

# Suivi de la saturation du béton à l'aide de capteurs capacitifs noyés récemment développés : validation expérimentale et numérique

Houssein Ibrahim<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Univ Gustave Eiffel, MAST-LAMES, Campus de Nantes, F-44344 Bouguenais, France

<sup>2</sup> Université de Toulouse INSA/UPS, LMDC, F-31077 Toulouse, France, [hibrahim@insa-toulouse.fr](mailto:hibrahim@insa-toulouse.fr)

## RESUME

Les structures en béton armé peuvent subir diverses formes de dégradation affectant leur durabilité. Pour évaluer leur état de dégradation, des méthodes destructives (D) et non destructives (ND) sont utilisées, ainsi que des techniques de surveillance de la santé des structures (SHM), utilisées dans le cadre du projet ANR-SCaNING. Ce projet vise à équiper les structures de capteurs noyés, fournissant des données continues corrélées avec quatre indicateurs clés de suivi de dégradation : la résistance à la compression, le module de Young, la porosité et le degré de saturation. Plusieurs types de capteurs noyés ont été développés, dont des capteurs capacitifs sensibles au degré de saturation du béton. Ces capteurs capacitifs ont été intégrés, avec des capteurs résistifs et des sondes thermohygrométriques (THR), dans un démonstrateur constitué d'une dalle en béton armé d'environ 300 mm d'épaisseur. Ce démonstrateur a été soumis à un séchage à 45°C pendant 88 jours. Les profils de saturation obtenus par les capteurs capacitifs développés reflètent les phénomènes de séchage. Ces résultats ont été comparés à ceux obtenus avec les sondes THR, ainsi qu'à une modélisation numérique du séchage réalisée sous le logiciel Comsol Multiphysics. Les différences de saturation à toutes les profondeurs entre les trois méthodes sont relativement faibles, avec des écarts absolus inférieurs à 10 % entre les méthodes capacitives, la méthode THR et la modélisation numérique.

**Mots-clés** Capteurs noyés, degré de saturation, durabilité du béton, modélisation numérique

## I. INTRODUCTION

La durabilité d'un ouvrage se traduit par un ensemble de spécifications techniques reposant sur des méthodes d'essais directes ou indirectes. On distingue ainsi deux types de méthodes pour évaluer la dégradation d'une structure : les méthodes destructives (D) et non destructives (ND) [Balayssac et Garnier, 2017], parmi lesquelles figurent les techniques de surveillance, ou SHM (Structure Health Monitoring). Le projet ANR-SCaNING propose d'équiper les structures de capteurs noyés, permettant une évaluation continue de quatre indicateurs clés pour le diagnostic d'une structure en béton armé : le degré de saturation, la résistance à la compression, le module de Young et la porosité [Villain et al., 2021]. Ces indicateurs seront obtenus en combinant trois types de capteurs noyés : ultrasonores, capacitifs et résistifs. Dans le cadre du projet SCaNING, une des actions consiste à développer un capteur capacitif intrusif mais non destructif, intégré dans une structure en béton armé, afin de mesurer les gradients de saturation, information essentielle pour prévenir le développement de pathologies, notamment la corrosion des armatures due à la pénétration de chlorures ou à la carbonatation, les pathologies liées au gel/dégel et les réactions chimiques internes (comme l'alcali-réaction, si humidité suffisante).

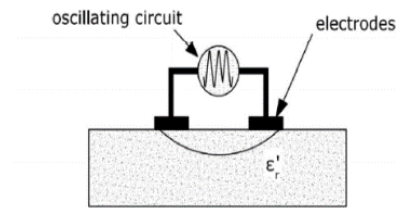
Plusieurs études ont permis de développer des capteurs noyés résistifs (placés dans le béton frais), comme le capteur Multi-ring électrodes MRE [Bässler et al., 2000], un réseau de fils-électrodes [McCarter et al., 2001], ou encore les dispositifs de mesures résistives Anneau et Échelle [Badr et al., 2019]. Ces dispositifs permettent d'étudier la réponse du béton soumis à diverses conditions d'exposition. Dans le domaine capacitif, des travaux ont été réalisés par Yu Cheng sur la détection des revêtements et des diamètres des aciers [Cheng et al., 2017], ainsi que sur la détection de la corrosion [Cheng et al., 2018 ; Torres-Luque et al., 2017]. Toutefois, à notre connaissance, la détection des gradients de saturation par un capteur capacitif noyé n'a jamais été abordée, ce qui constitue l'objectif de nos travaux.

