



**HAL**  
open science

## Evaluation de la durabilité du béton armé vis à vis des ions chlorure à l'aide de capteurs noyés dans le béton versus des auscultations en parement

Véronique Bouteiller, Géraldine Villain, Benoit Thauvin, Elisabeth Marie Victoire, Myriam Bouichou

### ► To cite this version:

Véronique Bouteiller, Géraldine Villain, Benoit Thauvin, Elisabeth Marie Victoire, Myriam Bouichou. Evaluation de la durabilité du béton armé vis à vis des ions chlorure à l'aide de capteurs noyés dans le béton versus des auscultations en parement. GC&apos;2019, le Génie Civil au coeur des mutations technologiques et numériques, Mar 2019, CACHAN, France. 8 p. hal-02294461v1

**HAL Id: hal-02294461**

**<https://hal.science/hal-02294461v1>**

Submitted on 23 Sep 2019 (v1), last revised 12 Mar 2021 (v2)

**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.

# EVALUATION DE LA DURABILITE DU BETON ARME VIS-A-VIS DES IONS CHLORURE A L'AIDE DE CAPTEURS NOYES DANS LE BETON VERSUS DES AUSCULTATIONS EN PAREMENT.

V. Bouteiller<sup>1</sup>, G. Villain<sup>1</sup>, B. Thauvin<sup>2</sup>, E. Marie-Victoire<sup>3</sup> et M. Bouichou<sup>3</sup>

1) Ifsttar ; 2) Cerema ; 3) LRMH

## 1. Introduction

Lors du Pavement Preservation & Recycling summit, de 2018 à Nice les différents intervenants ont rappelé "combien la dégradation des réseaux devient une préoccupation majeure en France comme dans les autres pays du monde" [<https://www.lemoniteur.fr/article/pprs-2018-la-question-de-l-entretien-n-est-pas-propre-a-la-france-35439812>]. Lors de ce sommet, M. Poupard, de la Direction générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM) a énoncé différents faits : "Le réseau national non-concédé (environ 12 000 km) a principalement été construit au cours des cinq décennies passées et il constitue « le premier patrimoine public » (130 Mds€). De plus, le défaut d'entretien dans les 50 premières années de la vie des ouvrages d'art "qui ont une durée de vie de 80 ou 100 ans, a mené à une plus forte dégradation" [<https://www.lemoniteur.fr/article/pprs-2018-la-loi-d-orientation-sur-les-mobilites-presentee-en-mai-35437111>].

La durabilité du béton armé dépend, d'une part, de l'enrobage béton qui va s'opposer à l'entrée des agents agressifs (carbonatation et ions chlorure) et, d'autre part, de l'interface armature/béton qui pourrait se corroder. D'après plusieurs projets européens (BRIME [1], CONREPNET [2]), la principale dégradation des structures en béton armé est la corrosion des armatures.

Dans ce travail, une approche intégrant les aspects de "durabilité" (auscultations non destructives du béton d'enrobage) et de "corrosion" (contrôles non destructifs des armatures depuis le parement béton) a été mise en œuvre. De plus, l'utilisation de capteurs noyés dans le béton a fait l'objet d'une première expérience afin de compléter/comparer les résultats issus des caractérisations de surface et du monitoring et de construire une base de données numériques.

Cet article présente le programme expérimental et les premiers résultats des mesures issues du monitoring et des évaluations non destructives (END).

## 2. Partie expérimentale

Le programme expérimental (Figure 1) du projet APOS (Auscultation Pour des Ouvrages Sûrs) mené par l'Ifsttar et le Cerema [3] vise à étudier la dégradation des structures en béton armé en milieu chloruré<sup>1</sup>. Deux séries de 10 dalles de dimensions 90x70x13 cm (masse voisine de 200 kg) ont été coulées en considérant 2 formulations

<sup>1</sup> Parallèlement le LRMH a mené un projet CANOPEE pour le milieu carbonaté.

qui diffèrent par leurs ciments (CEM I Portland et CEM III avec Laitiers). Des dalles non armées ont également été coulées.

