

Multidiffusion des ondes GPR dans le béton : simulation et expérimentation

T. Ferdiansyah¹, S. Razafindratsima¹, J.P. Balayssac¹, M. Sbartai², V. Garnier³, C. Payan³, S. Rakotonarivo³, B. Yven⁴

¹Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, INSA, UPS, France

²I2M, Université de Bordeaux, France

³LMA, Université Aix-Marseille, France

⁴Andra, Chatenay-Malabry, France

RESUME Cette communication présente les résultats obtenus au cours du projet ANR DCND. L'objectif est de mettre en évidence la multidiffusion des ondes GPR dans le béton et de proposer des méthodes d'exploitation de ce phénomène pour la caractérisation de l'état du matériau, comme cela est fait avec les ondes ultrasonores. Les effets de la multidiffusion sont d'abord mis en évidence par le biais de simulations numériques réalisées avec le logiciel GPRmax. Les résultats numériques révèlent bien l'apparition d'ondes incohérentes lorsque la taille des granulats augmente et que la longueur d'onde diminue et sur ces signaux la technique dite d'interférométrie de la coda (CWI) utilisée pour les ondes US permet de détecter de très faibles variations de la permittivité de la matrice cimentaire. Des essais avec un GPR impulsif sur des corps d'épreuve réels avec des inclusions de différentes tailles révèlent que l'interférométrie permet de suivre le séchage du béton, avec une sensibilité beaucoup plus importante que celle obtenue sur la variation d'atténuation de l'onde cohérente.

Mots-clefs onde cohérente, onde incohérente, inclusions, interférométrie, END, béton

I. INTRODUCTION

Le géoradar ou GPR est un moyen d'évaluation non destructive désormais largement répandu pour l'auscultation des structures de Génie Civil (Balayssac et Garnier, 2018), essentiellement pour de l'imagerie. Mais le GPR peut également être utilisé pour la caractérisation de la teneur en eau du béton (Laurens et al, 2002 ; Klysz et Balayssac, 2007). Cette sensibilité des ondes radar à la teneur en eau n'est toutefois pas suffisante pour détecter de faibles variations d'humidité. Dans le cadre du projet DCND qui visait à explorer de nouveaux paradigmes pour l'évaluation des ouvrages de Génie Civil nous avons cherché à exploiter la partie incohérente des signaux radar, à des fréquences entre 1 et 4 GHz, générée par les multiples réflexions sur les granulats. Pour cela nous proposons d'appliquer le principe de Coda Wave Interferometry (interférométrie de la Coda) utilisé pour les ondes ultrasonores. La sensibilité de cette technique a été testée sur des signaux simulés et sur des signaux réels. Ces derniers sont obtenus sur un corps d'épreuve utilisant des granulats de taille suffisante pour générer de la multidiffusion. Un suivi du séchage de l'échantillon en conditions naturelles depuis son état saturé permet d'analyser l'évolution des

signaux en termes d'évolution d'amplitude de l'onde cohérente d'une part et de l'interférométrie de la partie incohérente.

II. ETUDE NUMERIQUE

A. Description du modèle utilisé

Le code utilisé est gprMax un logiciel libre (code source disponible) de modélisation GPR par la méthode des différences finies dans le domaine temporel (Warren et al., 2016). Il a permis de modéliser la multidiffusion d'une onde Radar à la fréquence de 2.6GHz et 4GHz dans une structure béton dont les caractéristiques sont présentées sur la figure 1. La matrice, composée de ciment, de sable et d'eau, sera caractérisée vis-à-vis de la propagation des ondes électromagnétiques par une valeur de la partie réelle de la permittivité relative. Deux gammes de dimensions de granulats inclus dans la matrice sont considérées soit de 5 à 20 mm (petits granulats par la suite) soit de 20 à 40 mm (granulats moyens). Une configuration de mesure en transmission est considérée avec l'émetteur et le récepteur placés comme indiqué sur la figure 1. La source électromagnétique utilisée est un dipôle hertzien représenté par une densité électrique polarisée dans la direction perpendiculaire au plan de la Figure 1. Une forme d'onde Ricker est associée à la source. Deux ondes ont été générées à des fréquences de 2.6 et 4 GHz (Razafindratsima et al., 2018).