Le capteur capacitif noyé a été récemment développé dans le cadre de ma thèse [Ibrahim et al., 2024]. Il se compose principalement de 8 paires d'électrodes positionnées face à face, de dimensions 30 x 10 mm<sup>2</sup> et d'épaisseur 1 mm. Le volume d'investigation est déterminé par l'espacement de 30 mm entre les électrodes [Ibrahim et al., 2022]. Dans un premier temps, le capteur est intégré dans un démonstrateur à grande échelle du projet SCaNING, constituée d'une dalle en béton armé, afin de suivre l'évolution de la saturation lors d'un séchage à 45 °C. Dans un deuxième temps, les résultats obtenus par le capteur capacitif seront comparés à une modélisation numérique du phénomène de séchage réalisée sous le logiciel Comsol Multiphysics, ainsi qu'aux données fournies par des sondes THR noyées dans le même démonstrateur.

## II. METHODE ET MATERIAUX

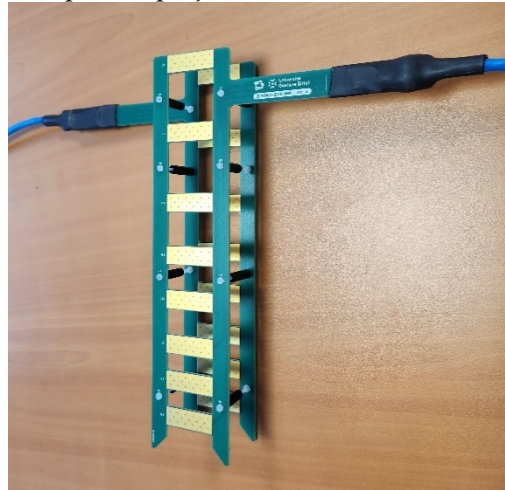
### A. Méthode capacitive

La méthode capacitive de surface utilisée en Génie Civil [Dérobert et al., 2008] consiste à appliquer un courant alternatif entre deux électrodes placées à la surface du béton et à mesurer la fréquence de résonance du système électrodes-béton. Le circuit oscille à une fréquence proche de 33 MHz afin de minimiser l'influence de la température et de la conduction ionique [Dérobert et al., 2008] (voir Figure 1). La fréquence mesurée est ensuite convertie en constante diélectrique par étalonnage dans des matériaux ayant des constantes diélectriques connues [Ibrahim et al., 2023]. La constante diélectrique est enfin convertie en degré de saturation à l'aide d'une calibration réalisée sur différentes carottes de béton à divers degrés de saturation [Villain et al., 2018].



**FIGURE 1.** Schéma du système capacitif appliqué sur la surface du matériau [Fares et al, 2016].

Les méthodes de mesure de surface ont prouvé leur efficacité, notamment avec le circuit oscillant SyMeCC [Dérobert et al., 2008 ; Fares et al., 2016]. Cependant, pour étudier le matériau en profondeur et obtenir une résolution spatiale satisfaisante, un processus d'inversion, parfois complexe, est souvent nécessaire [Alhajj et al., 2021]. Ainsi, le développement d'un capteur capacitif noyé demeure essentiel en génie civil. Le capteur capacitif conçu par [Ibrahim et al., 2024], illustré dans la figure 2, a été utilisé pour suivre le séchage d'un démonstrateur en béton armé sous une température de 45°C (les caractéristiques du béton du démonstrateur sont présentées dans le paragraphe suivant II.B.). Les espacements entre les paires d'électrodes ont été déterminés en fonction des profondeurs visées pour le projet SCaNING.



**FIGURE 2.** Vue du capteur capacitif en circuit imprimé [Ibrahim et al., 2024].

### B. Béton B40

Le béton utilisé pour le coulage du démonstrateur est celui décrit dans les travaux de [Badr et al., 2019]. Le ciment est un CEM I 52,5 N SR 3 PM, avec un dosage de 350 kg/m<sup>3</sup>. Le rapport eau sur ciment (E/C) est égal à 0,56, la taille maximale des granulats D<sub>max</sub> est de 12 mm. Les graviers et le sable proviennent de la carrière du Boulonnais. Il s'agit de granulats concassés de nature calcaire considérés comme non réactifs vis-à-vis de la réaction alcali-granulats. Ce béton a été utilisé en complément de deux autres bétons, B30 et B60, dont les rapports E/C sont respectivement supérieurs et inférieurs à celui du B40. Bien que non détaillés dans ce travail, ces bétons ont été employés dans le projet afin d'explorer différents états hydriques du béton. Le Tableau 1 donne les détails de cette formulation B40.