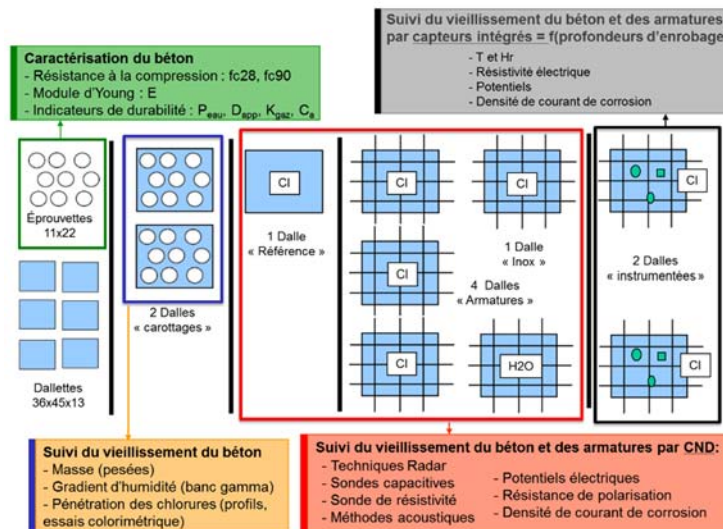


Figure 1 : Programme expérimental APOS

Par formulation, deux dalles ont été instrumentées à l'aide de capteurs noyés dans le béton : capteurs de température et d'humidité relative (VAISALA et THR Honeywell), électrodes de référence Mn/MnO<sub>2</sub> (ERE20 Force Technology), capteurs de résistivité (MultiRingElectrode (MRE Ibac) ou peigne (Iststar [4])) et capteurs de corrosion (Anode Ladder (AL Ibac)) (Figure 2 et Tableau 1).



Figure 2 : Instrumentation des dalles avec différents capteurs.

Tableau 1 : Les différents capteurs dans les dalles instrumentées confectionnées avec un ciment CEM I ou CEM III.

	Ciment CEM I Portland		Ciment CEM III avec laitiers	
	Dalle 19-1-C-M1	Dalle 20-1-C-M2	Dalle 09-3-C-M3	Dalle 10-3-C-M4
THR Honeywell	Dev4 noyé béton frais Dev5 réservation béton durci			Dev6 réservation béton durci
MRE	MRE1	MRE2	MRE3	MRE4
AL	AL1	AL2	AL3	AL4

Des mesures d'évaluation non destructives (END) ont également été réalisées sur le parement béton. Le vieillissement consiste en une exposition des dalles dans un bac contenant une solution saline (NaCl 35g/L) (une hauteur voisine de 2 cm de la dalle est en imbibition pour un enrobage de 3 cm).

### 3. Résultats

Les premiers résultats du monitoring de capteurs noyés (THR Honeywell, MRE et AL) et d'évaluations non destructives (END) sur parement (Peignes de résistivité et Méthode SUSI) sont présentés.

#### 1.1 Résultats du monitoring

##### 1.1.1 Sondes thermo hygrométriques Honeywell

Trois systèmes (Devices) de 4 sondes THR (Température Humidité Relative) ont été implantés dans les dalles dédiées au monitoring, soit noyés dans le béton frais, soit, placés dans des réservations dans le béton durci (Tableau 1). Les résultats des enregistrements en température et en humidité relative du Device 5 (en réservation dans le béton durci) entre octobre 2014 (T0) et janvier 2015 (T0+4mois) (Figure 3) montrent que la température du béton de la dalle 19-1-C-M1 décroît de 16 à 4°C et que l'eau pénètre très rapidement par absorption capillaire. Le front d'humidité atteint le capteur situé à 9 cm de la face au contact de l'eau après 14 jours. Au bout de 4 mois l'humidité relative est voisine de 100%. La pénétration des ions chlorures de la solution vers l'enrobage béton se produit donc selon un processus de convection pendant les 14 premiers jours puis par diffusion en milieu saturé.

