuvre, le principe de fonctionnement reste similaire et consiste à appliquer un courant à l'armature d'acier (via un système d'anode externe) et, par conséquent, à soumettre le béton à un champ électrique. Bien que massivement déployées dans le monde aujourd'hui, l'efficacité des approches physiques unidimensionnelles utilisées pour dimensionner ces techniques de maintenance reste à démontrer. Le paradigme de l'uniformité dans ce domaine est basé sur plusieurs concepts 1D, incluant l'uniformité des courants de polarisation envoyés de l'anode pour protéger les aciers (Sagues et Kranc, 1992; Sassine et al., 2016). De plus, les réactions d'oxydoréduction qui se produisent aux interfaces électrochimiques conduisent à des interrogations légitimes quant à la pérennité de cette solution technique sur les durées de service visées.

Dans l'approche proposée, la recherche vise à répondre aux aspects décrits précédemment. Elle porte sur l'analyse de la distribution spatiale des courants de polarisation dans les techniques de maintenance électrochimique pour mieux prévoir les niveaux de protection des barres. Ce travail vise également à améliorer notre compréhension du comportement électrochimique dans les milieux cimentaires, notamment en évaluant les interactions des interfaces (électrode/matrice) à long terme. A cet égard, un nouveau dispositif expérimental permettant de réaliser des essais dans des conditions contrôlées devrait être mis en place. La mise en lumière de ces aspects fondamentaux permettra de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans la maintenance électrochimique, dans le but d'améliorer la fiabilité de ces systèmes et d'ouvrir la voie à un dimensionnement plus optimisé et soutenable.

## II. ETUDE DE LA DISTRIBUTION SPATIALE DES COURANTS DE POLARISATION

Dans cette étude, une campagne de simulation a été réalisée. Elle a été basée sur une représentation réaliste selon l'Eurocode 2 d'un élément structurel de base, à savoir une "poutre". Les dimensions de la poutre sont de 600 cm de longueur et de 40 cm x 70 cm de section transversale (largeur x

hauteur), respectivement. Elle est renforcée par huit barres longitudinales d'un diamètre de 20 mm dans les deux lits inférieurs et quatre barres d'un diamètre de 10 mm dans le lit supérieur, formant ainsi un lit d'assemblage. Le renforcement transversal est assuré par deux cadres HA8, avec deux brins chacun. Des approximations sont prises en compte, telles que l'absence de zones de recouvrement et d'ancrage des barres, permettant de considérer que l'on se trouve dans une zone courante. En exploitant les symétries du problème, tenant implicitement la symétrie des champs de chlorure, il est possible de ne simuler qu'un quart du modèle numérique (Fig. 1). Il a été choisi de simuler des anodes supposées inertes, induisant des courants imposés, reproduisant ainsi le cas du titane MMO (Mixed Metal Oxides) le plus utilisé en protection cathodique grâce à sa fiabilité et sa robustesse (Kroon and Ernes, 2007). Ainsi, on considère que les aciers sont passifs, illustrant un cas électrochimique uniforme. En effet, ce dernier peut être observé dans diverses structures soumises à une maintenance électrochimique, y compris la prévention cathodique et d'autres approches visant à contrer les facteurs responsables de la corrosion, tels que les ions chlorures et la carbonatation.