**TABLEAU 1.** Formulation de béton B40.

Constituants	Quantité (kg/m <sup>3</sup> )
Graviers 4/12 mm, carrière du boulonnais	984

Sable 0/4 mm, carrière du boulonnais	890
Ciment CEM I 52,5 N SR 3 PM, Lafarge, val d'Azergue	350
Eau efficace ( $E_{eff}$ )	206
$E_{eff}/C$	0,56

### III. ETUDE EXPERIMENTALE

Le démonstrateur a été conditionné pendant 28 jours en cure endogène dans une salle à une température  $T = 20 \pm 2$  °C et une humidité relative  $HR = 95 \pm 5$  %. La méthode pour générer un profil de saturation consiste à exposer une seule face (notée face séchante dans ce qui suit) à un séchage unidirectionnel et à imperméabiliser les 5 autres. Pour cela, à l'issue de la cure, à 28 jours après coulage ( $T_c + 28$  j), les 6 faces ont été recouvertes par deux couches de papier aluminium pour bien les protéger contre le séchage. Une couche de polyéthylène a été ajoutée avant les deux couches d'aluminium uniquement sur la face soumise au séchage dans le but de faciliter l'enlèvement de l'aluminium adhésif. A  $T_c + 40$  j, le démonstrateur a été conditionné dans une salle climatisée à  $20 \pm 2$  °C. Trois séchages unidirectionnels ont été programmés. Seule la face séchante est exposée à l'air, les autres faces restantes imperméabilisées par les deux couches de papier aluminium. A  $T_c + 77$  j, a débuté le premier séchage à une température de  $20 \pm 2$  °C. Le démonstrateur a été soumis à ce séchage pendant 154 jours, soit jusqu'au  $T_c + 231$  j. Le démonstrateur a alors été déplacé et installé dans une étuve à température contrôlée (voir Figure 3). A  $T_c + 231$  j, la température de l'étuve a été fixée à 45 °C. Cette échéance marque le début du deuxième séchage à 45 °C et sera notée  $T_{02} = T_c + 231$  j. Le démonstrateur a été ainsi soumise à ce séchage pendant une période de 88 jours ( $T_{02} + 88$  j =  $T_c + 319$  j). A ce moment, le séchage à 45 °C a été interrompu et la température a été ramenée progressivement à 20 °C. On s'intéresse dans cet article au séchage à 45 °C, qui génère le gradient le plus significatif.

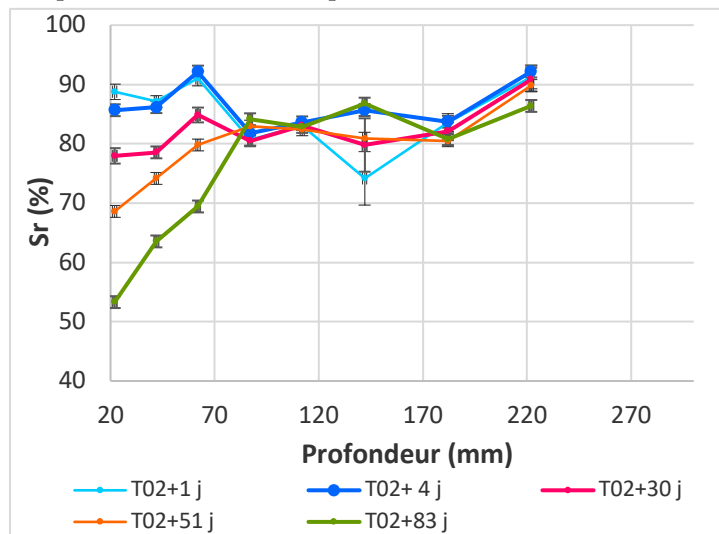


**FIGURE 3.** Vue du démonstrateur dans l'étuve avant le lancement de la campagne de séchage à 45 °C.

Les mesures capacitatives ont été réalisées à l'aide du capteur capacitif développé, interrogé par une chaîne de mesure spécialement conçue. Un multiplexeur est nécessaire dans la chaîne d'acquisition

pour interroger automatiquement les 8 paires du capteur. La configuration [Villain et al., 2023] comprend le capteur connecté par des fils à un multiplexeur MUX U2751A Keysight, qui est lui-même connecté au SyMeCC via des câbles. Les valeurs de fréquence d'oscillation sont enregistrées sur un ordinateur portable via une connexion Bluetooth. Le système est automatisé pour effectuer 18 mesures sur chaque paire d'électrodes (à chaque profondeur) avant de passer à la suivante. La moyenne et l'écart-type des 18 mesures sont calculées pour chaque paire. Les fréquences sont d'abord converties en permittivité par étalonnage. Les valeurs obtenues à 45 °C sont ensuite ajustées à 20 °C à l'aide de fonctions de conversion en température, détaillées dans la thèse de [Ibrahim, 2024], avant d'être transformées en saturation par calibration.