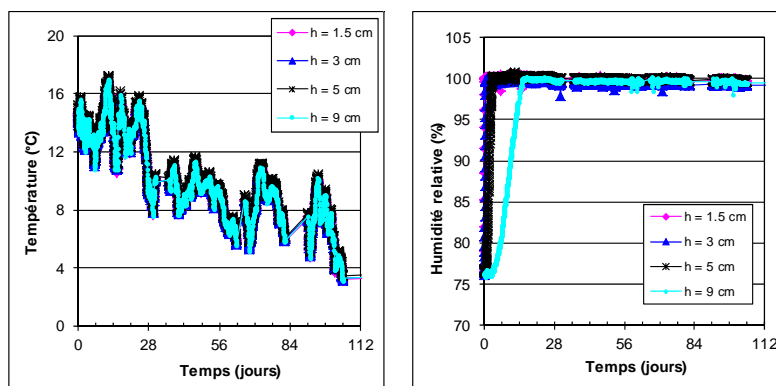


Figure 3 : Monitoring du capteur Dev5 en réservation dans la dalle 19-1-C-M1 de T0 à T0+4mois ; à gauche le suivi en température et à droite le suivi en humidité relative.

##### 1.1.2 Capteurs de résistances MRE

La Figure 4 montre l'évolution des résistances mesurées entre les paires d'anneaux des capteurs MRE situés à différentes profondeurs dans l'enrobage du béton en fonction de la durée d'exposition ; l'instant 0 correspondant au moment où le parement de la dalle a été exposé à l'eau contenant des ions chlorures. A l'instant 0, les résistances sont relativement élevées (entre 500 et 4500  $\Omega$ ) car les dalles avaient préalablement subi une phase de séchage. Pendant les 1<sup>ère</sup> heures (jusqu'à 1 jour), une décroissance significative et rapide des résistances est observée Cette évolution dépend du temps : le dernier couple à réagir étant le plus profond dans l'enrobage (7-8 à 37,5 mm de profondeur). Ce phénomène traduit la pénétration progressive de l'eau salée dans le béton d'enrobage. Après 1 jour d'imbibition, les résistances se stabilisent à environ 300-350  $\Omega$  pour les sondes MRE1 et MRE2 (CEM I) et à environ 1000  $\Omega$  pour les sondes MRE3 et MRE4 (CEM III). Après 3 ou 4 mois (Figure 5), la résistance devient voisine de 400-500  $\Omega$  pour les sondes MRE1 et MRE2 (CEM I) et de 550 à 1000  $\Omega$  pour les sondes MRE3 et MRE4 (CEM III).

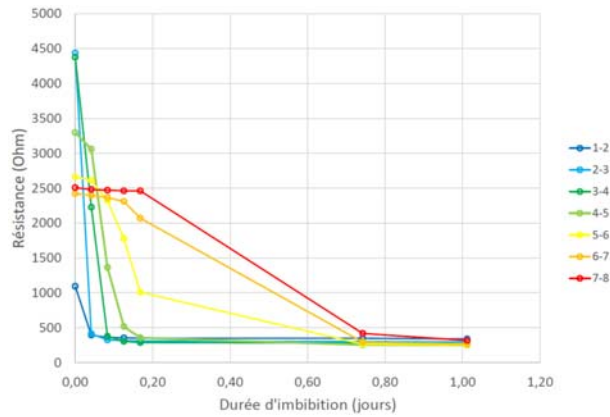


Figure 4 : Evolution des résistances les 1ères heures d'imbibition du capteur MRE1 (Dalle 19-1-C-M1).

