
Développement d'un nouveau capteur électromagnétique pour l'END en temps réel et in situ des ouvrages en béton

Sylvain Dufau¹, Mehdi Sbartai¹, François Demontoux²

¹I2M Université de Bordeaux

²IMS Université de Bordeaux

RESUME Ce travail vise à développer des nouveaux outils pour qualifier des bétons à des taux d'humidité et de chlorures variables à travers la conception et la caractérisation de capteurs optimisés pour un déploiement dans des zones à forte contrainte d'accessibilité sur ouvrages. L'objectif dans un premier temps est de comprendre les mécanismes d'interaction du capteur avec le milieu par des simulations numériques en vue d'une conception de capteurs électromagnétiques (antennes) répondant aux exigences du suivi et de la maintenance prédictive des ouvrages en béton. Dans le cadre de cette étude, les simulations numériques dans le domaine fréquentiel et temporel nous ont permis de caractériser des antennes planaires directionnelles. L'objectif est de les comparer et les optimiser, ainsi que de générer des données réutilisables pour constituer une base de données avec un objectif d'évaluer les indicateurs de durabilité des bétons dans un contexte de maintenance prédictive des structures en béton armé.

Mots-clef CND, SHM, antenne, incertitude, capteur

Key-words NDT, SHM, antenna, uncertainty, sensor

I. INTRODUCTION

L'optimisation de la stratégie de maintenance des ouvrages en béton requiert le développement de systèmes et de méthodes comme celles du contrôle non destructif (CND) ou du monitoring (SHM) [Larbi and al., 2004]. Elle s'inscrit dans un contexte de développement d'une approche systémique pour le suivi et le diagnostic des structures en béton. La 1^{ère} étapes est l'inversion des données observables tirées de la mesure par capteurs pour remonter aux indicateurs de performance et de durabilité (c-à-d module d'élasticité, la teneur en eau/saturation...). Les progrès dans le domaine ont permis de conclure que la combinaison des observables pourrait grandement aider à la précision desdits indicateurs [Sbartai and al., 2012] avec des méthodes permettant la représentation de l'incertain et de la fiabilité des indicateurs [Villain and al., 2006]. Il a été montré également que le couplage des mesures CND et leur inversion permet d'évaluer la variabilité spatiale des béton [Nguyen and al., 2014] ainsi que l'incertitude sur cette évaluation.

Dans cet article, nous nous intéressons en particulier au développement de capteurs électromagnétiques (antennes) hautes fréquences (HF) de petites dimensions (de l'ordre du centimètre) et à large bande pour un déploiement en zone à forte contrainte d'accessibilité. L'objectif est de permettre, entre autre, une meilleure évaluation de l'humidité des bétons. Pour cela, il est important d'optimiser la géométrie des antennes (taille, forme, rayonnement) pour des mesures plus fiables. La bande passante doit être élargie pour permettre la mesure dans le domaine temporel.

Dans la littérature, il existe plusieurs études sur la conception et la caractérisation d'antennes. D'après [Niang and al., 2017] de nombreuses techniques peuvent améliorer les performances et réduire la taille des capteurs comme introduire des fentes et méandre, utiliser des matériaux magnéto-diélectrique etc... Pour optimiser les performances des antennes, une étude numérique est nécessaire avant de réaliser toute fabrication de ces capteurs. Dans notre étude, la simulation numérique nous a permis, en outre, de représenter le lien entre géométrie et performances, ainsi que les relations entre les observables physiques (vitesse, atténuation) et les indicateurs de durabilité des bétons.

II. SIMULATION NUMERIQUE

Une antenne similaire à une Vivaldi inversée (4x4cm) a été modélisée à l'aide de l'outil de simulation électromagnétique de la société ANSYS. La simulation nous a permis de caractériser l'antenne en exprimant ses coefficients de réflexion et de transmission et ses diagrammes de rayonnement dans différents plans. L'expérience a montré un pic d'amplitude importante au voisinage de 8,6 GHz sur S11dB (Fig.1). En simulation sur ANSYS, nous avons retrouvé des résultats similaires. Sur celle-ci, on retrouve un pic à 8,6 GHz si le substrat et la gaine du connecteur ont une valeur de permittivité respectivement à 6 et 1 ou à 2,5 et 0,5. On remarque aussi que la permittivité de la gaine influe sur l'intensité des pics. Les graphiques simulation/expérimental montrent une bonne similitude après ajustement des paramètres d'influence. Ces résultats sont encourageants pour valider la pertinence de la simulation numérique dans le processus de miniaturisation de l'antenne. Ils confirment la nature large bande de l'antenne. En comparaison, une antenne patch n'aura que deux fréquences de résonance très sélectives en dessous de -3dB. C'est donc une très bonne antenne en termes d'adaptation.