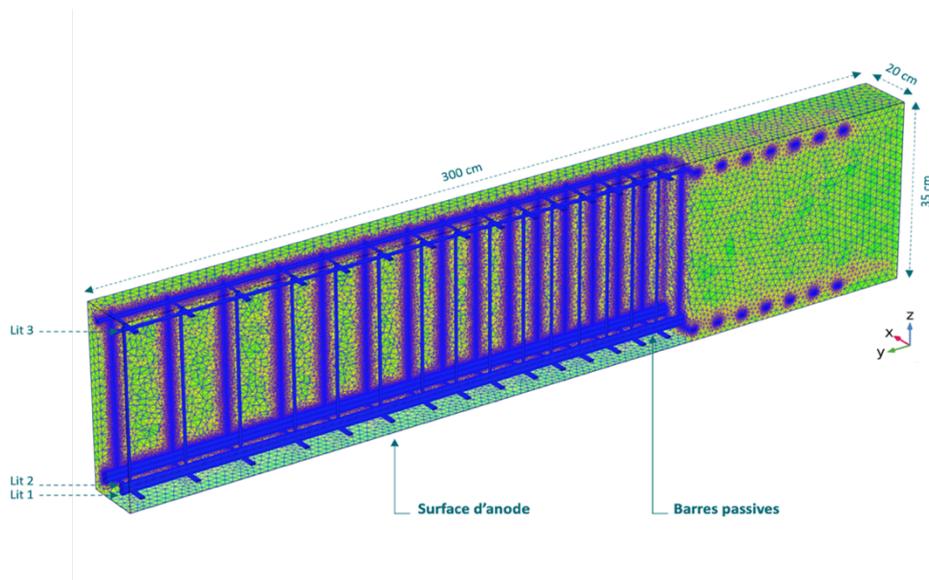


Figure 1. Modèle géométrique simulé (poutre 1/4 - plan de symétrie  $(x,z)$  à  $y = 300$  cm et  $(y,z)$  à  $x = 20$  cm) et maillage.

Toutes les simulations ont été effectuées en régime permanent, à l'aide du logiciel d'éléments finis Comsol Multiphysics® en considérant que les phénomènes de transfert de charge électrique dans le volume de béton sont régis par la loi d'Ohm locale (équation 1) et l'équation de conservation de la charge (équation 2).

$$\mathbf{i} = -\frac{1}{\rho} \nabla E \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{i} = 0 \quad (2)$$

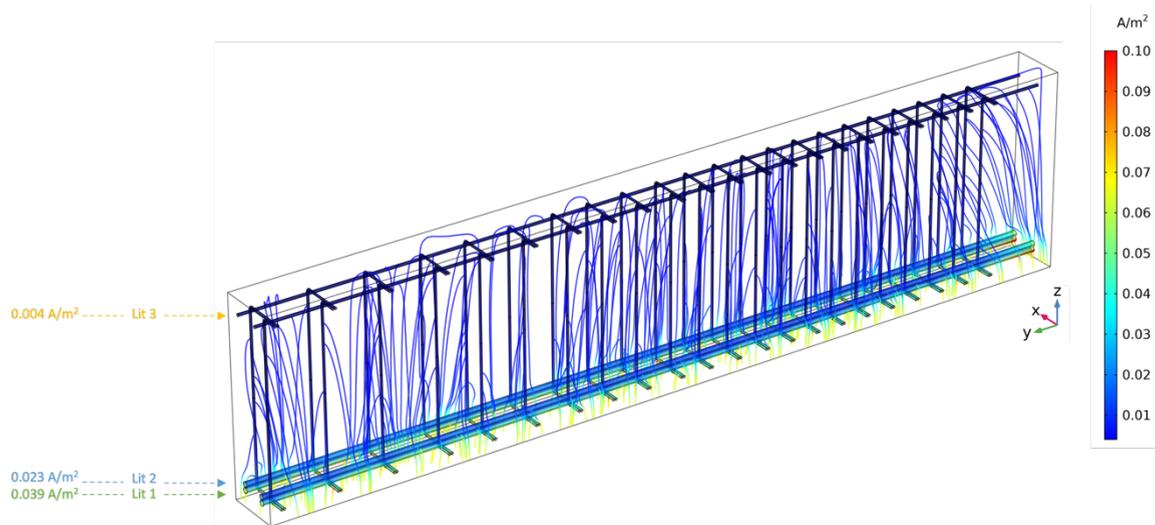
Où :

