

# Contrôle et évaluation in-situ des ouvrages en béton par spectrométrie diélectrique micro-ondes

François Demontoux<sup>1</sup>, Zoubir Mehdi Sbartaï<sup>2</sup>, Thomas Couppey<sup>1</sup>, Yifan Wang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de l'intégration, du matériau au système (IMS)

Institut polytechnique de Bordeaux, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5218, Université de Bordeaux (Bordeaux, France)

33405 TALENCE CEDEX - France

<sup>2</sup>I2M - GCE, UMR 5295 (Université de Bordeaux)

Université de Bordeaux

351 cours de la Libération, 33405 TALENCE Cedex - France

**RESUME** La spectrométrie diélectrique est une technique de mesure permettant de mesurer la permittivité d'un matériau en fonction de la fréquence. A partir de la mesure de la permittivité il est possible d'obtenir d'autres grandeurs telles que l'humidité, la salinité ou la densité. La mesure sur une plage de fréquence suffisante (100MHz à 3GHz) permet le traitement des données afin d'obtenir la réponse temporelle du matériau à une excitation par un pulse électromagnétique. Dans ce cas il est possible de détecter et d'analyser des défauts dans le matériau. Nous avons développé une instrumentation qui permet d'effectuer des mesures in-situ. Tous les instruments placés sur un site sont en réseau et s'échangent les informations. Une application nous permet, depuis un ordinateur connecté à internet, de récupérer les données et de les visualiser dans le domaine fréquentiel ou temporel. Afin de pouvoir déployer ces instruments nous avons travaillé à la réduction des coûts qui, actuellement ne dépassent pas les 700 euros. Des premiers résultats de campagnes de mesures in-situ de structures bétons sont présentées.

**Mots-clefs** : CND, in-situ, temps réel, béton, spectrométrie diélectrique

## I. INTRODUCTION

L'analyse in-situ par CND (i.e. Contrôle Non Destructif) des structures en béton est un enjeu important du génie civil. La spectrométrie diélectrique est une technique de mesure permettant de mesurer la permittivité, propriété vis-à-vis du champ électrique, d'un matériau en fonction de la fréquence. A partir de la mesure de la permittivité il est possible d'obtenir d'autres grandeurs telles que l'humidité, la salinité ou la densité. Une des limitations de cette technique est le coût du matériel nécessaire. L'élément essentiel est un analyseur de réseau vectoriel qui permet de générer les ondes électromagnétiques (i.e. EM) et de récupérer des paramètres spécifiques (i.e. éléments de la matrice S). Il existe dans le commerce des équipements permettant d'effectuer des mesures

sur site. Ces derniers nécessitent souvent un ordinateur portable pour commander les mesures. Il faut, de plus, disposer d'un applicateur (sonde ou antenne) qui est l'élément permettant de générer les ondes EM et de récolter la réponse EM de la structure. Le prix de ces systèmes de mesure dépasse ainsi 6000 euros et peut atteindre 20000 euros en fonction des options disponibles (mesures en fréquentiel, mesures en temporel, réflexion, transmission, connectivité, autonomie...). Nous avons travaillé à la conception d'un instrument *low-cost* permettant d'être déployé à grande échelle.

