



HAL
open science

Monitoring du séchage de bétons au laitier par capteur noyé de résistivité en vue de l'estimation des propriétés de transport

Marie-Ange Eid, Géraldine Villain, Stéphanie Bonnet, Sérgio Palma Lopes

► To cite this version:

Marie-Ange Eid, Géraldine Villain, Stéphanie Bonnet, Sérgio Palma Lopes. Monitoring du séchage de bétons au laitier par capteur noyé de résistivité en vue de l'estimation des propriétés de transport. Academic Journal of Civil Engineering, 2023, Diagnobéton 2023, special issue, 41 (4), pp.108-116. 10.26168/ajce.41.4.13 . hal-04283228

HAL Id: hal-04283228

<https://univ-eiffel.hal.science/hal-04283228>

Submitted on 13 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Monitoring du séchage de bétons au laitier par capteurs noyés de résistivité en vue de l'estimation des propriétés de transport

Marie-Ange EID^{1,2}, Géraldine VILLAIN¹, Stéphanie BONNET², Sérgio PALMA LOPES³

¹ Univ Gustave Eiffel, MAST-LAMES, Campus de Nantes, F-44344 Bouguenais

² Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44600 Saint Nazaire

³ Univ Gustave Eiffel, GERS-GEOEND, Campus de Nantes, F-44344 Bouguenais

RESUME

Le travail présenté ci-dessous se déroule dans le cadre du projet ANR-DEMCOM, qui s'intéresse principalement aux ouvrages maritimes, dont certaines zones comme la zone de marnage sont parfois difficilement accessibles pour l'inspection. Pour cela, il est primordial d'adopter des techniques d'évaluation non-destructive adaptées à de tels ouvrages, notamment le capteur de résistivité noyé développé par [Badr et al., 2019] permettant de suivre des gradients de résistivité électrique, propriété du béton très sensible aux teneurs en eau et en chlorures. Dans ce qui suit, nous nous intéressons à suivre le séchage de deux bétons formulés avec et sans laitier, par l'intermédiaire du capteur noyé permettant de suivre l'évolution de la résistivité en fonction du temps et de la profondeur, et de remonter par la suite aux profils de teneur en eau. Les résultats expérimentaux nous ont permis de mettre en évidence l'effet de la température sur la résistivité du béton. De plus, ils ont permis non seulement de valider la capacité de ce capteur à suivre l'état hydrique du béton pendant la période de séchage, mais aussi à souligner l'influence de la présence du laitier sur la réponse du capteur ainsi que sur la cinétique du séchage.

Mots-clés : monitoring, résistivité, laitier, séchage

Key-words: monitoring, resistivity, slag, drying

I. INTRODUCTION

Le travail présenté dans cet article est effectué dans le cadre du projet ANR-DEMCOM, qui accorde une attention particulière aux structures situées en environnement maritime [Bonnet et al., 2022]. Une des principales causes de la dégradation de ces ouvrages est la corrosion des armatures due à la pénétration des ions chlorures provenant de l'eau de mer [Soive et al., 2022]. Un diagnostic approprié pour ce type d'ouvrages n'est pas toujours évident, surtout au voisinage de certaines zones inaccessibles pour l'inspection comme la zone de marnage. Pour cette raison, plusieurs techniques d'évaluation non-destructive ont été développées, en particulier le capteur de résistivité noyé intrusif développé par [Badr et al., 2019], appelé capteur « échelle » et utilisé dans ce travail.

Ce capteur noyé est basé sur le principe de mesure électrique à courant continu, particulièrement sensible à la teneur en eau. En effet, la teneur en eau représente le moteur de

l'ensemble des réactions de dégradations au sein du béton, en particulier la corrosion des armatures induite par une pénétration des ions chlorures. La forte sensibilité de la résistivité électrique à la teneur en eau a été étudiée par plusieurs auteurs. Ces derniers montrent que la résistivité, fortement influencée par la mobilité des ions dans la solution interstitielle, baisse quand le degré de saturation augmente [Fares et al., 2015] [Lataste, 2002] [Saleem et al., 1996]. Dans cette étude, nous avons fait le choix de mettre en œuvre un capteur échelle, directement adapté à celui proposé par [Badr et al., 2019], car il permet d'obtenir des profils de résistivité sur toute la profondeur de la structure et de remonter par la suite aux gradients de teneur en eau, un des principaux indicateurs gouvernant la durabilité des ouvrages en béton. Ce capteur est constitué d'un système « multi-électrodes » en circuit imprimé (CI) associé à deux grilles en acier inox placées à ses extrémités.