$\mathbf{i}$  est le vecteur de densité de courant local ( $A/m^2$ ),

$E$  est le champ électrique (V/m),

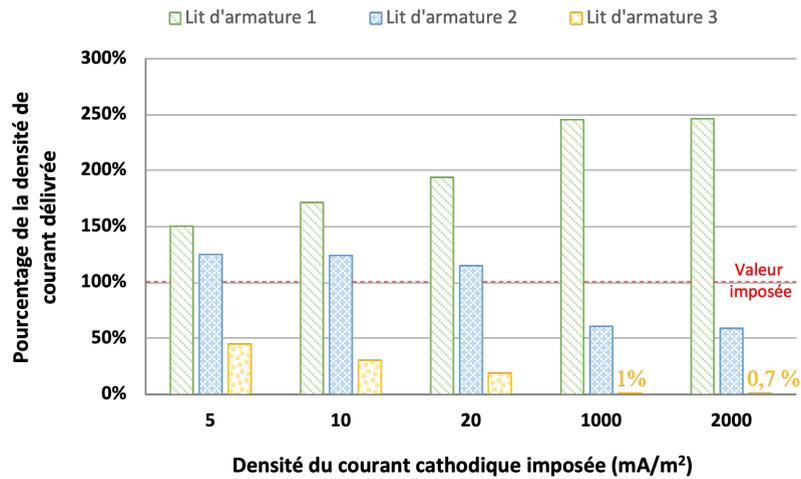
$\rho$  est la résistivité électrique du béton ( $\Omega.m$ ).

Dans cette étude, nous appliquons une densité de courant anodique nécessaire à l'établissement d'une densité de courant cathodique de  $20 \text{ mA/m}^2$  d'acier, englobant tous les renforts en acier et les cadres transversaux. Cette valeur a été choisie dans le but de reproduire un cas de figure simulant une protection cathodique. La **Fig. 2** illustre les courants ioniques formés entre la surface anodique inférieure de la poutre et les barres d'acier passives, ainsi que le flux d'électrons implicitement associé. Cette simulation montre de façon notable la non uniformité de la polarisation de l'acier : les armatures inférieures sont presque dix fois plus polarisées cathodiquement que les armatures supérieures. Cette caractéristique s'explique physiquement par la nature tridimensionnelle du problème physique. La géométrie complexe du système entraîne une polarisation plus prononcée en certains points, en particulier ceux qui sont proches de la surface de l'anode. Par conséquent, la densité de courant transportée par les lignes de courant varie entre 10 et  $100 \text{ mA/m}^2$  d'acier.



**Figure 2.** Distribution des densités de courant et des lignes de courant sous polarisation cathodique de l'acier à  $20 \text{ mA/m}^2$ .

L'influence de l'intensité du courant sur la distribution spatiale des lignes de courant a également été analysé : cinq valeurs moyennes différentes de densité de courant ont été simulées, de 5 à  $2000 \text{ mA/m}^2$  d'acier, en maintenant les mêmes paramètres que précédemment. Les résultats sont présentés sur la **Fig. 3**. Ces derniers indiquent une polarisation non uniforme dans tous les cas, révélant des variations significatives entre les différents lits de renforcement à différentes valeurs de densité de courant. À une densité de courant cathodique de  $5 \text{ mA/m}^2$ , le premier lit reçoit en moyenne 150 % de la densité de courant initiale imposée, tandis que le deuxième reçoit 125 % et que le troisième ne reçoit que 45 %. De plus, pour des valeurs de courants plus élevées, on constate que plus le courant imposé est important plus cette différence augmente.



**Figure 3.** Évaluation du pourcentage de la densité de courant reçue par lit d'armature en fonction de la densité de courant imposée dans la simulation.

Un rapport de trois est observé entre la densité de courant reçue par le premier et le troisième lit d'armature pour le cas de  $5\text{mA/m}^2$  d'acier. Ce rapport atteint 10 pour une densité de courant moyenne de  $20\text{ mA/m}^2$  (représentant un pourcentage variant de 20% à environ 200%) et jusqu'à un rapport de 350 pour la densité de courant de  $2000\text{ mA/m}^2$ . Ce phénomène est dû à la pente du comportement électrochimique du modèle de Butler-Volmer, qui devient plus raide pour des valeurs de courant plus élevées. Par conséquent, cela montre que la prise en compte de la distribution 3D ainsi que les valeurs de courants imposé est cruciale pour concevoir des systèmes de maintenance électrochimique efficaces.

