

# Etude des possibles biais influant sur les mesures par capteur capacitif noyé

Houssein Ibrahim<sup>1, 2</sup>, Géraldine Villain<sup>1</sup>, Sérgio Palma Lopes<sup>3</sup>, Narintsoa Ranaivomanana<sup>2</sup>, Jean-Paul Balayssac<sup>2</sup>, Xavier Dérobert<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Université de Toulouse INSA/UPS, LMDC, F-31077 Toulouse

<sup>3</sup> Univ Gustave Eiffel, GERS-GEOEND, Campus de Nantes, F-44344 Bouguenais

## RESUME

Dans le cadre du projet ANR-SCaNING, il s'agit de développer des capteurs capacitifs, résistifs et ultrasonores, intrusifs mais non destructifs à noyer dans des structures en béton armé afin de déterminer des indicateurs de durabilité et de suivi de dégradation. Dans nos travaux faisant partie de ce projet, il s'agit de concevoir un capteur capacitif noyé qui permettra de suivre la teneur en eau en mesurant la permittivité diélectrique au cours du temps.

Comme toute mesure physique, la méthode capacitive est sensible à divers paramètres (environnementaux, instrumentaux...). On s'intéresse ici à analyser les possibles biais induits par l'action de ces paramètres sur les mesures capacitives. Dans un premier temps, une étude numérique a été réalisée en modélisant des électrodes fixées à deux montants en polychlorure de vinyle (PVC), le tout dans un volume de béton. L'étude montre l'influence des paramètres composant le montage expérimental (montants en PVC, vis...) sur la capacité simulée. Dans un second temps, un protocole expérimental a été mené dans le but de quantifier les effets capacitifs des câbles électriques reliant les électrodes au système de mesure capacitif nommé SyMeCC. Les résultats montrent l'influence de la longueur des câbles et mettent en relief le couplage électromagnétique généré qui varie en fonction de la longueur et de la distance entre les câbles.

**Mots-clés** Capteur noyé, Méthode capacitive, Câbles électriques, Montage expérimental, Modélisation numérique

**Key-words** Embedded sensor, Capacitive Method, Electric cables, Experimental setup, Numerical modeling

## I. INTRODUCTION

La notion de durabilité d'un ouvrage se traduit par un ensemble de spécifications techniques basées sur des méthodes d'essais directes ou indirectes. On distingue alors deux types de méthodes pour évaluer la durabilité d'un ouvrage : les méthodes destructives (D) et les méthodes non destructives (ND) [Balayssac et Garnier, 2017], parmi lesquelles on peut citer les techniques de surveillance (ou SHM pour Structure Health Monitoring). Le projet ANR-SCaNING propose d'équiper les structures de capteurs embarqués qui fourniront des informations permettant d'évaluer en continu les quatre indicateurs les plus pertinents pour le diagnostic d'une structure en béton armé : la teneur en eau, la résistance à la compression, le module d'Young et la porosité [Villain et al. 2021]. Ces 4 indicateurs seront obtenus en combinant trois types de capteurs noyés différents : ultrasonores,

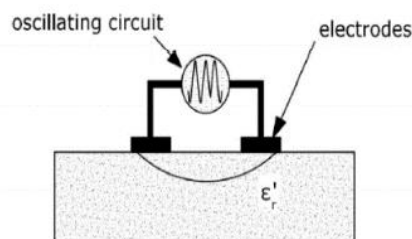
capacitifs et résistifs. Dans le cadre du projet ScaNING, une des actions consiste à développer un capteur capacitif intrusif mais non destructif, noyé dans une structure en béton armé afin de déterminer les gradients de teneur en eau, information essentielle vis-à-vis du développement de la plupart des pathologies en particulier la corrosion des armatures.

Plusieurs études ont permis de développer des capteurs noyés résistifs (placés dans le béton frais) comme le Multi-ring électrodes MRE [Bässler et al., 2000], un réseau de fils-électrodes [McCarter et al., 2001] ou les dispositifs de mesures résistives Anneau et Echelle [Badr et al., 2019]. Ces dispositifs permettent d'étudier les réponses du béton soumis à des conditions d'exposition différentes. Dans le domaine capacitif, des travaux ont été réalisés par Yu Cheng sur la détection du revêtement et des diamètres des aciers [Cheng et al., 2017], en plus de ceux faits sur la détection de corrosion [Cheng et al., 2018 ; Torres-Luque et al., 2017]. Malgré ces études, la détection de gradients de teneur en eau par capteur capacitif noyé n'a jamais été mentionnée, à notre connaissance. Ceci constitue l'objectif de nos travaux.