Cet article présente une campagne de séchage effectuée sur deux bétons formulés avec et sans laitier, une addition minérale particulièrement incorporée dans les ouvrages maritimes, en vertu de ses effets positifs sur les propriétés de transfert du béton [Divsholi et al., 2014] [Duan et al., 2013] [Ben Fraj et al., 2012] [Ben Fraj et al., 2019]. Dans ce qui suit, nous allons commencer par détailler notre campagne expérimentale : la formulation des bétons, l'instrumentation des éprouvettes et les conditions de séchage. Ensuite, les profils de résistivité ainsi que les profils de teneur en eau obtenus par calibration seront présentés et interprétés. Enfin, une conclusion récapitulera nos principaux résultats et proposera des perspectives pour la suite du travail.

II. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

II.1. Formulation des bétons

Comme évoqué ci-dessus, cette campagne est effectuée sur des bétons formulés avec du laitier de haut fourneau, couramment utilisé dans les structures maritimes pour ses effets positifs sur les propriétés de transferts hydrique et ionique du béton. En effet, pendant l'hydratation différée du laitier, de nouveaux hydrates sont formés et provoquent un raffinement de la microporosité [Ben Fraj et al., 2012]. De plus, la composition de la solution porale est modifiée par la consommation des ions hydroxydes mobiles, ce qui conduit à la réduction du caractère conducteur du béton et donc à l'augmentation de sa résistivité électrique [Teng et al., 2013] [Eid et al., 2022].

Pour cela, nous nous intéressons à deux formulations de béton : un béton formulé avec du CEM I et un autre formulé avec 50% de laitier et 50% de CEM I. La composition des bétons est présentée dans le tableau 1 suivant :

TABLEAU 1. Formulation des bétons

	C100-0	C50-50
Constituants (kg/m³)	0% laitier	50% laitier
Gravillons, 4-12 mm (Boulonnais)	1041.7	1038.8
Sable, 0-4 mm (Boulonnais)	910.3	907.6
CEM I 52,5 N - SR 5 CE PM-CP2 NF HTS (Lafarge)	302.5	151.3
Laitier Ecocem	0	151.3
Superplastifiant MasterGlenium 201 (BASF)	2.94	3.53
Eau efficace	151.7	150.7
Rapport Eau/Liant (Eeff/L)	0.50	0.50

II.2. Instrumentation et principe de mesure

Afin de suivre l'évolution de la résistivité pendant la période de séchage, une éprouvette de chacune des formulations présentées ci-dessus a été fabriquée. Les deux éprouvettes, de dimensions 11x18 cm, ont été instrumentées avec un capteur échelle à 15 électrodes comme le montre la Figure 1. Ce capteur a été placé au centre de l'éprouvette, entre les deux grilles inox bien ancrées dans le béton et servant pour l'injection du courant. Les capteurs sont reliés à un résistivimètre programmable (Syscal Junior Switch 72, IRIS Instruments) dont le système d'acquisition permet de gérer jusqu'à 72 électrodes.

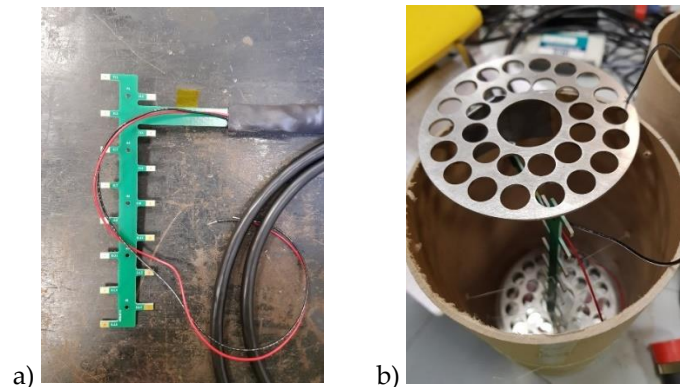


FIGURE 1. Instrumentation des éprouvettes : (a) capteur échelle à 15 électrodes, (b) moule instrumenté avec le capteur et les grilles avant coulage