Les profils de saturation obtenus à différentes échéances du séchage sont présentés dans la figure 4. Chaque point correspond à la valeur d'une paire d'électrodes.



**FIGURE 4.** Evolution du degré de saturation en fonction de la profondeur au cours du séchage à 45°C.

Les résultats montrent une diminution du taux de saturation dans la zone proche de la face séchant toute au long du processus, passant d'environ 90 % à 55 % à la fin du séchage pour la paire située à 22 mm de la face séchant. Les courbes révèlent un processus de séchage observé jusqu'à une profondeur de 87 mm. Une variation est notée à la profondeur de 142 mm, interprétée comme étant due à un bruit électronique au niveau des connecteurs associés à cette paire, en raison des écarts-types élevés à cette profondeur. Les faibles écarts-types observés pour les autres profondeurs reflètent la bonne répétabilité de la mesure.

## IV. MODELISATION DU PROCESSUS DE SECHAGE

### A. Equations du séchage

Lorsqu'une structure en béton est soumise à une humidité relative environnante inférieure à l'hygrométrie interne, il se crée un déséquilibre hygrométrique à l'origine du départ d'eau de l'intérieur vers l'extérieur. Ce phénomène appelé séchage fait intervenir plusieurs mécanismes complexes qui se produisent de façon plus ou moins couplée dont les phénomènes de perméation, de diffusion, d'adsorption-désorption et de condensation-évaporation sont les plus prépondérants. Une modélisation complète du processus de séchage doit donc prendre en considération les différentes phases existantes à savoir la phase liquide, la phase vapeur et l'air sec [Maingy, 1999], [Baroghel Bouny et al, 1999] au travers de leurs équations de conservation de masse respectives.

Toutefois, le séchage peut être modélisé plus simplement au moyen d'une seule équation de diffusion analogue à la deuxième loi de Fick dont la résolution numérique est plus aisée et qui peut être écrite en fonction de la teneur en eau [Mensi et al, 1988], [Granger, 1996] ou de l'humidité relative [Xi et al, 1994], [Ranaivomanana et al, 2013]. Cependant, comme le coefficient de diffusion équivalent de l'eau intervenant dans certains modèles comme [Mensi et al, 1988] ou [Xi et al, 1994] est obtenu par calage de loi prédéfinies, nous avons préféré retenir l'approche de [Ranaivomanana et al, 2013] par la suite pour rester sur des bases plus physiques.

L'objectif de la modélisation est de tester la capacité d'un modèle simplifié qui a fait ses preuves pour simuler le séchage du béton à 20°C [Ranaivomanana, 2010], [Ranaivomanana et al, 2013] à reproduire nos résultats sur le B40 à 45°C et à l'adapter au besoin. Ce modèle pourra alors servir de référence pour tester la performance des capteurs capacitifs sous d'autres conditions thermo-hydrriques, au moins dans la gamme de température 20°C-45°C, si l'on ne dispose pas d'autres méthodes de référence comme les sondes THR par exemple.

On fait donc l'hypothèse d'une pression de gaz constante égale à la pression atmosphérique et on suppose que la contribution de la phase gazeuse vis-à-vis du séchage implique essentiellement un transport diffusif de la vapeur d'eau décrit par la première loi de Fick. Le séchage peut être décrit au moyen d'une seule équation de conservation de la masse d'eau dans laquelle on retrouve l'eau à la fois à l'état liquide et à l'état de vapeur. L'équation décrivant le séchage à partir du profil de degré de saturation  $S_r$  est donc :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho_l \phi S_r + \frac{p_v M_v}{RT} \phi (1 - S_r) \right] = \text{div} \left( \rho_l \frac{K_l}{\eta_l} k_{r,l} \overrightarrow{\text{grad}} p_l + \frac{M_v}{RT} R_d D_0 \overrightarrow{\text{grad}} p_v \right) \quad (1)$$

Les différents paramètres intervenant dans cette équation sont récapitulés dans le tableau suivant :