On s'intéresse dans cet article à détailler les différents biais qui peuvent influencer sur une mesure par capteur capacitif noyé. Pour ce faire, on commence par introduire la méthode capacitive et l'application des mesures capacitives surfaciques sur béton. On abordera ensuite les influences des différents paramètres sur la mesure par un simple prototype capacitif noyé. Dans un premier temps, le prototype est modélisé par un calcul aux éléments finis sur le logiciel Comsol Multiphysics®. Les influences des différents éléments constituant le prototype seront montrées. Dans un deuxième temps, nous présentons une étude expérimentale lancée dans le but de quantifier les influences parasites des éléments de la chaîne de mesure. Les résultats permettent finalement de quantifier les capacitances parasites qui s'ajoutent aux mesures puis d'émettre des recommandations à suivre lors des mesures par capteurs capacitifs noyés.

## II. METHODE ET MATERIAUX

Les techniques capacitives sont utilisées dans plusieurs domaines pour la détection du mouvement, la mesure de l'épaisseur, l'évaluation du degré de saturation et d'autres applications citées par [Fares et al., 2016]. 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 dans le but de minimiser l'influence de la température et de la conduction ionique [Dérobert et al., 2008] (Figure 1).



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

Sur ouvrage, on utilise une sonde avec des patins composés de deux ou quatre électrodes (Figure 2). Les patins sont une combinaison d'électrodes métalliques avec un support. Ils ont été conçus par le CEREMA et L'Université Gustave Eiffel (ex. LCPC dans les années 1970-1980). Plusieurs

géométries de patins surfaciques ont été développées ensuite par [Al Hajj, 2020], la différence entre les patins est le nombre d'électrodes (plaques métalliques) ainsi que leurs dimensions et espacements ce qui rend leurs profondeurs d'investigation différentes [Fares et al., 2016]. Ces patins sont connectés au système SyMeCC qui contient le circuit de génération du signal oscillant et qui enregistre la perturbation de la fréquence de résonance mesurée.



**FIGURE 2.** Géométries des patins capacitifs développés [Dérobert et al., 2008]

Les méthodes de mesure de surface ont prouvé leur validité avec le système capacitif SyMeCC [Dérobert et al., 2008 ; Fares et al., 2016]. Cependant, pour étudier le matériau plus en profondeur et obtenir une bonne résolution spatiale, un processus d'inversion parfois complexe est recommandé [Al Hajj et al., 2021]. Ainsi, le développement d'un capteur capacitif noyé demeure une nécessité en génie civil.

Une étude a été menée pour optimiser la géométrie d'électrodes noyées dans le béton [Ibrahim et al., 2022]. L'étude a montré qu'il était plus avantageux de positionner les électrodes, de dimensions 30\*10 mm<sup>2</sup> et d'épaisseur 1 mm, par paires, face à face et espacées de 3 cm. Ces électrodes sont montées sur deux plaques en PVC fixées par des vis en nylon pour maintenir un écart de 3 cm. Or, ceci impose la présence de câbles pour relier le SyMeCC aux électrodes noyées dans le béton, ce qui induit des effets capacitifs parasites qui s'ajoutent aux effets des deux montants en PVC ainsi qu'aux effets des vis.

### III. ETUDE NUMERIQUE : INFLUENCE DU SUPPORT D'ELECTRODES

#### A. Approche numérique

Une étude par modélisation numérique a été réalisée afin de comprendre l'effet des montants en PVC et des différentes vis supportant les électrodes. L'étude numérique a été réalisée sur le logiciel Comsol Multiphysics® en utilisant le module AC/DC. Ce logiciel commercial de simulation est basé sur la méthode des éléments finis. En effet, bien que cette méthode de mesure capacitive utilise un circuit qui oscille aux alentours de 33 MHz, il a été démontré que nous pouvons étudier les phénomènes capacitifs dans le domaine électrostatique [Fares et al., 2016]. C'est pourquoi, dans le module AC/DC du logiciel, nous sélectionnons la résolution d'un problème électrique stationnaire. L'équation régissant la physique ici est l'équation de Poisson (équation 1) et la différence de potentiel entre les électrodes est de 1 V.

$$\vec{\nabla} \cdot (\epsilon \vec{\nabla} V) = 0 \quad (1)$$

où  $\epsilon$  (F/m) est la permittivité diélectrique définie par  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon'_r$ ,  $\epsilon_0$  est la permittivité du vide et  $\epsilon'_r$  la permittivité relative du milieu et  $V$  (V) est la distribution de potentiel électrique sur les électrodes.