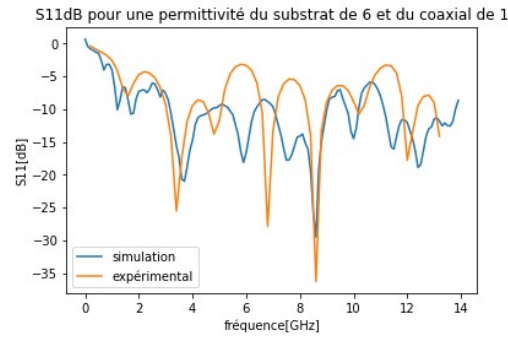


FIGURE 1. Coefficient de réflexion S11dB en fonction de la fréquence, à l'aide d'un montage expérimental et à l'aide de la simulation numérique

Nous avons aussi conduit une analyse en transmission pour la propagation de l'onde dans l'air. Deux antennes avec les mêmes caractéristiques ont été modélisées dans l'air. La résolution a été réalisée par la méthode des éléments finis. La simulation a montré des valeurs cohérentes de la vitesse de propagation qui est de l'ordre de 30 cm/ns. Pour la validation des simulations par l'expérience, deux antennes ont été testées en transmission à des distances variables dans l'air. Les mesures ont été réalisées dans le domaine fréquentiel avec un analyseur de réseau vectoriel (VNA) à des fréquences de 0,3-10 GHz. Une transformée de Fourier inverse a été implémentée sur python pour représenter la réponse de l'antenne dans le domaine temporel (Fig.2).

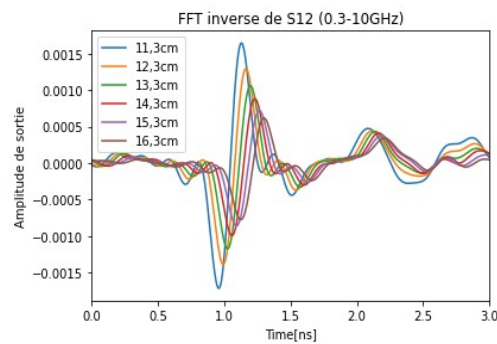


FIGURE 2. Transformée de Fourier inverse du coefficient S12 en transmission pour deux antennes à 11,3cm ; 12,3cm ; 13,3cm ; 14,3cm et 15,3cm de l'émetteur dans l'air

La réponse totale de la transformée est représentée en Δt car le moment de déclenchement des signaux n'est pas connu avec précision, c'est donc le décalage temporel qui a été analysé. Ce décalage temporel a permis d'extraire des maximums des signaux (figure 2). Nous notons également une atténuation exponentielle des signaux en fonction de la distance. Il est important de noter que les signaux sont faiblement bruités et restent exploitables à une distance jusqu'à

20cm dans l'air. La connaissance des distances entre les positions du récepteur sur les Δt permet de calculer la vitesse de l'onde dans l'air évaluée avec les incertitudes à 5% de risque à 29,7 cm/ns

III. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cette étude, les simulations ont montré un comportement de l'antenne en large bande avec des fréquences de résonance à 3,8 ; 7 et 8,6 GHz. Les simulations réalisées en temporel ont montré un comportement similaire sur l'antenne et une vitesse cohérente de l'ordre de 30 cm/ns. Nous avons donc réussi à simuler le comportement de l'antenne en 3D dans un milieu homogène.

En perspective, d'autres antennes seront simulées et testées expérimentalement notamment pour encore réduire la taille qui est aujourd'hui de l'ordre de 4x4cm. La construction d'abaques permettra ensuite d'inverser les mesures expérimentales afin de faire le lien entre les observables (teneur en eau par exemple) et les indicateurs. Il sera également possible d'étudier la variabilité spatiale du béton avec des simulations dans un milieu hétérogène. Elles permettront d'évaluer l'effet des granulats sur la propagation et l'effet sur les incertitudes associées aux mesures.

REFERENCES

Balayssac, J., Garnier, V. (2018). Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures, *ISTE Press*.

Budania, J., Sharma, M., Yadav, R., Dhara, R. (2020). Characteristic Mode Analysis and Design of Broadband Circularly Polarized CPW-Fed Compact Printed Square Slot Antenna, *Progress In Electromagnetics Research M* 94:105-118 <https://doi.org/10.2528/PIERM20051206>

Larbi, J., Modry, S., Katayama, T., Blight, G., Ballin, Y. (2014). Guide to diagnosis and appraisal of AAR damage in concrete structures: the Rilem TC 191-ARP approach, RILEM/TC ARP/04/17, *11th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete*

Niang, A. (2017). Antennes miniatures et structures électromagnétiques à circuits non-Foster, Matériaux. *Université Paris Saclay (ComUE)*. <https://theses.hal.science/tel-01592576>

Nguyen, N. (2014). Évaluation non destructive des structures en béton armé, étude de la variabilité spatiale et de la combinaison des techniques, 34-66. <https://theses.hal.science/tel-01194787>

Villain, G., Thiéry, M. (2006). Incertitude des mesures par gammadensimétrie sur des éprouvettes en béton, *Bulletin des laboratoires des Poids et Chaussées* – 260. Réf. NT 4574 – PP. 69-82

Sbartai, M., Breyse, D., Larget, M., Balayssac, J. (2012) Combining NDT techniques for improved evaluation of concrete properties., 34(6), 725-733. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.03.005>