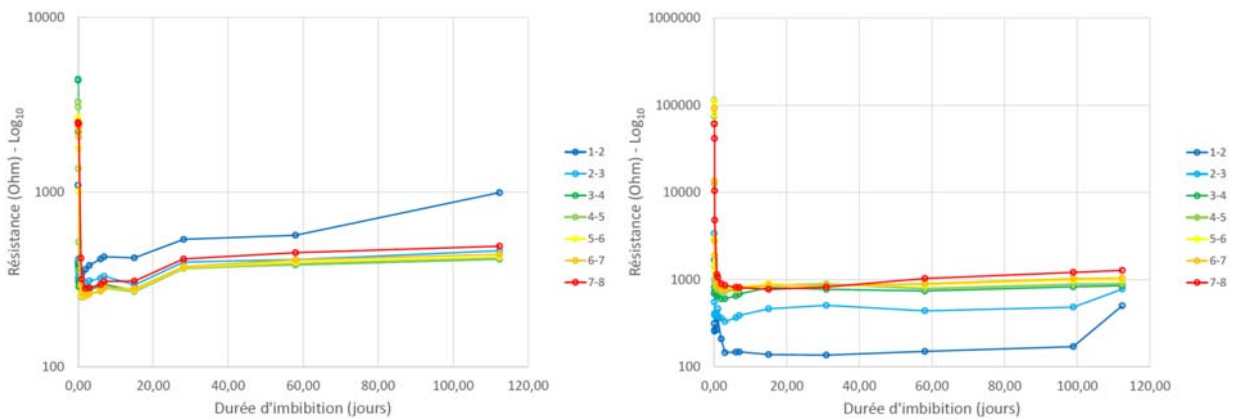


Figure 5 : Evolution des résistances de T0 à T0+4mois ; à gauche capteur MRE1 (Dalle 19-1-C-M1) et à droite capteur MRE3 (Dalle 09-3-C-M3).

L'enregistrement en continu des mesures des capteurs MRE permet de mettre en avant un phénomène d'inversion des profils (ou gradients) de résistance dans l'épaisseur de l'enrobage en fonction du temps d'exposition. Les résultats de la Figure 6 illustrent ce phénomène pour les sondes MRE1 (CEM I) et MRE3 (CEM III) en montrant le rééquilibrage hydrique du béton dans les quatre premiers centimètres. Les comportements sont globalement similaires mais avec des plages de variation de résistances 100 fois plus élevées pour les dalles fabriquées avec le ciment CEM III par rapport au ciment CEM I.

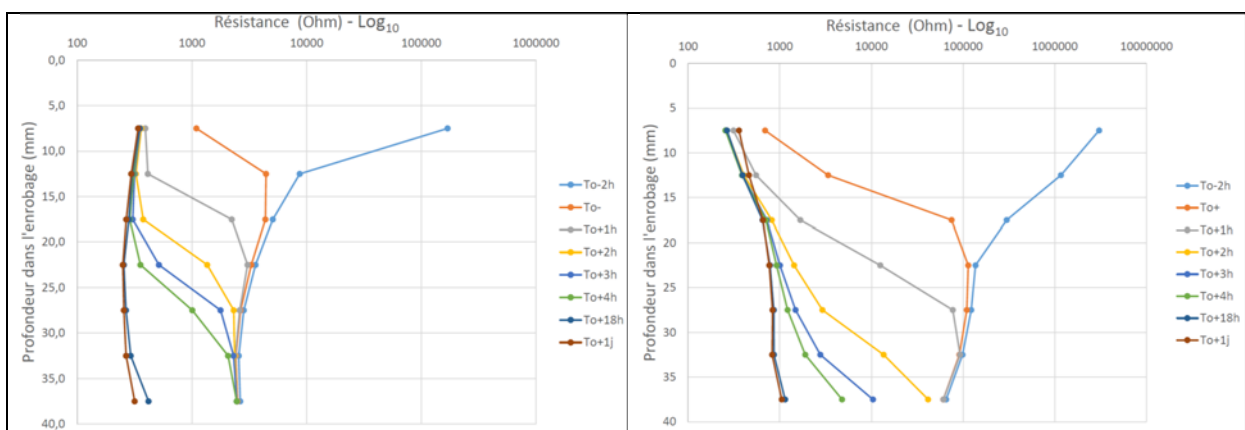


Figure 6 : Profondeurs d'enrobage et résistances en fonction du temps ; à gauche capteur MRE1 (Dalle 19-1-C-M1) et à droite capteur MRE3 (Dalle 09-3-C-M3).

La Figure 7 présente les profils de résistance initiaux (avant exposition) et après 4 mois d'exposition. Avant l'exposition, les écarts de résistances entre les bétons formulés avec le ciment CEM I (MRE1, MRE2) et le ciment CEM III (MRE3, MRE4) sont très importants quelle que soit la profondeur dans l'enrobage (de l'ordre de 20 kΩm). Après quelques mois d'exposition, l'écart s'est réduit en moyenne à environ 500 Ω. En outre, dans le premier centimètre en surface du béton, la distinction devient impossible.