Nous définissons ensuite les paramètres d'entrée : la géométrie du modèle, les matériaux (béton ( $\epsilon' r=2 \rightarrow 32$ ), air ( $\epsilon' r=1$ ), PVC ( $\epsilon' r=2.9$ ) et nylon pour le support ( $\epsilon' r=4$ ), inox pour les électrodes) et le maillage [Ibrahim, 2020]. Ce dernier (voir Tableau 1) a été optimisé afin d'assurer la convergence de la solution et un compromis entre la précision et la durée des calculs effectués. Cependant, le maillage a été fait en appliquant des conditions de maillage très fins sur les zones qui nous intéressent (les électrodes où l'on applique le potentiel et leur voisinage) puis on augmente la taille des mailles progressivement en s'éloignant des électrodes de mesure et de cette zone d'intérêt. Le temps de calcul avec ce maillage est estimé à 12 s par simulation.

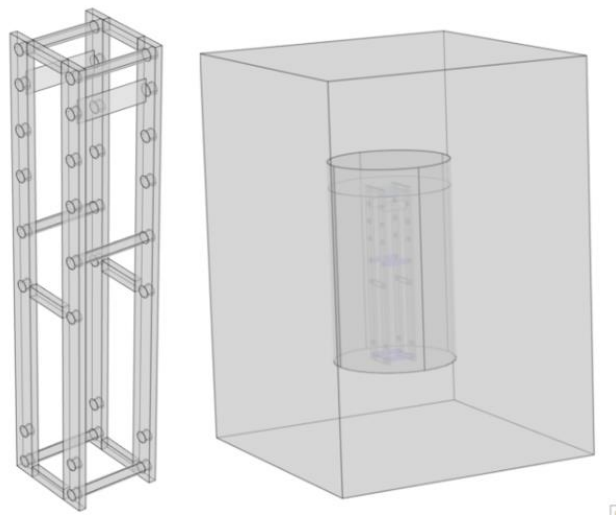
**TABLEAU 1. Caractéristique du maillage utilisé**

Taille d'élément maximal (m)	Taille d'élément minimal (m)	Facteur de croissance maximal	Facteur de courbure	Résolution des régions minces
0.0005	$1.8 \cdot 10^{-6}$	1.3	0.2	1

Une validation analytique de l'approche numérique utilisée (équations pour représenter le problème physique, conditions aux limites, dimensionnement du maillage, etc.) a été faite en modélisant le cas d'un condensateur plan [Ibrahim, 2020]. Une simulation de 2 plaques d'électrodes carrées  $L \cdot L = 300 \cdot 300$  mm sans épaisseur espacées par  $d = 30$  mm (égale à l'épaisseur du béton diélectrique qui les séparent ayant des faces carrées  $L \cdot L = 300 \cdot 300$  mm) a été faite au départ. Ensuite, le rapport longueur sur distance ( $L/d$ ) a été augmenté en variant les 2 paramètres  $L$  et  $d$  (tout en respectant  $L/d > 10$ ). Une différence de 1,2% a été obtenue entre la solution analytique basée sur l'équation  $C = \epsilon_0 \cdot \epsilon' r \cdot S/d$  et le résultat numérique lorsque le rapport  $L/d$  atteint 40.

*B. Modélisation des effets parasites : Nylon, vis, montants en PVC*

Une modélisation du prototype (Figure 3), avec électrodes et montants en PVC, a été réalisée.