## II. PRESENTATION DE L'INSTRUMENT ET PREMIERS RESULTATS

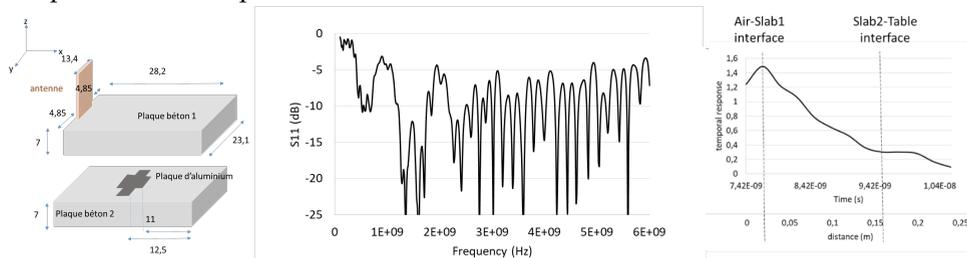
### A. Architecture de l'instrument

L'instrument comprend un analyseur de réseau vectoriel 2 ports fonctionnant entre 100 MHz et 3GHz. Une carte de commande électronique permet de générer les fréquences des ondes incidentes en mode *step frequency*. Nous pouvons effectuer des mesures des coefficients S11 et S21 en module et en phase. La carte de commande permet de sauvegarder les données sur une carte SD 16Go et de transmettre les mesures par liaisons Hertzienne Wifi, 4G ou Sigfox. Dans ce dernier cas seul une synthèse des données peut être transmise en raison du faible débit, de la taille et du nombre de trames disponibles. Le système peut être alimenté sur secteur ou par batterie. Concernant ce dernier point, des travaux sont en cours pour limiter la consommation du système et permettre son autonomie énergétique avec un panneau solaire couplé à une carte électronique *Solar Power Manager - Sun Flower*. La mesure sur une plage de fréquence suffisante permet le traitement des données (FFT inverse) afin d'obtenir la réponse temporelle du matériau à une excitation par un pulse EM radar. Dans ce cas il est possible de détecter et d'analyser des défauts dans le matériau en analysant les échos radar réfléchis. Le déplacement de l'instrument de mesure permet de scanner successivement en profondeur plusieurs endroits du matériau et de reconstruire une coupe 2D de la structure (B scan). Le choix de la fréquence d'étude est primordial afin de garantir une bonne profondeur d'auscultation et la bonne inversion des données pour obtenir les paramètres physiques désirés d'un matériau considéré. Dans notre cas nous souhaitons accéder à l'humidité, la densité et la salinité des bétons sur une profondeur pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres. La bande de fréquence optimale choisie va de 100MHz à 3GHz. L'instrumentation nécessaire pour mettre en œuvre cette technique de mesure, s'inspirant du GPR, repose sur un analyseur de réseau vectoriel et un capteur/applicateur. Ce dernier est une antenne permettant d'émettre les ondes EM et de récolter la réponse du matériau. Cette antenne a été conçue pour fonctionner sur la bande de fréquence souhaitée. L'instrumentation que nous avons développée permet d'effectuer des mesures in-situ. Tous les instruments placés sur un site sont en réseau et s'échangent les informations. L'un d'eux a une fonctionnalité *hotspot* c'est-à-dire qu'il peut stocker les informations récoltées et les envoyer vers un cloud internet via une liaison Ethernet, wifi ou 4G. Une application que nous avons développée nous permet depuis un ordinateur connecté à internet de récupérer en direct les données et de les visualiser dans le domaine fréquentiel ou temporel. Afin de pouvoir déployer ces instruments nous avons travaillé à la réduction des coûts. Actuellement le coût d'un instrument ne dépasse pas 700 euros. Des travaux de conception d'une nouvelle carte électronique nous permettront de réduire de 300 euros le coût d'un instrument.

## B. Résultats

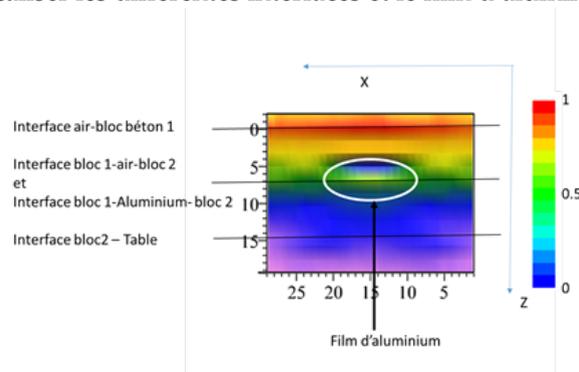
### 1. Essais en laboratoire

Un film, d'aluminium (épaisseur 0.02 mm) a été placé entre deux plaques de béton de 7 cm d'épaisseur afin de créer un écho radar. Le système ainsi constitué comprend plusieurs interfaces que les essais en laboratoire avaient pour but de détecter. En particulier, il y a une mince couche d'air entre les deux blocs de béton en raison de leur rugosité. L'antenne a été déplacée tout les 1 cm suivant la direction de l'axe X, en milieu de bloc. Pour chaque position nous avons relevé la réponse fréquentielle et temporelle de la structure.



**FIGURE 1.** Exemple de mesures fréquentielles et temporelles

En cumulant les relevés nous avons pu reconstituer le graphe ci-dessous. Sur ce dernier nous pouvons identifier et localiser les différentes interfaces et le film d'aluminium.