L'utilisation de ces simulations permet d'affiner les stratégies de placement des anodes en fonction des zones spécifiques à protéger. Cette approche nous permet d'optimiser la configuration du système et d'améliorer son efficacité globale en termes de protection contre la corrosion. Elle implique également l'évaluation et l'utilisation d'une gamme de valeurs de densité de courant reçues par les différents lits d'armatures pour des manipulations expérimentales ultérieures. Néanmoins, la compréhension et la maîtrise des techniques de maintenance et de leur durabilité ne se limitent pas à ces considérations. La section suivante se concentre sur l'étude des phénomènes évolutifs se produisant au sein des interfaces électrochimiques (matrice cimentaire/électrode) et de leurs mécanismes réactionnels, qui jouent un rôle clé dans la durabilité des structures en béton armé et l'optimisation des pratiques de maintenance.

### III. NOUVEAU PROTOCOLE DE CARACTERISATION DES EVOLUTIONS ELECTROCHIMIQUES AUX INTERFACES

Dans cette section, une attention particulière est portée à l'étude et à la compréhension des phénomènes évolutifs aux interfaces électrochimiques "matrice cimentaire/système anodique" et

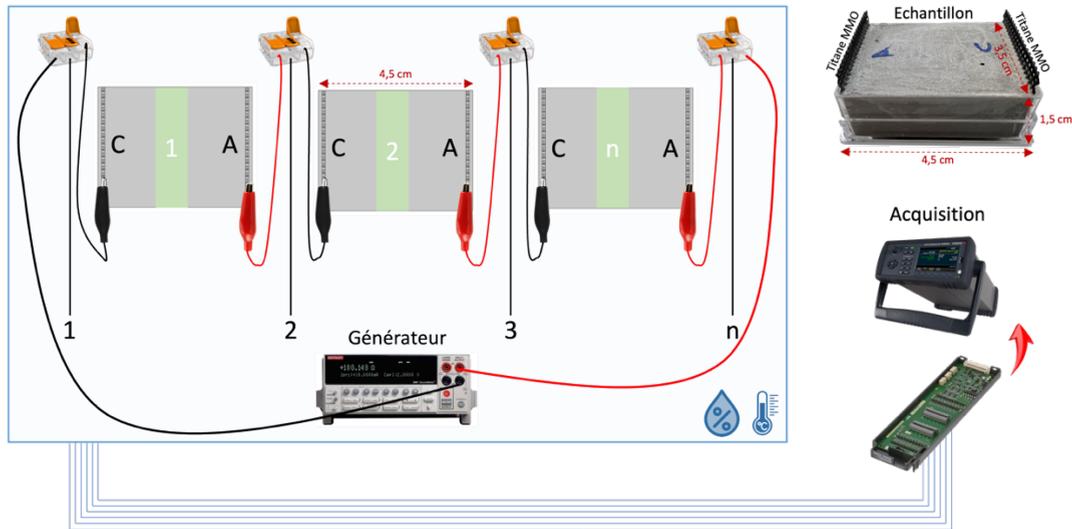
"matrice cimentaire/système cathodique". La nature des phénomènes oxydo-réducteurs en jeu à ces interfaces et leur cinétique réactionnelle sont régies par l'intensité du courant appliqué. Des niveaux de courant élevés sont susceptibles de conduire à des dommages locaux dans certaines conditions, et par conséquent, à une défaillance du système de protection. En effet, les phénomènes attendus aux interfaces électrochimiques en fonction des niveaux d'intensité appliqués peuvent induire, selon la littérature existante, une acidification à l'interface béton/anode dans le cas d'une protection cathodique par courant imposé (Hu et al., 2019; Zhang et al., 2018). D'autres phénomènes tels que la migration des ions et l'accumulation d'alcalins peuvent se produire à l'interface béton/cathode et limiter l'application de ces techniques (Page, 1992). Bien que la littérature traite de ces phénomènes, ces études restent limitées et des questions persistent quant à l'influence des facteurs environnementaux et de configuration tels que l'intensité du courant et la durée d'exposition. Il est donc nécessaire d'approfondir notre compréhension scientifique de ces aspects fondamentaux, afin de garantir la viabilité à long terme des systèmes de maintenance électrochimique appliqués au béton armé.