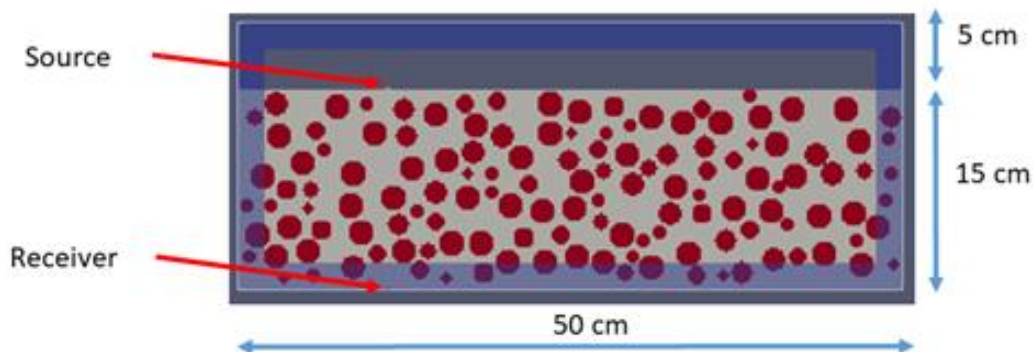


FIGURE 1. Modèle utilisé

B. Exploitation de l'interférométrie de la partie incohérente du signal

Le principe de l'interférométrie consiste à évaluer, dans la partie incohérente du signal, le décalage de temps CC entre les signaux en déplaçant une petite fenêtre temporelle de longueur T le long du signal incohérent, par une inter corrélation. L'écart de temps δt qui maximise CC à l'intérieur de la fenêtre temporelle est corrélé à la position t de la fenêtre temporelle. Le changement de vitesse relative $\frac{dV}{V}$ est alors déduit d'une régression linéaire entre δt et t à l'intérieur de la partie incohérente du signal.

C Résultats

Afin de tester la sensibilité de l'interférométrie de la coda (CWI), plusieurs simulations ont été effectuées en fixant la partie réelle de la permittivité des granulats à 5 et en faisant varier la permittivité de la matrice de 1% par rapport à sa valeur nominale, ceci dans une gamme de 7 à 13.

Ces deux valeurs correspondent à des teneurs en eau différentes du matériau, allant de 50% de degré de saturation (permittivité égale à 7) jusqu'à saturation totale (permittivité égale à 13), (Klysz et Balayssac, 2007)

L'influence de cette modification de la permittivité de 1% sur la forme des signaux est présentée sur la figure 2a. On remarque que la variation de 1% de la permittivité ne modifie pas la partie cohérente du signal alors qu'elle crée un déphasage dans la partie incohérente. La figure 2b permet d'observer l'effet de cette très faible perturbation pour une permittivité de la matrice variant de 7 à 13, pour les deux dimensions de granulats, aux deux fréquences utilisées dans la modélisation.

A

B

FIGURE 2. Effet d'une modification de la permittivité sur l'interférométrie de la partie incohérente des signaux GPR

On remarque à travers les courbes de la figure 2a que la faible modification de permittivité ne modifie ni l'amplitude ni la vitesse de la partie cohérente du signal. En revanche on observe nettement sur la figure 2a un décalage des signaux à la fin de la fenêtre temporelle. Sur la figure 2b on remarque que la variation de vitesse est d'autant plus importante que la permittivité de la matrice augmente ce qui peut s'expliquer par une augmentation des effets de multidiffusion dus à un contraste plus fort entre matrice et diffuseurs.