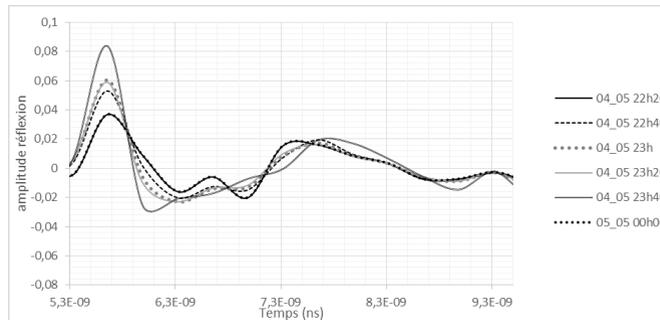


**FIGURE 2.** B scan

### 2. Essais in-situ

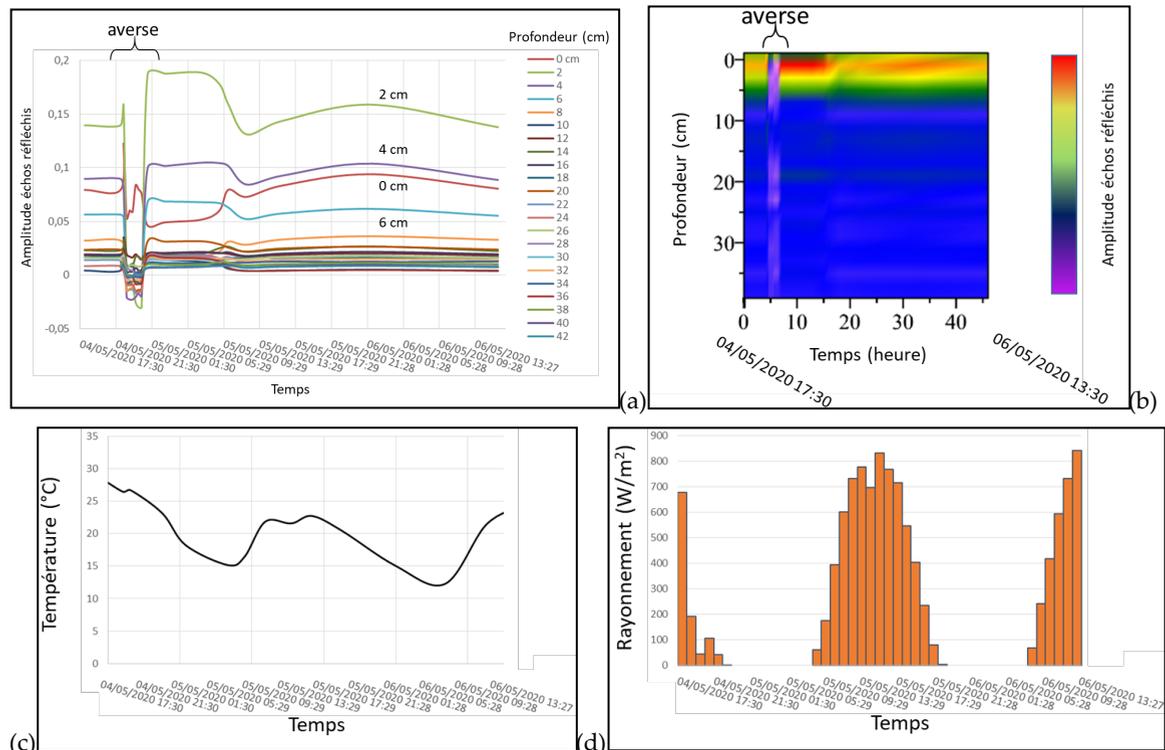
Les essais présentés ont été effectués sur une dalle en béton de 7 cm d'épaisseur posée sur le sol. Ce dernier est constitué sur ses premiers horizons d'un sol limono-argileux (environ 30 cm) puis d'un sol argileux. La figure 3 présente des résultats de la réponse temporelle de la structure à une excitation électromagnétique sur une durée d'1h40. Cette période a été choisie en raison des modifications apportées à la structure en raison de la météo. Le site a subi une averse à 22h30 (0,4 mm d'eau sur 1h) puis l'averse s'est amplifiée à 23h30 (2,4 mm sur 15mn) puis elle s'est arrêtée. Les courbes permettent de mettre en évidence la première réflexion à l'interface air/béton (5,7 ns). Son amplitude augmente avec l'humidité due à l'augmentation de la permittivité du béton. Un deuxième pic apparaît sur béton sec (6,7ns, soit 1 ns du premier écho, c'est à dire à environ 7 cm de profondeur) dû à la réflexion béton/sol. Dès que le béton s'humidifie, sa permittivité se rapproche de celle du sol renfermant une humidité résiduelle et l'écho de la réflexion disparaît. Un troisième écho est présent (7,3 ns). Cet écho provient de la différence de permittivité entre le