En effet, afin d'obtenir des profils de résistivité sur toute la profondeur de l'éprouvette, le principe de mesure est basé sur la configuration de Transmission proposée par [Badr et al., 2019] : un courant électrique d'intensité I (A) est injecté entre les deux grilles, générant un champ électrique dans le béton et donc des différences de potentiel ΔV (V) mesurées entre les paires d'électrodes de l'échelle. La résistivité électrique est alors calculée par l'équation 1, G (m) étant un facteur géométrique qui dépend de la géométrie de la structure, ainsi que des dimensions et de l'espacement entre les électrodes.

$$\rho_{app} = G * \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Eq. (1)}$$

Cette résistivité déduite des mesures est appelée résistivité « apparente » (ρ_{app}), car la mesure est sensible à un certain volume du béton, celui-ci étant un matériau hétérogène (présence de gradients de teneur en eau notamment). D'une manière générale, le passage de la résistivité « apparente » à la résistivité « vraie » du matériau nécessite un processus d'inversion. Néanmoins, grâce à la répartition des électrodes de la surface vers la profondeur du béton, le capteur échelle a montré sa capacité à mesurer des résistivités apparentes qui estiment correctement le profil de résistivité réelle avec la profondeur, sans avoir recours au processus d'inversion [Badr et al., 2019]. Ceci nous permet de considérer que les capteurs noyés fournissent des profils de résistivité « vraie » de nos bétons, permettant d'aboutir *in fine* aux profils de teneur en eau.

II.3. Conditions de séchage

Après le coulage, les éprouvettes ont été placées en cure humide pendant 3 mois, dans un bac contenant une petite quantité d'eau à une température de 20°C et une humidité relative de 95%.

Ces conditions ont été régulièrement contrôlées à l'aide d'une sonde thermo-hygométrique (THR) placée dans l'air dans le bac fermé, pendant toute la période de cure.

Le séchage de ces éprouvettes a été envisagé afin de soumettre ensuite ces dernières à une campagne d'imbibition en eau douce. Néanmoins, seul le suivi du séchage sera présenté dans cet article. Afin d'assurer un séchage unidimensionnel dans le béton, deux couches de résine époxy ont été appliquées sur la surface latérale de chacune des éprouvettes. Ces dernières ont été placées dans une enceinte climatique à une température de 45°C et une humidité relative de 50% pendant 2 mois, et ont été monitorées pendant toute la période du séchage en utilisant le système de mesure décrit ci-dessus.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. Effet de la température sur la résistivité électrique

Afin d'étudier l'effet de la température sur la résistivité électrique, la Figure 2 montre des profils de résistivité en fonction de la profondeur (avec $z=0$ le bas de l'éprouvette), mesurés à deux températures différentes. La courbe à « Tc+90j » représente la mesure effectuée à 20°C sur les éprouvettes à la fin de la cure (sachant que Tc représente l'instant du coulage), tandis que la courbe à « T₀ » désigne le début du séchage et représente la première mesure effectuée sur les éprouvettes dans l'enceinte climatique à 45°C à Tc+91j.

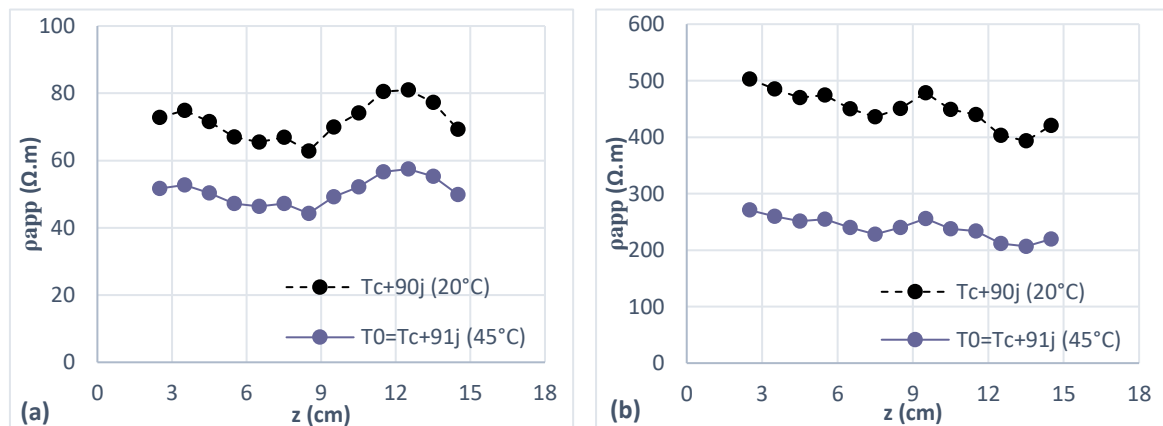


FIGURE 2. Profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur pour les deux éprouvettes de béton à Tc+90j à 20°C et T₀= Tc+91j à 45°C (a) Béton C100-0, (b) Béton C50-50