III. ETUDE EXPERIMENTALE

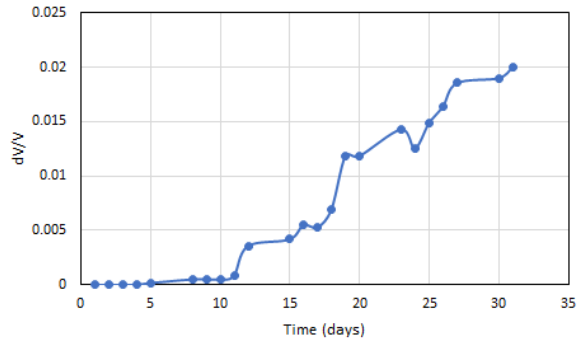
Nous ne présentons ici que les résultats obtenus sur un corps d'épreuve avec des granulats de dimension maximale égale à 40 mm. Ce corps d'épreuve de dimensions 50cm x 25cm x 20 cm a été suivi pour différentes configurations de mesure au cours de son séchage à partir d'un état saturé dans une ambiance à 20°C et une humidité relative moyenne de 65%. La figure 3 présente les configurations de mesure utilisant quatre blocs d'antennes de 1,5 et 1,6 GHz pouvant collecter des signaux en réflexion (modes E1-R1 et E3-R3) ou en transmission (modes E1-R2 et E3-R4).

FIGURE 3. configurations de mesure

Blocs d'antennes 1 et 2 puis 3 et 4 en transmission

Blocs d'antennes 1 et 3 en réflexion

Parmi les différentes configurations testées, nous présenterons uniquement les résultats les plus pertinents obtenus en mode E1-R1 c'est-à-dire lorsque les signaux sont transmis et reçus par l'émetteur et le récepteur du bloc d'antennes 1 qui sont les plus pertinents. Sur la figure 4 on peut comparer au cours du séchage de l'échantillon, l'évolution de l'amplitude de la partie cohérente du signal (Figure 4a) et l'évolution de l'accroissement de vitesse calculée à l'intérieur d'une fenêtre comprise entre 4 et 7 ns de la partie incohérente (figure 4b). On remarque qu'après 30 jours de séchage l'amplitude pic à pic de l'onde directe du signal cohérent croit seulement de 4% alors que la variation de vitesse de la partie incohérente augmente de façon très significative entre le dixième et le trentième jour de séchage.



A

b

FIGURE 4. Effet du séchage sur l'amplitude de la partie cohérente du signal et l'accroissement de vitesse de la partie incohérente du signal

IV. CONCLUSIONS

Cette étude a permis de montrer qu'il était possible d'exploiter la partie incohérente des signaux radar pour suivre avec une grande sensibilité le séchage d'un bloc de béton. Des essais complémentaires sont nécessaires pour s'assurer de la répétabilité des observables considérés.

REMERCIEMENTS

Ce travail est issu du projet DCND, financé par le Programme d'Investissement d'Avenir mis en place par le Gouvernement Français, et dont la gestion a été confiée à l'Andra.

REFERENCES

Balayssac J.P. et Garnier V. (2018), *Évaluation non destructive des ouvrages en génie civil*, ISTE éditions, Avril 2018

S. Laurens et al. (2002), Influence of concrete relative humidity on the amplitude of Ground-Penetrating Radar (GPR) signal, *Materials and Structures*, Vol.35, N°248, 2002, pp 198-203

G. Klysz, J.P. Balayssac (2007), Determination of volumetric water content of concrete using ground-penetrating radar, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, N° 8, August 2007, pp 1164-1171

Warren, C. et al. (2016), gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for ground penetrating radar. *Computer Physics Communications* 209, pp 163–170.

Razafindratsima et al. (2018), Modelling the diffusion of electromagnetic waves in concrete, *Conference GPR 2018*, 17-22 June, Rapperswill, Switzerland.