**TABLEAU 2. Paramètres intervenant dans le modèle et mode de calage**

Paramètres (unités)	Désignation	Calage des paramètres
$\rho_l$ (kg/m <sup>3</sup> )	Masse volumique de l'eau	$1,54 \cdot 10^{-5} T^3 - 1,85 \cdot 10^{-2} T^2 + 6,65 T + 247$ d'après [Monlouis Bonnaire, 2003]
T (K)	Température	318 (fixée par les conditions d'essais)
R (J.mol <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> )	Constante des gaz parfaits	8,32
$\phi$ (%)	Porosité	15,3 (d'après les mesures de poro à l'eau sur le B40)
$p_v$ (Pa)	Pression partielle de vapeur d'eau (Pa)	déduit à partir de l'humidité relative h selon la relation $h \cdot P_{vsat}$ où $P_{vsat} = 101325 \times \exp \left( 13,7 - \frac{5120}{T} \right)$ est la pression de vapeur saturante.

$K_l$ (m <sup>2</sup> )	Perméabilité intrinsèque à l'eau	1,2.10 <sup>-19</sup> obtenu sur un béton de composition voisine d'après [Ranaivomanana et al., 2013]
$\eta_l$ (Pa.s)	Viscosité dynamique de l'eau	1,002.10 <sup>-3</sup> d'après [Ranaivomanana, 2010]
$k_{rl}$	Perméabilité relative à l'eau	d'après [Ranaivomanana, 2010]
$p_l$ (Pa)	pression liquide	$p_g + \rho_l \frac{RT}{M_v} \ln h$ selon la relation de Kelvin
$D_0$ (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	Coefficient de diffusion hors milieu poreux	$0,217 \times 10^{-4} \times \left(\frac{T}{273}\right)^{1,88}$ d'après [De Vries et Kruger, 1966]

Afin d'avoir un écart le plus faible entre les résultats expérimentaux et ceux issus de la simulation, nous nous sommes inspiré des travaux de Thiéry [2005] pour fixer les valeurs des exposants intervenant dans l'expression de la résistance du milieu poreux à la diffusion gazeuse  $R_d$  selon l'équation 2 :

$$R_d(\emptyset, S_r) = \emptyset^{2,45} (1 - S_r)^{4,20} \quad (2)$$

Grâce à l'isotherme de désorption qui relie le degré de saturation à l'humidité relative  $S_r = f(h)$  donnée dans [Badr, 2019] pour le béton B40, l'équation (1) peut également s'écrire en fonction de l'humidité relative  $h$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho_l \emptyset f(h) + \frac{h \cdot p_{vsat} M_v}{RT} \emptyset (1 - f(h)) \right] \\ = \operatorname{div} \left( \rho_l^2 \frac{K_l}{\eta_l} k_{rl} \frac{RT}{M_v h} \overrightarrow{\operatorname{grad} h} + \frac{M_v}{RT} R_d D_0 \frac{1}{p_{vsat}} \overrightarrow{\operatorname{grad} h} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