Sur les Figures 2.a et 2.b, nous remarquons qu'après 3 mois de cure, les bétons C100-0 et C50-50 présentent respectivement une résistivité moyenne de 70 et 450 $\Omega \cdot m$. Après avoir placé les éprouvettes dans l'enceinte climatique à 45°C pendant environ 24h, cette valeur de résistivité diminue pour chacun des bétons pour atteindre en moyenne 50 $\Omega \cdot m$ pour le béton C100-0 et 240 $\Omega \cdot m$ pour le béton C50-50. En considérant que la loi de variation de la résistivité avec la température est linéaire, ceci équivaut à une diminution respective de 1.17% et 1.87% par degré. Ces résultats sont en accord avec ceux de [Badr et al., 2022], qui ont montré que pour un béton saturé à base de CEM I, la variation de résistivité est de 1.3% par °C pour un intervalle de température de 20-45°C. En effet, une augmentation de la température (agitation thermique) provoque une augmentation de la mobilité des ions dans la solution interstitielle du béton, conduisant ainsi à une augmentation

de la conductivité et donc à une diminution de la résistivité électrique [Polder et al., 2000]. Il est donc primordial d'apporter des corrections aux mesures de résistivité accompagnées par des variations de température, parmi lesquelles la loi d'Arrhenius couramment utilisée dans la littérature [Polder et al., 2000] [Castellote et al., 2002] [Chrisp et al., 2001]. Dans des conditions réelles, le système de mesure peut être accompagné par des sondes permettant de mesurer les variations de température d'une manière continue, afin de pouvoir caler les valeurs brutes de résistivité à une température de référence.

III.2. Monitoring du séchage des deux bétons

La Figure 3 présente l'évolution des profils de résistivité pour les deux bétons pendant toute la période du séchage. Il faut noter que les mesures de résistivité présentées ci-dessous sont des mesures corrigées à partir des mesures brutes effectuées à 45°C afin de les ramener à une température équivalente de 20°C. La correction apportée aux mesures de résistivité est effectuée en appliquant la loi d'Arrhenius donnée par l'équation 2 :

$$\rho T_i = \rho T_0 * e^{\frac{Ea}{R} (\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_0})} \quad \text{Eq. (2)}$$

où ρT_i ($\Omega.m$) est la résistivité du matériau mesurée à la température T_i (K), ρT_0 ($\Omega.m$) est la résistivité calculée à la température de référence T_0 (K), R est la constante des gaz parfaits ayant une valeur de 8.314 J/mol.K et Ea (J/mol) est l'énergie d'activation qui dépend du type de béton étudié et de son taux de saturation. Dans ce travail, nous utilisons la valeur de Ea calculée par [Badr et al., 2022] pour un béton quasiment saturé à base de CEM I.

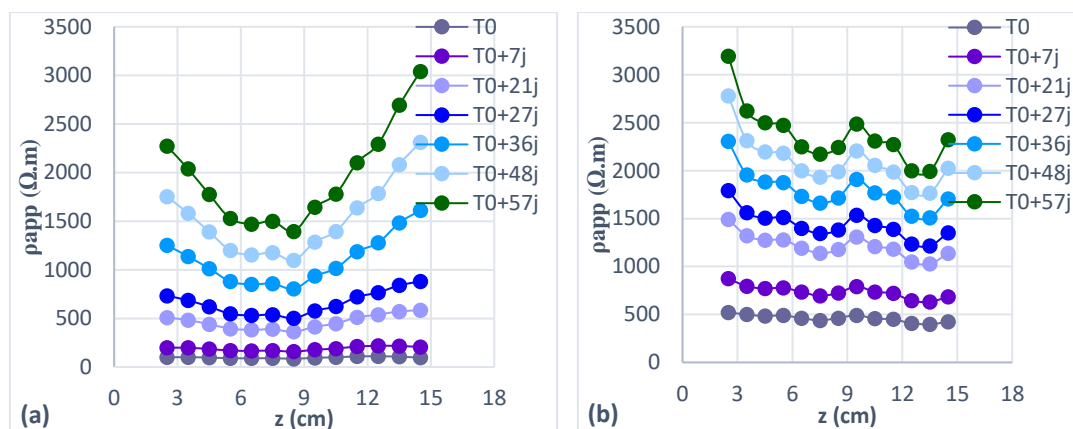


FIGURE 3. Evolution des profils de résistivité pour les 2 bétons pendant 2 mois de séchage – (a) Béton C100-0, (b) Béton C50-50