- **Protocole expérimental :**

À cette fin, nous avons conçu un protocole expérimental original. Des échantillons de pâte de ciment, réalisé avec un CEM I ( $E/C = 0,5$ ), d'une épaisseur de 1,5 cm et d'une longueur et d'une largeur respectives de 4,5 cm x 3,5 cm, ont été coulés. Du titane MMO sous forme de grilles a également été coulé de chaque côté de l'échantillon, agissant comme une anode et une cathode (lorsque l'on applique un courant), reproduisant ainsi un cas de maintenance électrochimique unidimensionnelle (Fig. 4).

Après une période de cure humide de 28 jours (à  $97\% \pm 3\%$  d'humidité relative), les échantillons ont été placés dans une enceinte hermétique contrôlé en température et en humidité relative ( $20\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$  et  $97\% \pm 3\%$  d'humidité relative) et connectés en série à un générateur de courant. Le schéma de principe du montage expérimentale est présenté sur la Fig. 4. Les densités de courant appliquées étaient de 110, 440 et 880 mA/m<sup>2</sup> d'anode, sélectionnées selon différents critères. La valeur de 110 mA/m<sup>2</sup> a été établie comme référence, conformément à la norme européenne ISO EN 12696, qui préconise de ne pas dépasser cette valeur pour éviter une acidification à l'interface de l'anode dans le cadre de la protection cathodique. Les valeurs les plus élevées ont été imposées afin de tenir compte de la surpolarisation qui peut se produire dans certaines zones dans des cas réalistes en raison de la distribution non uniforme du courant (section I). Ces valeurs ont également permis d'explorer la gamme des densités de courants des techniques de déchloration et de ré-alcalinisation.

Tous les échantillons sont reliés entre eux par des câbles et des connecteurs de sorte qu'un court-circuit est réalisable afin de pouvoir faire des prélèvements d'échantillon pour analyse à différentes échéances sans couper le courant qui circule à travers les autres échantillons. De plus, une centrale d'acquisition de type Keysight DAQ970A a été utilisée pour monitorer en continu les différentes grandeurs électriques des trois montages, telle que la tension totale aux bornes des échantillons.



**Figure 4.** Schéma de principe du montage expérimental soumis à une densité de courant imposée sous conditions environnementales contrôlées.

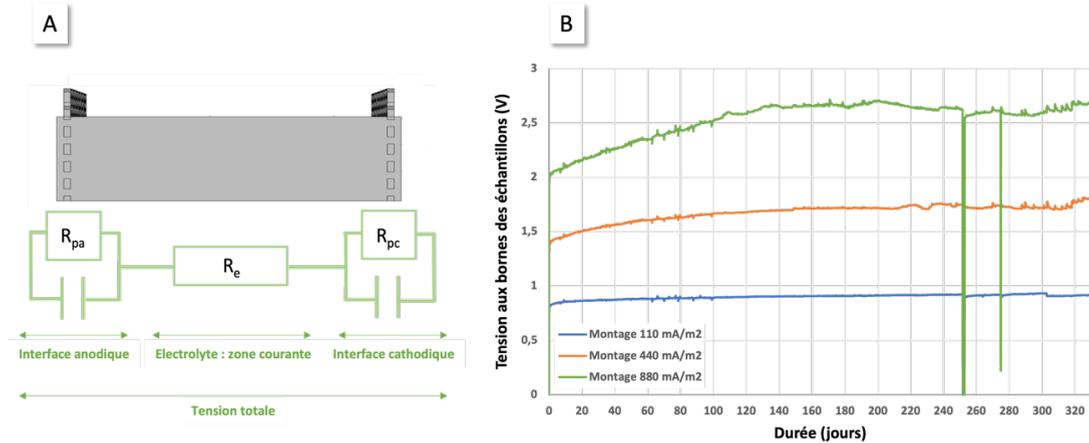
Des tests de caractérisation ont également été effectués pour évaluer l'impact du courant sur la minéralogie et les propriétés des matériaux (DRX, ATG, MEB/EDS). Les valeurs de la tension totale monitorées représentent la somme de deux composantes distinctes, comme l'explique (Mercado Mendoza, 2012). Une composante correspond à la somme des tensions aux interfaces électrochimiques, attribuées aux résistances de polarisation, tandis que l'autre composante représente la tension de la pâte, également connue sous le nom de résistance de l'électrolyte, comme illustré dans la Fig. 5 (A). L'objectif étant ainsi de dissocier les paramètres électrochimiques impliqués aux interfaces, afin de suivre leur évolution, des paramètres liés uniquement au matériau cimentaire. Nous avons donc développé un protocole de "sauts de courants réguliers" de 0,1 mA, réalisé une fois toutes les deux semaines pour quelques secondes. A l'aide de la centrale d'acquisition, nous enregistrons la réponse instantanée de la tension après chaque saut. La nature résistive de l'électrolyte (pâte de ciment) assure une réponse instantanée, permettant une séparation de la tension de la pâte de la tension totale. La somme des tensions de polarisation aux interfaces est donc la différence entre la tension totale et la tension de la pâte.