### B. Conditions initiales et conditions aux limites

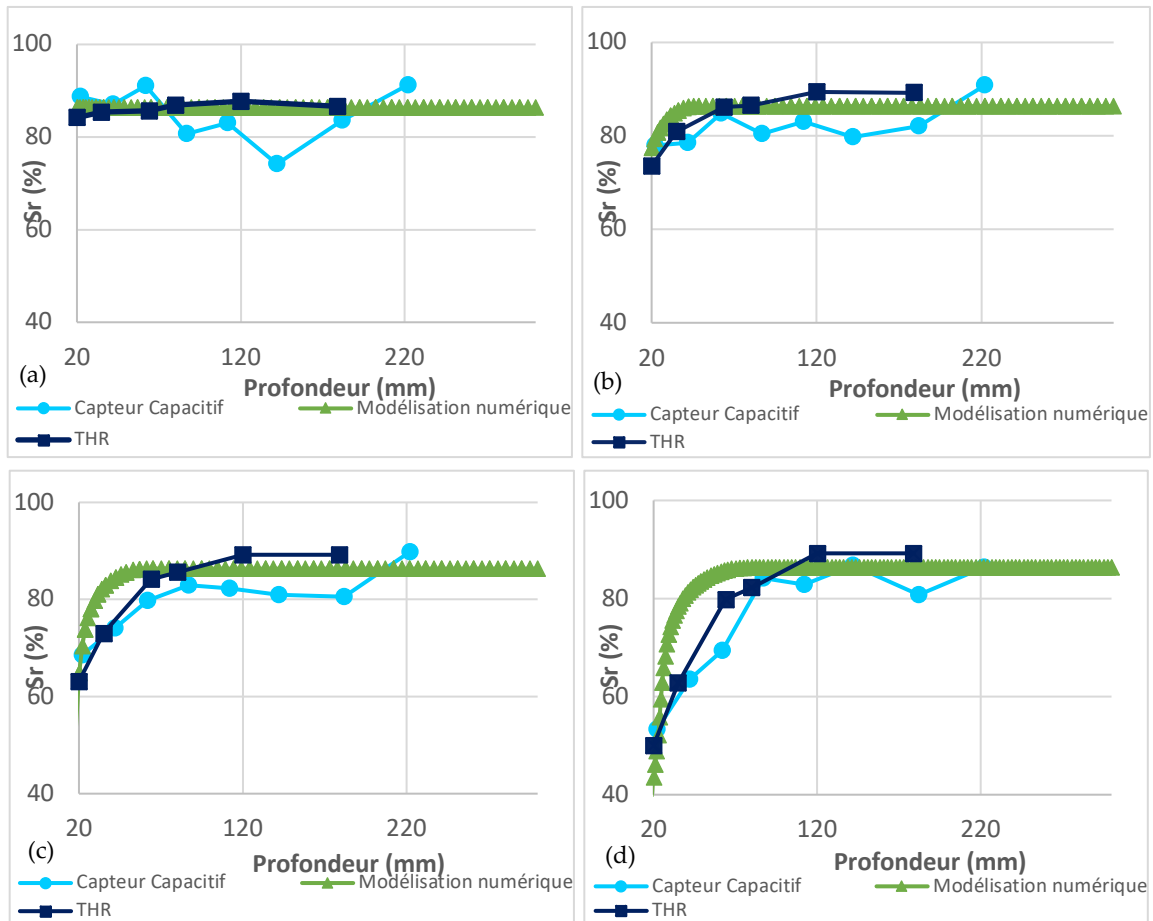
La résolution du modèle de séchage se fait via le logiciel de calcul par éléments finis COMSOL Multiphysics. Compte tenu de la symétrie du problème, la résolution se fait une dimension. Le maillage est choisi plus fin au voisinage de la face séchante en raison des importants gradients d'humidité initiaux.

Pour ce qui est des conditions initiales, nous imposons une valeur de  $h$  constante égale à 98 % dans toute l'éprouvette telle que mesurée expérimentalement au moyen des sondes THR.

Concernant les conditions aux limites, nous imposons une condition de Dirichlet avec  $h = 20$  % qui est la valeur mesurée expérimentalement au niveau de la face qui subit le séchage et une condition de Neumann en flux nul au niveau de l'autre face protégée du séchage. La température est fixée à 318 K.

## V. COMPARAISON DES PROFILS DE SATURATION OBTENUS PAR LES TROIS METHODES

Les résultats des différents gradients de degré de saturation lors du séchage à 45°C, déterminés par les différentes méthodes, sont montrés sur la figure suivante 5(a), 5(b), 5(c) et 5(d) respectivement pour les trois échéances de temps T02 + 1 j, T02 + 30 j, T02 + 51 j et T02 + 83 j.



**FIGURE 4.** Comparaison des profils de degré de saturation obtenus avec le capteur capacitif, les sondes THR et la modélisation numérique : (a) à T02 + 1 j, (b) à T02 + 30 j, (c) à T02 + 51 j et (d) à T02 + 83 j.

Les profils d'humidité obtenus par les sondes THR et la modélisation numérique ont été convertis en profils de degré de saturation à l'aide des isothermes de désorption de [Badr, 2019]. Il convient de noter que les sondes THR présentent une précision de 2 à 3 % en dessous de 90 %.

On observe une bonne correspondance globale entre les valeurs expérimentales et celles du modèle, en particulier pour une durée de séchage inférieure à 30 jours. Au-delà de cette période, un léger écart apparaît dans les zones où le gradient hydrique est fort.