Les courbes présentées dans les Figures 3.a et 3.b illustrent clairement l'évolution de l'état hydrique des éprouvettes au cours de la période de séchage. Comme indiqué dans le paragraphe précédent, les bétons C100-0 et C50-50 présentaient, à la fin de la cure, des résistivités respectivement égales à 70 et 450 $\Omega.m$. Ces valeurs de résistivité augmentent progressivement pour atteindre, après deux mois de séchage, une résistivité qui varie entre 1500 et 3000 $\Omega.m$ pour le béton C100-0, et entre 2000 et 3100 $\Omega.m$ pour le béton C50-50. En effet, cette augmentation de la résistivité pendant le séchage est liée à la perte d'une certaine quantité d'eau initialement présente dans l'espace poral du béton.

Par ailleurs, les résultats montrent qu'à une échéance de temps donnée, le béton C50-50 présente une résistivité moyenne significativement plus élevée que celle du béton C100-0. Ceci peut être expliqué par la présence du laitier dans le béton C50-50, lui donnant un caractère conducteur initialement moins important que celui du béton C100-0 [Eid et al., 2022] [El Achrafi, 2022]. De plus, nous remarquons que l'allure des profils de résistivité diffère entre les deux bétons, ce qui peut être dû à une différence d'homogénéité au niveau des matériaux, induite probablement pendant le coulage ou pendant la vibration. Néanmoins, ces hétérogénéités initialement présentes au niveau des profils de résistivité s'accroissent au fur et à mesure du séchage. Ceci a été observé pour les deux bétons présentant, après deux mois de séchage, une résistivité plus élevée aux extrémités qu'à cœur de l'éprouvette. Cet effet est plus marqué pour le béton C100-0 qui ne contient pas de laitier, présentant une porosité plus connectée que celle du béton C50-50 [Fabien et al., 2022].

III.3. Passage des profils de résistivité aux profils de teneur en eau

Afin de pouvoir remonter aux profils de teneur en eau à partir des profils de résistivité, une campagne de calibration a été effectuée sur des carottes extraites de dalles fabriquées avec les mêmes formulations présentées ci-dessus. Les carottes de béton ont un diamètre de 75 mm et une hauteur de 70 mm, dimensions adaptées à la cellule de résistivité développée par [Du Plooy et al., 2013] et utilisée dans ce travail. Les courbes de calibration ont été établies à 20°C, entre la résistivité électrique et le degré de saturation pour chacun des deux bétons, en supposant que les éprouvettes sont homogènes et que la résistivité apparente mesurée est égale à la résistivité vraie du matériau. Ces courbes de calibration, non présentées dans cet article, ont montré par ailleurs une relation de puissance entre la résistivité et le taux de saturation conforme à la loi d'Archie [Archie, 1942].