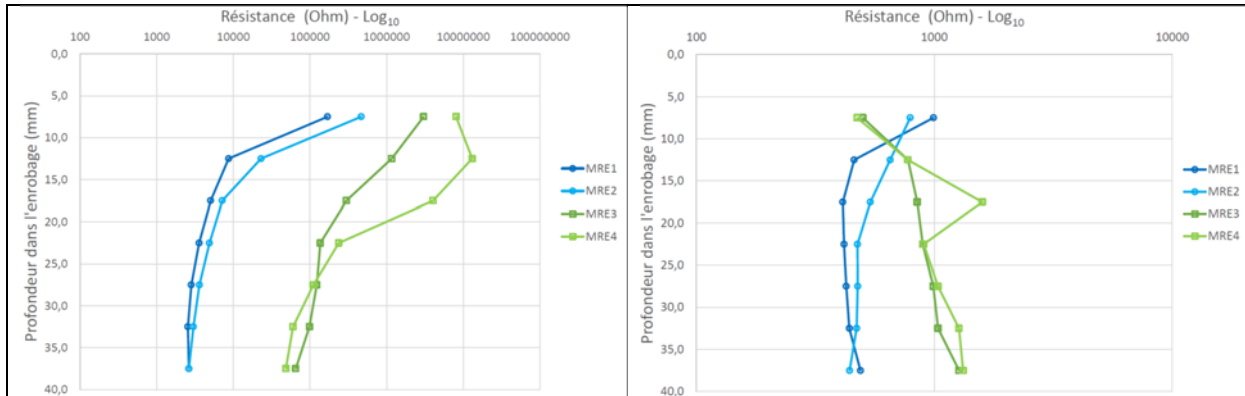


Figure 7 : Profondeurs d'enrobages et résistances à gauche initialement et à droite à T0+ 4 mois ; capteurs MRE1 et MRE2 (CEM I) et MRE3 et MRE4 (CEM III).

## 1.2 Capteurs de corrosion Anode Ladder

La Figure 8 illustre les trois résultats issus de l'Anode Ladder (potentiel, résistance et courant) sur une période voisine de 4 mois et démontrent la différence de comportement des dalles en fonction de la nature du ciment : les potentiels plus électronégatifs et les courants plus importants de la dalle 09-3-C-M3 s'expliqueraient par la présence de laitiers [5].