**FIGURE 3. Modèle numérique du prototype seul (à gauche) et noyé dans un cylindre de béton, le tout placé dans un volume d'air (à droite).**

La modélisation inclut le prototype dans une éprouvette de béton entourée par un volume d'air de dimensions 3 fois supérieures à celles de l'éprouvette dans le but de rapprocher les simulations le plus possible de ce qui se passe dans les expériences et dans la réalité [Al Hajj, 2020]. Les simulations

ont été menées avec le dispositif complet, puis en enlevant les vis deux par deux successivement du haut vers le bas et puis les deux montants en PVC. Les résultats pour chaque cas sont tracés (Figure 4).

La modélisation montre l'effet négligeable de la présence des petites vis en nylon quels que soient leur position et leur nombre (Fig. 4 : les droites sans les paires de vis sont confondues avec l'ensemble complet modélisé). Néanmoins, l'effet des 2 montants en PVC qui tiennent les vis et les électrodes est significatif. Cet effet est inévitable mais sera compensé par étalonnage du capteur.

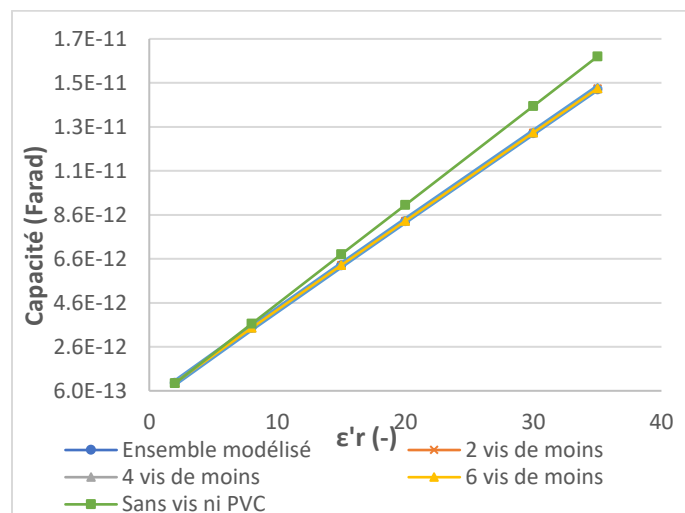


FIGURE 4. Modélisation des effets parasites du support des électrodes

## IV. ETUDE EXPERIMENTALE : INFLUENCE DES CABLES

### A. Chaîne de mesure

Une étude paramétrique expérimentale a été réalisée dans le but de quantifier les effets capacitifs induits par l'espacement entre les câbles et les longueurs de ces câbles sur les mesures. La chaîne de mesure est composée du capteur relié par 2 câbles électriques au dispositif SyMeCC. Le capteur est placé soit dans l'air, soit dans un volume d'éthanol. Des systèmes de fixation rigides permettent de maintenir une distance connue entre les câbles (Fig. 5).

### B. Effet capacitif des câbles électriques

#### B.1. Effet de l'espacement

Des essais dans l'air et dans l'éthanol (considéré comme matériau étalon vu sa permittivité ( $\epsilon'r=24$ ) située dans la gamme du béton saturé à fréquence capacitive [Ibrahim et al., 2023]) ont montré les effets sur la fréquence mesurée en fonction de l'espacement entre les câbles, lorsque ceux-ci ont une longueur fixe (40 cm). Comme la variation de l'inverse du carré de la fréquence de résonance entre une mesure dans l'air et une mesure dans un matériau donné ( $\Delta(1/f^2) = 1/f^2_{\text{matériau}} - 1/f^2_{\text{air}}$ ) est proportionnelle à la capacité mesurée et à la permittivité du matériau [Fares et al., 2016], la courbe de variation  $\Delta(1/f^2)$  correspondante a été tracée également puisqu'elle renseigne sur l'impact de l'effet capacitif entre câbles sur la capacité ainsi que sur la permittivité recherchée.