Cet écart peut avoir plusieurs origines. Les incertitudes cumulées lors des différentes étapes nécessaires à l'obtention des profils de saturation peuvent jouer un rôle. En effet, pour la méthode capacitive, les incertitudes liées à la mesure de fréquence s'ajoutent à celles de l'étalonnage, de la conversion en température et de la loi de calibration, ce qui peut entraîner une incertitude significative sur la valeur du degré de saturation. Par ailleurs, pour la modélisation numérique et les sondes THR, des incertitudes peuvent également découler des modèles de désorption. Un écart

éventuel avec les propriétés réelles du béton pourrait également expliquer l'écart observé entre les résultats des capteurs et ceux issus des capteurs. Enfin, à haute saturation, il est à noter que la méthode THR est moins fiable. En effet, la présence d'une goutte d'eau est suffisante pour influencer les mesures d'humidité relative et, par conséquent, les degrés de saturation obtenus.

Néanmoins, l'écart absolu maximal observé reste modéré (de l'ordre de 10 %), ce qui témoigne de la bonne fidélité du capteur capacitif développé dans la mesure de la saturation dans le béton.

## VI. Conclusion

La thèse a porté sur le développement d'un capteur capacitif noyé [Ibrahim et al., 2024]. Cette étude avait pour objectif de suivre les gradients de saturation dans un démonstrateur soumis à un séchage à 45 °C par le capteur développé. Le suivi a révélé une diminution de la saturation d'environ 35 % à une profondeur de 22 mm par rapport à la face séchante. Le séchage a été observé jusqu'à une profondeur de 87 mm à la fin de l'expérimentation. Par la suite, une étude numérique de modélisation de séchage a été menée à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics. Les résultats obtenus par modélisation, ainsi que ceux de sondes THR noyées dans le démonstrateur, montrent un écart absolu maximal d'environ 10 % sur les différentes profondeurs et sur quatre échéances de séchage par rapport aux mesures du capteur capacitif noyé. Cet écart modéré constitue une validation à la fois numérique et expérimentale de ce capteur.

## REMERCIEMENT

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche pour le financement du projet ANR-20-CE22-0015 SCaNING.

## REFERENCES

Alhajj, M. A., Bourguignon, S., Palma-Lopes, S., & Villain, G. (2021). Joint inversion of electromagnetic measurements for the determination of water saturation profiles in concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 147, 106500. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106500>

Badr, J., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., Deby, F., Balayssac, J. P., Delepine-Lesoille, S., ... & 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. (2019). Conception et validation d'un capteur noyé de résistivité électrique en vue du suivi des profils de teneur en eau dans les bétons (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III) IFSTTAR Nantes, France.

Balayssac, J.-P., Garnier, V., Villain, G., Sbartai, Z.-M., Dérobert, X., Piwakowski, B., ... Salin, J. (2015). An overview of 15 years of French collaborative projects for the characterization of concrete properties by combining NDT methods. *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2015)*, 15-17 September 2015, Berlin, Germany, 15

Baessler, R., Mietz, J., Raupach, M., & Klinghoffer, O. (2000, April). Corrosion monitoring sensors for durability assessment of concrete structures. In *Smart Structures and Materials 2000: Smart*

Systems for Bridges, Structures, and Highways (Vol. 3988, pp. 32-39). SPIE.  
<https://doi.org/10.1117/12.383168>

Baroghel-Bouny, V., Mainguy, M., Lassabatere, T., & Coussy, O. (1999). Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials. *Cement and concrete research*, 29(8), 1225-1238. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00102-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00102-7)

Cheng, Y., Hanif, A., Chen, E., Ma, G., & Li, Z. (2018). Simulation of a novel capacitive sensor for rebar corrosion detection. *Construction and Building Materials*, 174, 613-624. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.133>

Cheng, Y., Gao, F., Hanif, A., Lu, Z., & Li, Z. (2017). Development of a capacitive sensor for concrete structure health monitoring. *Construction and Building Materials*, 149, 659-668. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.150>

Dérobot, X., Iaquina, J., Klysz, G., & Balayssac, J. P. (2008). Use of capacitive and GPR techniques for the non-destructive evaluation of cover concrete. *Ndt & E International*, 41(1), 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2007.06.004>

De Vries, D.A., Kruger, A. J., On the value of diffusion coefficient of water vapour in air, *Phénomènes de transport avec changement de phase dans les milieux poreux ou colloïdaux*, ed. CNRS, 1966, pp 561-572.