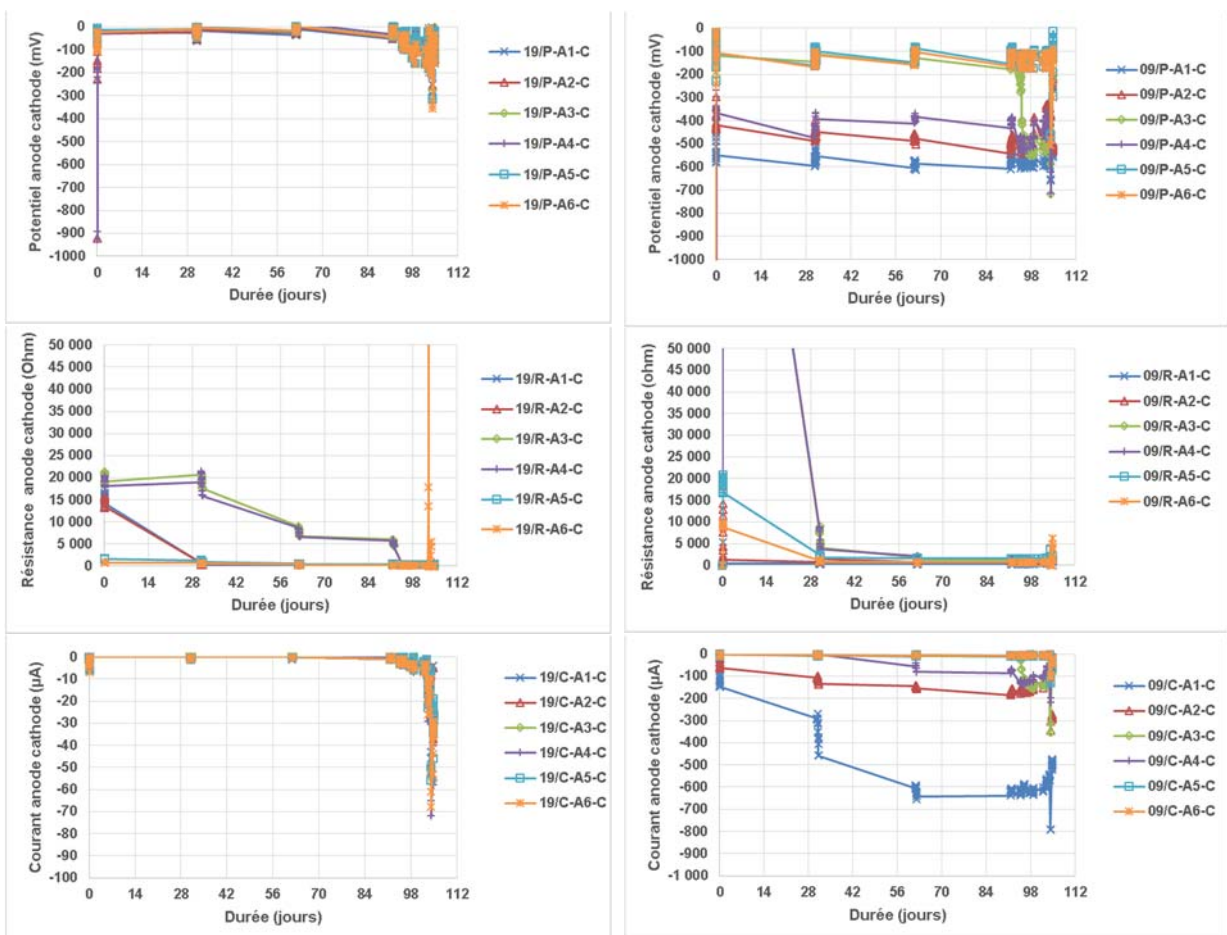


Figure 8 : Potentiels, résistances et courant (entre anode et cathode) en fonction de la profondeur d'enrobage entre T0 et T0+4mois ; à gauche la dalle 19-1-C-M1 et à droite la dalle 09-3-C-M3.

### 1.3 Résultats des END

#### 1.3.1 Peigne de résistivités

Des mesures d'évaluation non destructives (END) ont été réalisées au moyen du peigne à 14 électrodes développé à l'IFSTTAR [7] (Figure 2). Le principe de mesure est basé sur un dispositif de Wenner [6-9] avec un écartement "a" variable. Les résultats sont donc des résistivités apparentes à plusieurs niveaux (a=2, 4...8 cm) qu'il faut inverser pour obtenir le profil de résistivité (« vraie ») en fonction de la profondeur (logiciel libre RES1D [10=Loke et al. ??]).

La Figure 9 et la Figure 10 présentent les résistivités apparentes puis les profils de résistivité respectivement pour les dalles (non armées) 13-1-NS (CEM I) et 3-3-NS (CEM III). Les résultats montrent que la pénétration de l'eau chlorurée dans le béton se produit au cours des 7 premiers jours et qu'une diminution de la résistivité est par conséquent observée. De plus, la cinétique plus lente de pénétration des ions chlorure dans la dalle formulée avec du ciment s'expliquerait par la présence de laitiers qui peuvent fixer les ions chlorure.

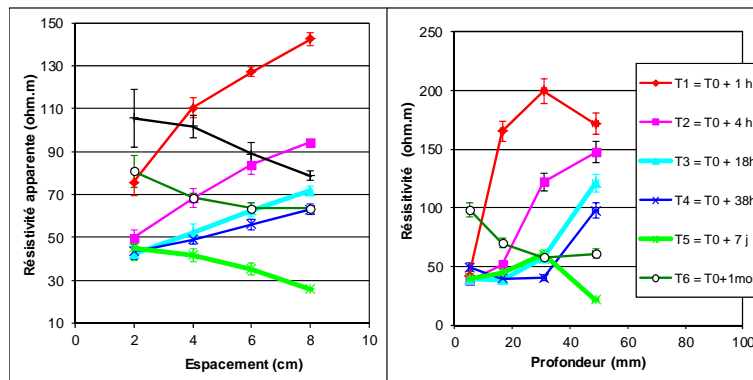


Figure 9 : Résistivité apparente à différents niveaux et profils de résistivité en fonction de la profondeur de la dalle 13-1-NS (CEM I).