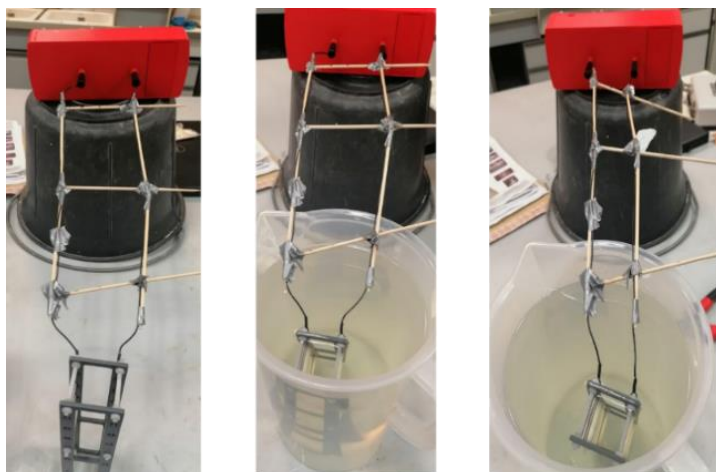


FIGURE 5. Espacement des câbles dans l'air et les étalons

Les résultats présentés dans la figure 6 montrent que la capacité (proportionnelle à  $\Delta(1/f^2)$ ) augmente en rapprochant les câbles. Ceci peut