Fares, M., Fargier, Y., Villain, G., Derobert, X., & Lopes, S. P. (2016). Determining the permittivity profile inside reinforced concrete using capacitive probes. *NDT & E International*, 79, 150-161. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2016.01.002>

Granger, L. (1995). *Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires: analyse et modélisation* (Doctoral dissertation, Ecole Nationale des ponts et Chaussées). tel-00520675 , **version 1** (24-09-2010)

Ibrahim, H., Villain, G., Dérobot, X., Balayssac, J. P., Lopes, S. P., & Devie, T. (2022, August). Calibration procedure for the development of an embedded capacitive sensor. In 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022. [fhal-04280177](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04280177)

Ibrahim, H., Villain, G., Fauchard, C., Ranaivomanana, N., Dérobot, X., Lopes, S. P., ... & Balayssac, J. P. (2023, January). Calibration process of a capacitive probe for monitoring of reinforced concrete nuclear structures. In International Conference on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications-NDE NucCon 2023 (pp. 27-32). [ndt.net.\(hal-04296121\)](https://ndt.net/hal-04296121)

Ibrahim, H., Villain, G., Ranaivomanana, N., Lopes, S. P., Balayssac, J. P., Devie, T., & Dérobot, X. (2024). Design and validation of a multi-electrode embedded capacitive sensor to monitor the electromagnetic properties in reinforced concrete structures. *Measurement*, 115057. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115057>

Ibrahim, H., (2024) Développement de capteurs capacitifs noyés pour déterminer les gradients de teneur en eau dans des structures en béton armé, thèse de doctorat de l'école centrale de Nantes, spécialité Génie civil. Thèse en cours de publication.

Mainguy, M. (1999). *Modeles de diffusion non linéaire en milieux poreux. Applications à la dissolution et au séchage des matériaux cimentaires* (Doctoral dissertation, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées). tel-00869152, **version 1** (02-10-2013)

McCarter, W. J., Chrisp, T. M., Butler, A., & Basheer, P. A. M. (2001). Near-surface sensors for condition monitoring of cover-zone concrete. *Construction and Building Materials*, 15(2- 3), 115-124. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00060-X](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00060-X)

Mensi, R., Acker, P., & Attolou, A. (1988). Drying of concrete: analysis and modelling. *Séchage du béton : analyse et modélisation*, 21(121), 3-12. <https://doi.org/10.1007/BF02472523>

Millington, R. J. (1959). Gas diffusion in porous media. *Science*, 130(3367), 100-102. <https://doi.org/10.1126/science.130.3367.100.b>

Monlouis Bonnaire. (2003). Modélisation numérique des transferts couplés air-eau-sel dans les matériaux cimentaires et les terres cuites. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse, spécialité Génie Civil.

Ranaivomanana, H. (2010) Transferts dans les milieux poreux réactifs non saturés : application à la cicatrisation de fissure dans les matériaux cimentaires par carbonatation. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, spécialité Génie Civil.

Ranaivomanana, H., Verdier, J., Sellier, A., & Bourbon, X. (2013). Prediction of relative permeabilities and water vapor diffusion reduction factor for cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 48, 53-63. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.02.008>

Thiéry, M. (2005). Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires: prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques. Thèse de docteur de l'école nationale des ponts et chaussées, spécialité : structures et matériaux, LCPC, Paris.

Thiéry, M., Baroghel-Bouny, V., Bourneton, N., Villain, G., & Stéfani, C. (2007). Modélisation du séchage des bétons : analyse des différents modes de transfert hydrique. *Revue européenne de génie civil*, 11(5), 541-577. <https://doi.org/10.1080/17747120.2007.9692945>.

Torres-Luque, M.; Osma, J.F.; Sánchez-Silva, M.; Bastidas-Arteaga, E.; Schoefs, F. Chlordetect (2017). Commercial Calcium Aluminate Based Conductimetric Sensor for Chloride Presence Detection. *Sensors*, 17, 2099. <https://doi.org/10.3390/s17092099>

Xi, Y., Bažant, Z. P., Molina, L., & Jennings, H. M. (1994). Moisture diffusion in cementitious materials moisture capacity and diffusivity. *Advanced Cement Based Materials*, 1(6), 258-266. [https://doi.org/10.1016/1065-7355\(94\)90034-5](https://doi.org/10.1016/1065-7355(94)90034-5)

Villain, G., Balayssac, J. P., Garnier, V., Sbartai, M., Yven, B., Hénault, J. M., ... & Abraham, O. (2021). Projet ScaNING: Suivi des infrastructures neuves et existantes par Capteurs Noyés pour évaluer les Indicateurs Nécessaires à leur Gestion durable. *Academic Journal of Civil Engineering*, 38(2), 94-98. <https://doi.org/10.26168/ajce.38.2.22>

Villain, G., Garnier, V., Sbartai, Z. M., Derobert, 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, 1-14. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1165-4>, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01876324v1>