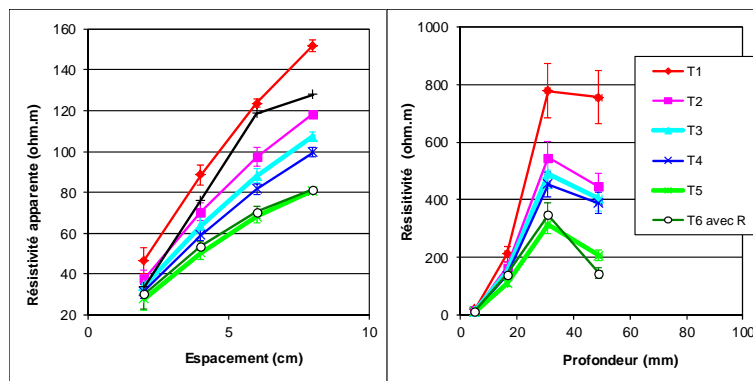


Figure 10 : Résistivité apparente à différents niveaux et profils de résistivité en fonction de la profondeur de la dalle 3-3-NS (CEM III).

J'ai supprimé les profils d'humidité relative extraits à partir des enregistrements en HR Honeywell IL. Faudra écrire un commentaire dans le § des peignes que les résultats sont similaires avec les THR Honeywell.

#### 1.3.2 Méthode SUSI

Une nouvelle technique non destructive de suivi de la teneur en eau et en sels dans les matériaux poreux a également été testée dans le cadre du projet APOS : le système SUSI-R. Il se compose d'une sonde résonante qui fonctionne dans la gamme des micro-ondes (1 -1.5 Ghz) et d'un analyseur en réseau qui mesure la réponse de la sonde (le paramètre de diffusion S21), l'ensemble étant piloté par un logiciel dédié.

Les propriétés de résonance de la sonde sont la fréquence de résonance  $f_r$  et le facteur de qualité Q (ou largeur de bande de résonance  $\Delta f$ ), obtenus grâce à l'analyseur.  $\Delta f_r$  correspond au décalage de fréquence de résonance de la sonde entre le matériau et l'air. Ces propriétés de résonance sont directement reliées à la permittivité du matériau investigué, c'est-à-dire à la constante diélectrique  $\epsilon'$  et les pertes diélectriques  $\epsilon''$ .

La constante diélectrique est principalement reliée à la teneur en eau tandis que le facteur de perte dépend essentiellement de la présence de sels solubles [11]. Les propriétés diélectriques du matériau étant fonction de

sa teneur en eau et en sels, il est donc possible de calculer la teneur en eau (MC, moyennant une calibration préalable) et un indice de salinité (SI) à partir des propriétés de résonance du capteur.

La profondeur d'investigation de la technique est fonction de la géométrie de la sonde et est actuellement limitée à 2cm.

Les mesures ont permis de suivre la progression du front d'imbibition. Pour ce qui concerne la teneur en eau (Figure 11), les deux premiers centimètres ont rapidement été saturés, avec des profils identiques que l'imbibition ait été réalisée au contact d'eau douce ou d'eau salée. Par contre, le suivi de l'indice de salinité s'est révélé plus discriminant (Figure 12) : le comportement de la dalle 17 au contact de l'eau douce étant clairement différent de celles au contact de l'eau salée.