sol limono argileux en profondeur humide (il est placé sur un sol argileux retenant l'humidité) et le sol argilo limoneux en surface plus sec. L'apport en eau de l'averse observée ne modifie que très peu cet écho en raison de la faible pénétration de l'eau à travers le béton (ruissellement) par rapport à un sol nu.



**FIGURE 3.** Mesure temporelle sur dalle béton

Les données de la figure 3 sont présentées en fonction du temps de propagation. La vitesse de propagation étant fonction de la permittivité du milieu, une estimation d'une permittivité moyenne globale de la structure permet d'effectuer une estimation de la distance parcourue par l'écho et donc la détermination de la profondeur de son origine. Il est ainsi possible de récupérer les échos radar de la structure à différentes profondeurs ( $\epsilon_r=6$ ) en fonction de la durée d'observation. La mesure temporelle de la figure 4a correspond à la mesure de la réponse de la structure à une impulsion radar observée entre le 04 mai 2020 (17h30) et le 06 mai 2020 (13h30). La figure 4a présente donc les différents échos avant, pendant et après l'averse.



**FIGURE 4.** (a) Echos radar de la dalle béton vs temps, (b) Echos radar vs temps vs profondeur ; (c) Température vs temps, (d) Rayonnement vs temps

Sur la figure 4a les effets de l'averse sur les échos radar sont facilement observables. De nombreuses informations peuvent être tirées de ce graphe ; en particulier il y a, après l'averse (04/04/2020 ~23h00), un très fort écho en surface de la dalle en raison du fort apport d'eau. Il faudra attendre le lendemain (05/05/2020 ~12h00) et l'augmentation de la température et de l'ensoleillement pour que la surface de la dalle sèche et que l'écho radar diminue. La situation initiale (profils d'échos quasiment identique à celui du 04/04/2020 17h30) est retrouvée le 06/05/2020 vers 13h00.

Les données ont été agrégées pour obtenir la figure 4b représentant les échos en fonction de la profondeur et de la durée d'observation.

### III. CONCLUSION

L'instrument développé permet des mesures en continu *in-situ* et son coût permet un déploiement massif. Notre prochaine étape va consister à développer un algorithme afin d'associer aux données récoltées des profils de permittivité en fonction de la profondeur. Ces données de permittivité pourront être associées à d'autres propriétés telles que l'humidité ou la salinité.

### REFERENCES

F. Demontoux, G. Yaakoubi, G. Wigneron, M. Grzeskowiak, M. Sbartai, L. Fadel, G. Ruffié, F. Bonnaudin, L. Oyhenart, V. Vignéras, JP Wigneron, L. Villard, T. Le Toan, Y. Kerr, (2019) Antipodal Vivaldi antennas dedicated to in-situ broadband microwave permittivity measurements  
EUMCE 2019 Prague, République Tchèque, 13-15 May 2019

Tc. Mai, Zm. Sbartai, F. Demontoux, F. Bos (2014)  
Développement d'un outil d'évaluation non destructive des bétons par ondes EM – simulations numériques et expérimentations,  
dans actes *Congrès DIAGNOBETON* Toulouse, France, 19 & 20 mars 2014

Z. Sbartai, C. Mai, F. Bos, S. Razafindratsima, F. Demontoux, (2014)  
Non destructive evaluation of timber structures using GPR technique,  
In: *15th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2014)*, Brussels, Belgium, June 30 - July 4 2014, 2014.

Martínez-Sala R, Rodríguez-Abad I, Diez Barra R, Capuz-Lladro R. (2013)  
Assessment of the dielectric anisotropy in timber using the nondestructive GPR technique.  
*Construct Build Mater* 2013;38:903–11.

Jiawen Sun ; Liuge Du ; Wanshun Jiang (2015)  
Design of ultra-wideband antipodal Vivaldi antenna for target RCS imaging  
2015 *IEEE International Wireless Symposium (IWS 2015)*