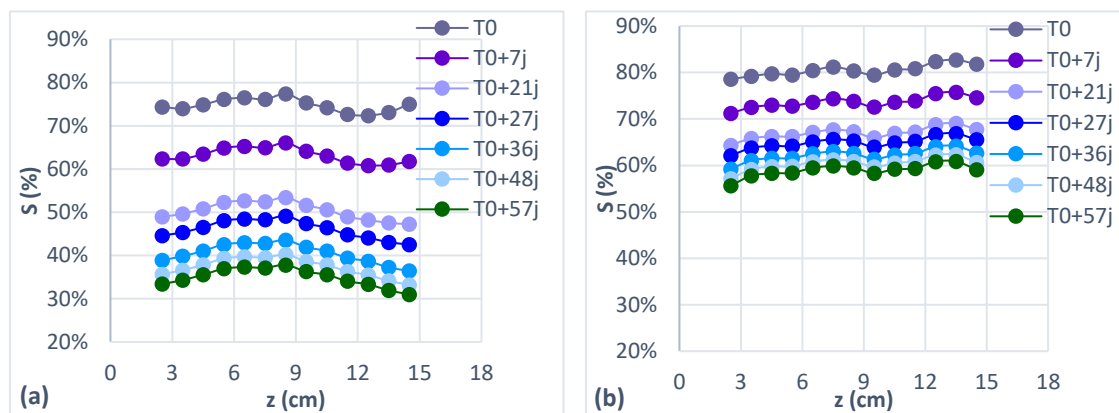


FIGURE 4. Profils de degré de saturation en fonction de la profondeur obtenus pour les deux bétons pendant le séchage – a) Béton C100-0, b) Béton C50-50

La Figure 4 présente les profils de degré de saturation $S(z)$ pour chacun des bétons tout au long de la période de séchage. Ces résultats montrent qu'après 3 mois de cure humide, les bétons présentaient un degré de saturation initial compris entre 78% et 84%. Après deux mois de séchage, le taux de saturation diminue pour atteindre une valeur comprise entre 31% et 38% pour le béton C100-0, et entre 56% et 61% pour le béton C50-50. Ces résultats sont conformes à de nombreux travaux antérieurs, confirmant qu'une diminution du taux de saturation provoque une augmentation de la résistivité électrique [Saleem et al., 1996] [Fares et al., 2015] [Badr et al., 2022].

Par ailleurs, ces résultats mettent davantage en évidence l'effet de la présence du laitier. En effet, pour une même durée de séchage, le béton C100-0 présente un taux de saturation inférieur à celui du C50-50. Ceci peut être expliqué par la présence du laitier provoquant une densification de la microporosité du béton, et ralentissant par la suite la cinétique du séchage [Fabien et al., 2022].

IV. CONCLUSION

L'objectif principal de ce travail a consisté à suivre le séchage de bétons au laitier, par l'intermédiaire d'un capteur de résistivité noyé, permettant de suivre l'évolution de la résistivité électrique en fonction du temps et de la profondeur.

Tout d'abord, les résultats ont montré l'effet de la variation de température sur les mesures de résistivité. En effet, une augmentation de la température a provoqué une diminution de la résistivité électrique, ce qui nous a conduits à apporter les corrections nécessaires aux mesures de résistivité pour les recalculer à une température de 20°C. Ensuite, les profils de résistivité en fonction de la profondeur des deux éprouvettes ont été également présentés à différentes échéances de temps, et ont montré une augmentation de la résistivité électrique pendant la période du séchage, illustrant un changement dans l'état hydrique du béton. Il faut noter que le béton C50-50, contenant 50% de laitier, présente une résistivité significativement supérieure à celle du béton C100-0 sans laitier. Ceci met en évidence l'effet du laitier sur la microstructure du béton et sur la composition ionique de sa solution porale. Enfin, les profils de résistivité ont été convertis en profils de taux de saturation à l'aide de courbes de calibration établies pour chacun des bétons. Les résultats montrent que le taux de saturation des éprouvettes diminue en poursuivant le séchage. De plus, nous avons remarqué qu'à la fin du séchage, le béton C100-0 se trouve à un degré de saturation relativement plus bas que celui du béton C50-50. En effet, la présence du laitier provoque un raffinement de la microporosité et, par la suite, un ralentissement du processus de séchage.

Afin de bien comprendre les phénomènes de transport dans le béton, deux campagnes différentes sont envisagées pour la suite. D'une part, une campagne d'imbibition d'eau douce sera effectuée sur les éprouvettes de cette étude à l'issue de leur séchage et, d'autre part, une campagne de diffusion d'eau salée est effectuée sur d'autres éprouvettes fabriquées avec les mêmes bétons en conditions saturées. A partir du même capteur noyé, nous allons suivre l'évolution des profils de résistivité pendant ces deux campagnes afin de déterminer respectivement des profils de teneur en eau et en chlorures.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) pour le financement du projet ANR-20-CE22-0008 DEMCOM. Nous remercions en particulier Jean-Luc Geffard de l'Université Gustave Eiffel, Denis Fournol de Nantes Université et Laurence Guiheneuf de Capacités pour leur aide et leur contribution à la réalisation du travail expérimental.