Des courbes de polarisation de Butler-Volmer ont également été mesurées sur des échantillons prélevés après 3 mois de branchement, afin d'examiner les évolutions électrochimiques à chaque interface séparément. Plus précisément, ces courbes de polarisation mesurées représentent uniquement la partie anodique pour l'interface "matrice cimentaire/anode" (polarisation anodique) et la partie cathodique pour l'interface "matrice cimentaire/cathode" (polarisation cathodique).

- **Résultats et analyses :**

La Fig. 5 (B) montre l'évolution temporelle de la tension totale observée aux bornes des échantillons monitorés, sur une période d'environ un an. Une augmentation continue de la tension est observée pour les trois courants étudiés, atteignant +700 mV dans la configuration de densité de courant de

880 mA/m<sup>2</sup>. Des chutes de tension ponctuelles se sont produites entre les jours 240 et 280, attribuées à une coupure de courant inévitable. Ces variations de la tension totale reflètent les propriétés sous-jacentes du matériau. En effet, pour une analyse approfondie de ces valeurs et pour distinguer les modifications possibles, il est essentiel d'examiner plus en détail les éléments contribuant à la tension totale (résistances de polarisation et résistance de l'électrolyte).

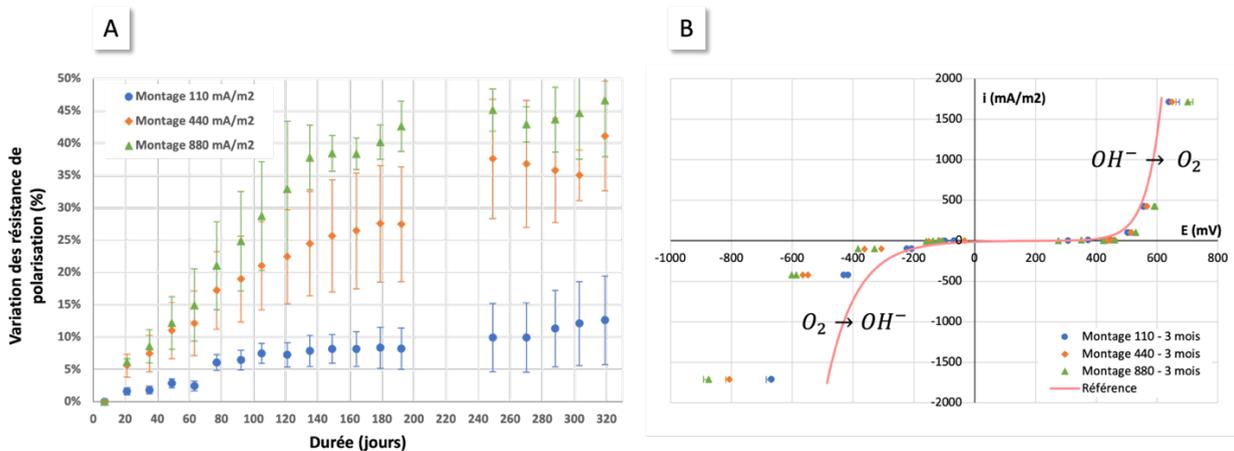


**Figure 5.** Principe du circuit électrique équivalent (A) et évolution de la tension totale aux bornes des échantillons pour les trois densités de courant étudiées (B).