être interprété par un effet de couplage capacitif généré lorsque les câbles se rapprochent. Cependant, au-delà de 4 cm d'espacement, l'effet devient négligeable.

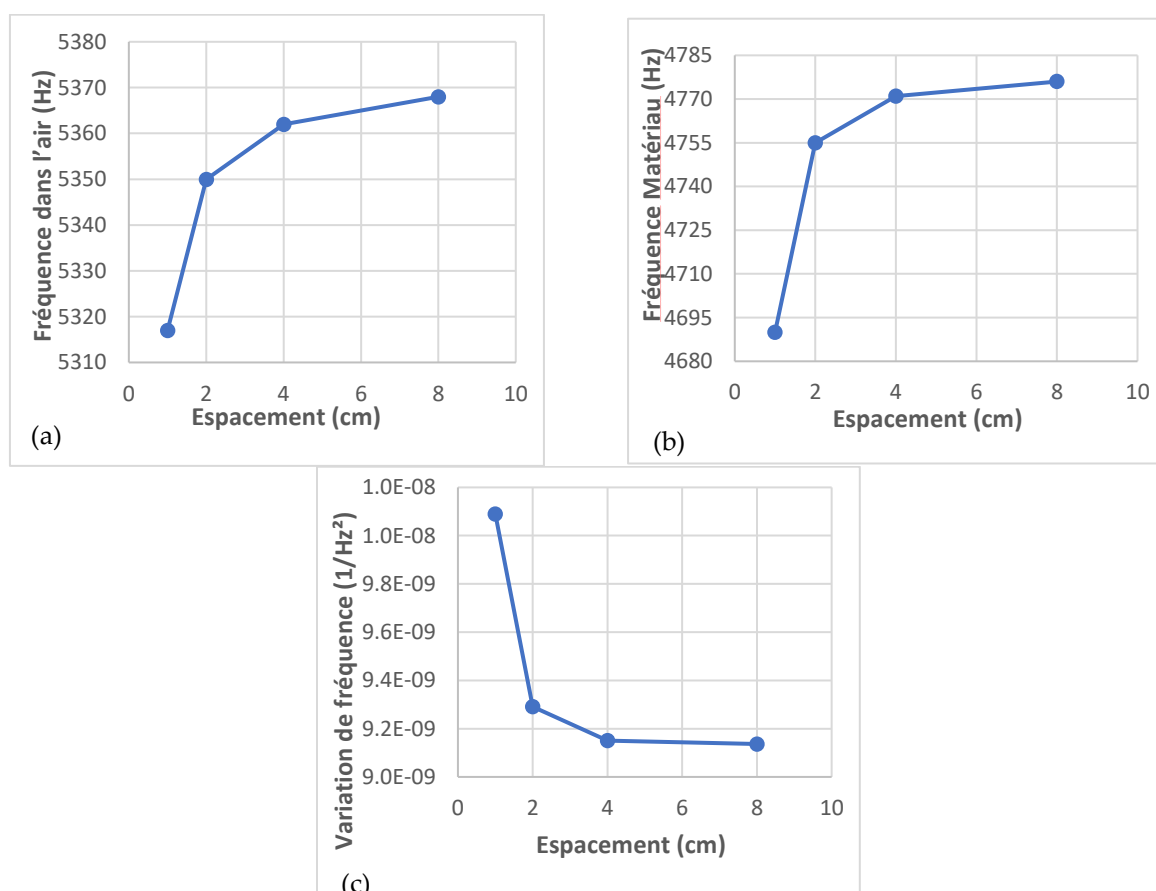
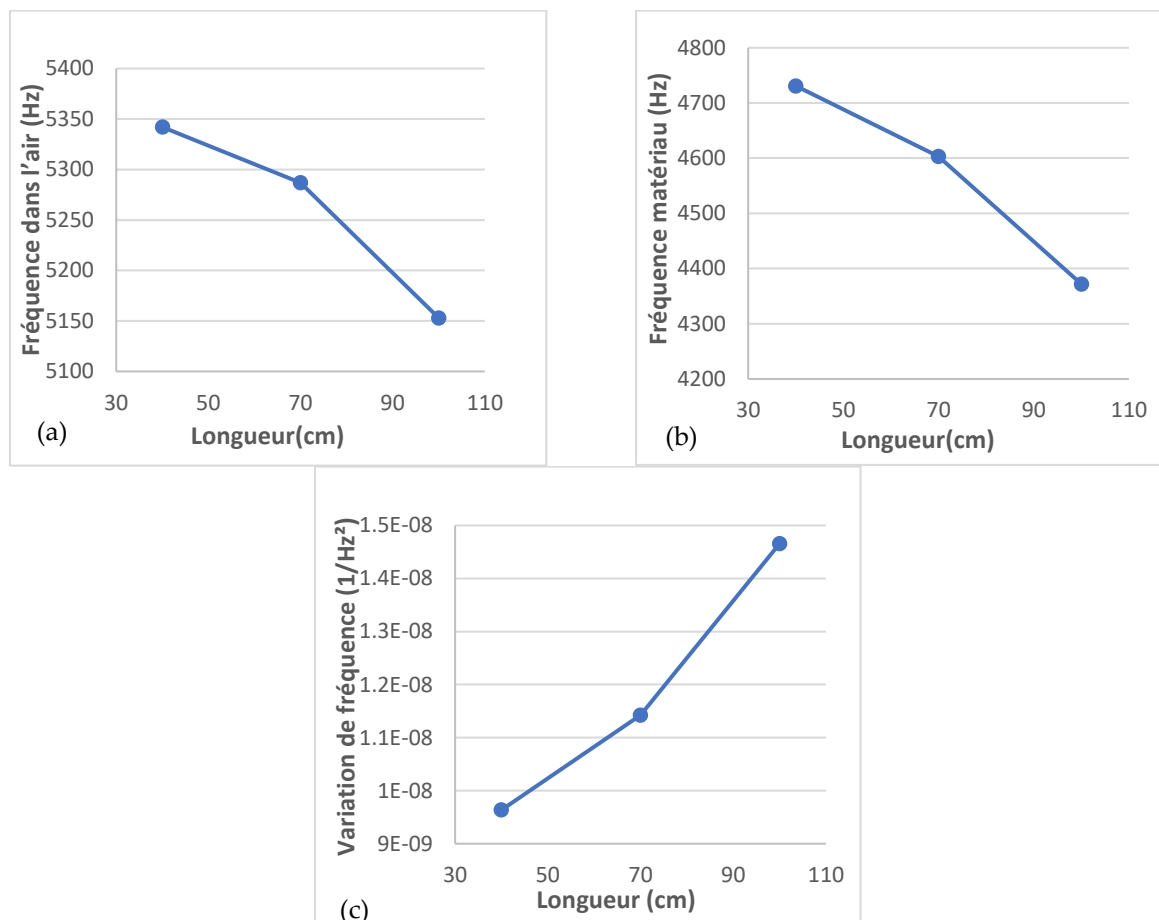