REFERENCES

- Archie, G. E. (1942). The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. Transactions of the AIME, 146(01), 54-62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>
- Badr, J., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., Deby, F., Balayssac, J., Delepine-Lesoille, S., Cottineau, L.-M., & Villain, G. (2019). Design and validation of a multi-electrode embedded sensor to monitor

resistivity profiles over depth in concrete. *Construction and Building Materials*, 223, 310-321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.226>

Badr, J., Mahfoud, E., Villain, G., Balayssac, J. P., Palma Lopes, S., Fargier, Y., & Yven, B. (2022). Temperature Effect on Electrical Resistivity Measurement Using an Embedded Sensor to Estimate Concrete Water Content. *Applied Sciences*, 12(19), 9420. <https://doi.org/10.3390/app12199420>

Bonnet, S., Ventura, A., Villain, G., Cremona, C., Bignonnet, F., Palma Lopes, S. et al., 2022. DEMCOM Project: Durable and Environmental design of Monitored Concrete structures in Marine environment. French National Conference on Wind turbines, Paris, France.

Castellote, M., Alonso, M. C., Andrade, C. (2002). Standardization, to a reference of 25 °C, of electrical resistivity for mortars and concretes in saturated or isolated conditions. *ACI Materials Journal*, 99, 119-127. <https://doi.org/10.14359/11703>

Chrisp, T. M., Starrs, G., McCarter, W. J., Rouchotas, E., & Blewett, J. (2001). Temperature-conductivity relationships for concrete: An activation energy approach. *Journal of materials science letters*, 20, 1085-1087.

Divsholi, B. S., Lim, L., T. Y. D., & Teng, S. (2014). Durability Properties and Microstructure of Ground Granulated Blast Furnace Slag Cement Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(2), 157-164. <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0063-y>

Du Plooy, R., Palma-Lopes, S., Villain, G., Derobert, X. (2013). Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition. *NDT & E International*, 54, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.11.007>

Duan, P., Shui, Z., Chen, W., & Shen, C. (2013). Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 2(1), 52-59. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.03.010>

Eid, M., Villain, G., Bonnet, S., Palma Lopes, S., Geffard, J. L. (2022). Monitoring of electrical properties of slag concrete during hydration phase using embedded resistivity sensors. *25ème Congrès Français de la Mécanique, CFM 2022, Nantes, France*.

El Achrafi, M. (2022). Détermination des indicateurs de durabilité du béton en utilisant des observables d'évaluation non destructives : application aux ouvrages maritimes. *Thèse de l'Université de Nantes, France*.

Fabien, A., Choinska, M., Bonnet, S., Pertue, A., & Khelidj, A. (2022). Aggregate size effects on the mechanical behaviour and on the gas permeability at damaged state of cement-based materials with and without slag. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(12), 5674-5695. <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1915881>

Fares, M., Villain, G., Fargier, Y., Thiery, M., Dérobert, X., & Lopes, S. P. (2015). Estimation of water content gradient and concrete durability indicators using capacitive and electrical probes. *In International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*.

Fraj, A. B., Bonnet, S., & Khelidj, A. (2012). New approach for coupled chloride/moisture transport in non-saturated concrete with and without slag. *Construction and Building Materials*, 35, 761-771. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.106>

Fraj, A. B., Bonnet, S., Leklou, N., & Khelidj, A. (2019). Investigating the early-age diffusion of chloride ions in hardening slag-blended mortars on the light of their hydration progress. *Construction and Building Materials*, 225, 485-495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.185>

Lataste, J.-F. (2002). Évaluation non destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton armé par mesures de résistivité électrique. *Thèse de l'université de Bordeaux 1, France*.

Polder, R., Andrade, C., Elsener, B., Vennesland, Ø., Gulikers, J., Weidert, R., Raupach, M. (2000). Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete. *Materials and Structures*, 33(10), 603-611. <https://doi.org/10.1007/BF02480599>

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. *Construction and building materials*, 10(3), 209-214. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00078-X](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00078-X)

Soive, A., Bonnet, S., Khelidj, A., & Baroghel-Bouny, V. (2022). Thermodynamic difficulties to determine a critical chloride threshold for breakdown of the protective layer of steel reinforcement in a maritime concrete structure. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 11(5), 308-318. <https://doi.org/10.1080/21650373.2021.1961325>

Teng, S., Lim, T. Y. D., & Divsholi, B. S. (2013). Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra-fine ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, 40, 875-881. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.052>