Une légère augmentation de la résistance de la pâte de ciment a été observée. Néanmoins, le changement le plus important s'est produit au niveau des résistances de polarisation, comme le montre la **Fig. 6 (A)**, avec une augmentation significative de 45 % dans le cas de 880 mA/m<sup>2</sup>. Cette observation suggère des modifications conséquentes aux interfaces électrochimiques. **À l'interface anodique**, la réaction impliquée est la consommation d'ions hydroxydes en oxygènes, ce qui peut conduire à une acidification locale. Cependant, les évaluations effectuées et les mesures des courbes de polarisation (**Fig. 6 (B)**) ont révélé la même tendance dans les trois configurations différentes, à savoir une consommation limitée d'ions hydroxydes se traduisant par un léger déplacement de la partie anodique de la courbe (légère augmentation de la résistance de polarisation anodique). Cette dernière est plus prononcée à des densités de courant plus élevées, mais reste insuffisante pour induire un déplacement notable vers un pH acide. Les tests DRX et MEB-EDS que nous avons réalisés n'ont par ailleurs montré aucune modification de la microstructure. Ce phénomène pourrait s'expliquer par la migration des ions hydroxydes de la cathode vers l'anode sous l'effet du champ électrique ce qui constitue une source d'approvisionnement de ces ions.

**A l'interface cathodique**, la réaction impliquée est la consommation d'oxygène pour la formation d'ions hydroxydes. La **Fig. 6 (B)** indique que l'augmentation observée des résistances de polarisation provient principalement de modifications du comportement électrochimique cathodique. Cette évolution est probablement associée à une diminution de la disponibilité de l'oxygène à l'interface cathodique et sera à confirmer par modélisation. Lorsque les échantillons approchent de la saturation, la diffusion à travers la matrice cimentaire est lente. Par conséquent, la diminution de

l'apport d'oxygène conduit le système à augmenter la tension, soit à la recherche d'oxygène, soit, dans des situations plus avancées, à la recherche de molécules d'eau.



**Figure 6.** Variation temporelle de la somme des résistances de polarisation (anodique et cathodique) (A), et courbes de polarisation des interfaces électrochimiques des échantillons prélevés après trois mois de branchement (B).

## CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons mené une exploration de divers aspects liés à la durabilité des systèmes de maintenance électrochimique des structures en béton armé. L'analyse s'est concentrée initialement sur la distribution spatiale des courants de polarisation au sein du volume du béton. Il a été montré que la distribution des lignes de courant dans les structures réelles constitue un problème physique 3D non linéaire. En conséquence, soit des zones de sous-polarisation se forment, soit des zones de concentration de courant conduisant à une surpolarisation. En outre, nous avons constaté que la valeur moyenne de la densité de courant imposée joue un rôle important dans la distribution des lignes de courant, ce qui démontre le caractère unique de chaque cas d'étude. Une approche tridimensionnelle est donc nécessaire afin d'optimiser les systèmes de maintenance électrochimiques.

La deuxième partie de cette étude a examiné les aspects des interfaces qui peuvent également influencer la durabilité des systèmes de maintenance électrochimique. Aucune acidification n'a pu être mise en évidence à l'interface anodique, et ce pour les trois intensités de courant imposées et sur une durée d'exposition d'environ un an. La valeur anodique standard prescrite de 110 mA/m<sup>2</sup> représentant un seuil limite pour l'acidification de la matrice à l'anode est donc, dans les conditions d'études, remise en question. Parallèlement, cette étude a montré que la tension totale de la cellule électrochimique a augmenté de manière significative sur une période d'un an, introduisant un facteur substantiel, à savoir l'augmentation de la puissance électrique nécessaire pour maintenir les systèmes électrochimiques. Les résultats indiquent également que l'oxygène, agissant du côté de la cathode, joue un rôle essentiel dans l'augmentation de la tension totale des échantillons. Cette contribution de l'oxygène est particulièrement importante dans le cas des échantillons saturés, où la disponibilité de l'oxygène est réduite et sa diffusion est limitée. Le dispositif expérimental mis en place permettra ensuite de tester différentes configurations et d'aider au développement de modèles prédictifs permettant un dimensionnement plus robuste.