FIGURE 6. Influence de l'espacement entre les câbles de longueur 40 cm sur 3 paramètres différents : (a) fréquence de résonance dans l'air, (b) fréquence de résonance dans le matériau (étalon), (c) la variation  $\Delta(1/f^2)$

### B.2. Effet de la longueur

Une deuxième étude paramétrique a été lancée pour quantifier l'influence de la longueur des câbles, maintenus à un espacement fixe (4 cm). Les fréquences de résonance dans l'air, dans l'éthanol, ainsi que la variation  $\Delta(1/f^2)$  ont été tracées.

Les résultats présentés dans la figure 7 montrent que la capacité déduite des mesures (proportionnelle à  $\Delta(1/f^2)$ ) augmente avec la longueur des câbles, ce à quoi on pouvait s'attendre. Néanmoins une longueur minimale des câbles est nécessaire pour relier l'appareil de mesure au capteur noyé. Cet effet est donc inévitable mais sera compensé par étalonnage du dispositif de mesure complet vu que le même dispositif de mesure est utilisé pour l'étalonnage et pour les mesures dans le béton (même capacités parasites induites).



**FIGURE 7.** Influence de la longueur des câbles espacés 4 cm sur 3 paramètres : (a) fréquence de résonance dans l'air, (b) fréquence de résonance dans le matériau (étalon), (c) la variation  $\Delta(1/f^2)$

## V. CONCLUSION

L'objectif de cet article est d'analyser les possibles biais induits par l'action des différents paramètres présents dans la chaîne de mesure capacitive. Dans un premier temps, une étude numérique a été réalisée en modélisant des électrodes fixées à deux montants en PVC, le tout dans un volume de béton. L'étude a montré une influence considérable des montants en PVC, supports des électrodes. L'étude numérique a montré aussi une influence négligeable des vis reliant les 2

montants du support quelles que soient leurs positions. Dans un second temps, un protocole expérimental a été mené dans le but de quantifier les effets capacitifs des câbles électriques reliant les électrodes au système de mesure capacitif SyMeCC. Cette étude montre que les câbles doivent être maintenus à écart constant et si possible supérieur à 4 cm pendant les mesures dans le béton pour éliminer leurs influences. Cette étude montre aussi que la capacité augmente proportionnellement à la longueur des câbles utilisés.

Enfin, dans le but d'éviter le couplage entre les câbles il faut les écarter au moins de 4 cm. Il est recommandé aussi d'utiliser la longueur minimale de câbles dans une mesure capacitive. Finalement, la possibilité de remplacer le PVC par un autre matériau moins parasite sera une des solutions pour réduire les capacitances parasites induites. Une validation numérique des effets des câbles sera aussi une perspective dans les prochains travaux.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche pour le financement du projet ANR-2020-CE22-0015 SCanING.

## REFERENCES

Alhaji, M A. (2020). Inversion conjointe de mesures non destructives pour l'évaluation des gradients de degré de saturation dans le béton d'enrobage des structures, *PhD thesis*, École centrale de Nantes, IFSTTAR Nantes, France,275.

Alhaji, 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 JP., Delepine-Lesoille S., Cottineau LM., Villain G., Design and Validation of a Multi-Electrode Embedded Sensor to Monitor Resistivity Profiles over Depth in Concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 223, 30 October 2019, pp. 310-321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.226> .

Balayssac, J. P., Garnier, V. (Eds.). (2017). Non-destructive testing and evaluation of civil engineering structures. *ISTE Press - Elsevier*, London, United Kindom.

Bässler, R., Mietz, J., Raupach, M., Klinghoffer, O. (2000). Corrosion Monitoring sensors for durability assessment of reinforced concrete structures. *International Society for Optical Engineering (SPIE 2000)*, 20-26 January 2000, Newport Beach, California, United States.  
[http://smart.ramboll.dk/smart\\_eu/publications/corrosion%20monitoring%20sensors%20for%20material%20week%202000.pdf](http://smart.ramboll.dk/smart_eu/publications/corrosion%20monitoring%20sensors%20for%20material%20week%202000.pdf).

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>

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>



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>

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>

Ibrahim, H., Villain, G., Balayssac, J.P., Dérobot, X., Lopes, S.P., Devie, T. (2022). Calibration procedure for the development of an embedded capacitive sensor, *le congrès français de mécanique CFM*, Nantes, France, 7

Ibrahim, H., Villain, G., Ranaivomanana, N., Dérobot, X., Lopes, S.P., Fauchard, C., Guihard, V., Balayssac, J.P. (2023). Calibration process of a capacitive probe for monitoring of reinforced concrete nuclear structures, *International Conference on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications*, Espoo, Finland, 8

Ibrahim, H. (2020). Conception d'une sonde de mesure capacitive et résistive pour le monitoring du béton, Rapport de stage de Master 2, Ecole Centrale Nantes, Université Gustave Eiffel, France, 79.

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)

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>

Villain, G., Balayssac, J.-P., Garnier, V., Sbartai, M., Yven, B., Hénault, J.-M., Dérobot, X., Chaix, J.-F., Le Cam, V., Palma Lopes, S., 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>