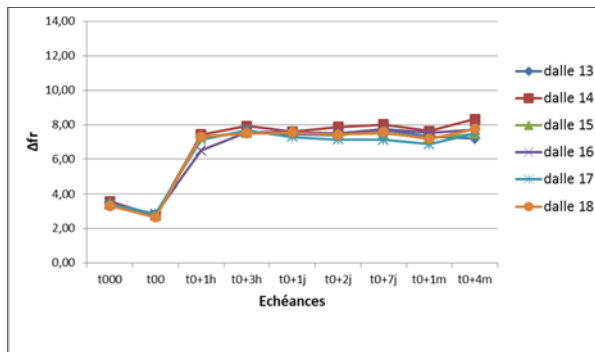


Figure 11 : Progression du front d'imbibition pour les dalles à base de CEM I

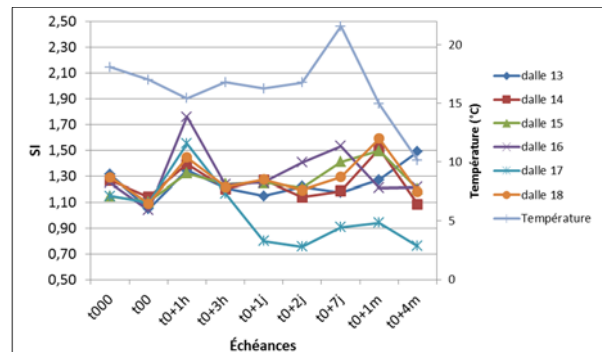


Figure 12 : Index de salinité pour les dalles à base de CEM I

## 4. Conclusions

L'approche couplée de durabilité du béton armé qui repose à la fois sur l'étude d'évolution des profils en fonction de la profondeur de l'enrobage et sur l'étude de la corrosion de l'armature permettra de mieux comprendre et de suivre les différents phénomènes qui dépendent du temps (pénétration des agents agressifs, phases d'initiation et de propagation de la corrosion entre autres). En effet les gradients de teneurs en eau et en ions chlorure dans le béton d'enrobage impacte nécessairement les résultats des mesures mais également les processus de corrosion de l'armature dans le béton.

Les différentes manières de mesurer et d'analyser les résistances (et/ou résistivités) doivent encore être confrontées. Moyennant une calibration, l'impact des gradients sur les mesures pourra être amélioré. De plus, une nouvelle techniques (SUSI) s'avère pertinente pour aider à l'analyse des gradients.

L'expérience menée dans le cadre du projet APOS confirme l'intérêt des capteurs noyés pour suivre l'évolution de la corrosion en fonction du temps : le monitoring étant plus complet que les rares mesures ponctuelles qui sont très dépendantes des conditions climatiques extérieures.

L'ensemble des résultats est encourageant et pourrait permettre de développer du "Corrosion Health Monitoring" (par analogie avec le "Structural Health Monitoring" déjà bien éprouvé).

## 5. Remerciements

Nous tenons à remercier R. Queguiner, S. Pasquier, P. Boulaire, P. Boujard, \*\* pour la réalisation des coulages des corps d'épreuve au Laboratoire de Saint-Brieuc. Merci également à J-L. Manceau de l'IFSTTAR (Laboratoire SII – COSYS) qui a développé le conditionnement et l'acquisition des THR. Enfin, merci à K. Reichling, A. Asgharzadeh et B. Prisack de Ibac de l'Université de Aachen pour les discussions intéressantes sur les capteurs qu'ils développent.

## 6. Références

1. Woodward RJ, Bridge management in Europe (BRIME)-Deliverable D14- Final Report. 2001. p. 228.
2. Tilly GP and Jacobs J, CONREPNET - Concrete repairs - Performance in service and current practice. 2007, United Kingdom: IHS BRE Press.
3. Site internet APOS : <http://www.ifsttar.fr/collections/ActesInteractifs/AII1/index.html>



4. Lataste J-F, Villain G, Balayssac J.P (2017) Chapter 4. Electrical Methods, IN Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures. ISTE Press Ltd & Elsevier Press Ltd. London
5. Bouteiller V, Cremona C, Baroghel-Bouny V and Maloula A, Corrosion initiation of reinforced concretes based on Portland or GGBS cements: Chloride contents and electrochemical characterizations versus time. Cement and Concrete Research, 2012, 42(11): p. 1456-1467
6. Gowers KR, Millard SG, Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique, ACI Materials Journal, 1999, 96(5)
7. Polder RB, Test methods for on site measurement of resistivity of concrete- a RILEM TC-154 technical recommendation, Construction and Building Materials, 2001, 15:125-131
8. Andrade C, D'Andréa R, Castillo A, Castel M, The Use of Electrical Resistivity as NDT Method for the Specification of the durability of Reinforced Concrete. NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering. Nantes, France, 2009.
9. Du Plooy R, Lopes S, Villain G, Dérobert X, Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition. NDT&E International, 2013, 54:27-36
10. LOKE ?
- ~~11. Villain G, Garnier V, Sbartai M, Dérobert X, Balayssac J.P (2018) Development of a calibration methodology to improve the on-site non-destructive evaluation of concrete durability indicators. Materials and Structures 51:40~~
- ~~12. FARES et al. 2018 profils de cl-~~
13. Olmi R., Bini M., Ignesti A., Priori S, Riminesi C and Felici A, Diagnostics and monitoring of frescoes using evanescent-field dielectrometry, Measurement Science and Technology, 2006, 17 2281–2288, doi:10.1088/0957-0233/17/8/032