## REFERENCES

- Böhni, H., 2005. Corrosion in reinforced concrete structures, Elsevier.
- Bostanci, S.C., Limbachiya, M., Kew, H., 2018. Use of recycled aggregates for low carbon and cost-effective concrete construction. *J. Clean. Prod.* 189, 176–196.
- Cramer, S.D., Covino Jr, B.S., Bullard, S.J., Holcomb, G.R., Russell, J.H., Nelson, F.J., Laylor, H.M., Soltesz, S.M., 2002. Corrosion prevention and remediation strategies for reinforced concrete coastal bridges. *Cem. Concr. Compos.* 24, 101–117.
- François, R., Laurens, S., Deby, F., 2018. Corrosion and its consequences for reinforced concrete structures, Elsevier, France.
- Hu, J., Wang, Y., Ma, Y., Wei, J., Yu, Q., 2019. Identification on acidification damage of external anode system induced by impressed current cathodic protection for reinforced concrete. *Math. Biosci. Eng.* 16, 7510–7525.
- Koch, G., Varney, J., Thompson, N., Moghissi, O., Gould, M., Payer, J., 2016. Int. measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study. *NACE Int.* 216, 2–3.
- Kroon, D.H., Ernes, L.M., 2007. MMO coated Titanium anodes for cathodic protection, in: *NACE CORROSION*. NACE, p. NACE-07045.
- Laurens, S., Hénocq, P., Rouleau, N., Deby, F., Samson, E., Marchand, J., Bissonnette, B., 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.
- Liberati, E.A.P., Leonel, E.D., Nogueira, C.G., 2014. Influence of the reinforcement corrosion on the bending moment capacity of reinforced concrete beams: a structural reliability approach. *Rev. IBRACON Estrut. E Mater.* 7, 379–413.
- MAUREY, H., CHAIZE, P., DAGBERT, M., 2019. Sécurité des ponts : Éviter un drame.
- Mercado Mendoza, H.R., 2012. Transferts aqueux à travers les matériaux cimentaires partiellement saturés (PhD Thesis), Toulouse 3.
- Page, C.L., 1992. Interfacial Effects of Electrochemical Protection Methods Applied to Steel in Concrete, in: *Proc. of Int. Conference on Rehabilitation of Concrete Structures*. pp. 179–187.
- Sagues, A.A., Kranc, S.C., 1992. On the determination of polarization diagrams of reinforcing steel in concrete. *Corrosion* 48, 624–633.
- Saleem, M., Shameem, M., Hussain, S.E., Maslehuddin, M., 1996. Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete. *Constr. Build. Mater.* 10, 209–214.
- Sanchez, J., Fullea, J., Andrade, C., 2017. Corrosion-induced brittle failure in reinforcing steel. *Theor. Appl. Fract. Mech.* 92, 229–232.
- Sassine, E., Laurens, S., François, R., Ringot, E., Vision, L.R., 2016. Experiments and numerical simulations on Impressed Current Cathodic Protection technique applied to steel reinforced concrete structures, *Proceedings of the EUROCORR 2016*, Montpellier, France.
- Stratfull, R.F., 1957. The corrosion of steel in a reinforced concrete bridge. *Corrosion* 13, 43–48.
- Yakut, A., 2004. Reinforced concrete frame construction. *World Hous. Encycl. Publ.* 9–1.
- Zhang, E.Q., Abbas, Z., Tang, L., 2018. Predicting degradation of the anode–concrete interface for impressed current cathodic protection in concrete. *Constr. Build. Mater.* 185, 57–68.