



## Partie 1 – Évaluation non destructive des matériaux

# ADAPTATION DE LA SIMULATION DE LA RÉPONSE GPR POUR L'AUSCULTATION DES INFRASTRUCTURES : APPLICATION DE LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

**SIMULATION OF GPR RESPONSE FOR INSPECTING INFRASTRUCTURE  
USING THE FINITE ELEMENT METHOD**

**Bilal FILALI<sup>(a)</sup>, Jamal RHAZI<sup>(a)</sup>, François BOONE<sup>(b)</sup>, Gérard BALLIVY<sup>(a)</sup>**

a. Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada  
b. Département de génie électrique, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada  
\* auteur correspondant : bilal.filali@usherbrooke.ca

### RÉSUMÉ

*La simulation de la réponse GPR (Ground Penetrating Radar) est un important outil analytique, mais elle est difficilement appliquée pour l'auscultation en génie civil en suivant les méthodes courantes. Une telle simulation consiste généralement à concevoir un modèle de radiation d'antenne à travers un milieu géologique ou de matériau de construction (sol, roc, béton, mortier, etc.). Son objectif est l'obtention de la réponse GPR en forme d'ondes de réflexions et de transmissions. Plusieurs méthodes sont utilisées, dont la plus commune est la méthode des Différences Finies dans le Domaine Fréquentiel (FDTD), primordiale pour les applications en géophysique, mais pour les infrastructures complexes, son calcul s'avère irrémédiablement lent et exigeant. On montre que la simulation de la réponse GPR se fait aisément suivant la méthode des éléments finis (FEM) aussi bien pour les milieux géologiques que pour ceux des infrastructures complexes. On*

*montre notamment que lorsqu'une cible dans un milieu est deux fois plus réduite, la quantité de calcul ne dépasse pas 16 %. Quelques cas pratiques sont présentés, où la réponse GPR est simulée pour des milieux aussi complexes que des dalles de béton comprenant des rangées d'armatures fines et un vide à différentes dimensions.*

### ABSTRACT

*Modeling of the GPR response (Ground Penetrating Radar) is an important analytical tool, which is hardly used for assessment in civil engineering following the current methods. In such a simulation, models are usually designed as a radiating antenna through geological or construction materials (soil, rock, concrete, mortar, etc.). The aim is to obtain the GPR response as reflection and transmission waves. Several methods are used, but the most common in geophysical applications is that of the*



*Finite Difference Time Domain, whose calculus appears to be irremediably low and demanding for complex mediums. In this paper, GPR response modeling is easily done by the finite element method (FEM), for geological mediums, as well as the complex structural ones. It is been shown in particular that when a target dimension is twice reduced in any medium, meshing refinement doesn't increase by more than 16 %. Besides, some case studies are presented for modeled complex mediums, like concrete slabs including two rows of thin steel rods and a smaller void above them.*

**Mots-clés :** Contrôle Non Destructif (CND) ; Ground Penetrating Radar (GPR) ; Réponse GPR ; Méthode des éléments finis (FEM) ; Milieux Hétérogènes et Dispersifs.

\*\*\*

## 1. INTRODUCTION

La simulation de la réponse GPR est une procédure numérique qui se fait en génie civil par la modélisation d'une impulsion radar et sa réponse (réflexion et transmission) après propagation de l'onde à travers un milieu de matériau de construction. Cette modélisation vise principalement à prévoir les équipements d'essai et les résultats expérimentaux, à développer les méthodes d'analyse, ainsi qu'à prévenir les erreurs. En génie civil, la méthode de tracé de raies et celle des différences finies dans le domaine temporel (DFTD) sont les seules appliquées pour la modélisation de la réponse GPR.

La méthode de tracé de raies [1- 2] a l'avantage de la simplicité et la rapidité de calcul, mais ne prévoit pas toutes les ondes radar, souvent importantes à étudier pour les applications en génie civil. La méthode FDTD [3] quant à elle, permet l'observation de toutes les ondes de radiation visualisées en temps réel [4-19]. Cependant, le temps de calcul suivant cette méthode s'avère considérablement long, vu son maillage carré qui s'adapte difficilement aux courbures géométriques, ce qui est très requis pour son usage en génie civil.

Dans cette étude, on démontre que la méthode des éléments finis (FEM) est la plus avantageuse pour le génie civil, vu la flexibilité de son maillage (triangulaire) permettant la modélisation de toute structure fine ou complexe sans augmentation significative du temps de calcul. Cette méthode permet également l'observation de tous les fronts d'onde. Elle fonctionne dans le domaine fréquentiel, facilitant ainsi la représentation d'un milieu dispersif. Les radargrammes dans le domaine temporel peuvent également être obtenus avec la FEM après de simples opérations.

## 2. SIMULATION PAR FEM DE LA RÉPONSE GPR

Pour le présent travail, afin d'appliquer la FEM pour simuler la réponse GPR, le logiciel COMSOL a été utilisé avant

la transformation au domaine temporel. Le maillage suivant la FEM, étant triangulaire, permet une meilleure flexibilité que celui de la FDTD, et ne cause pas des réflexions imprévisibles s'il est suffisamment raffiné en considérant la longueur d'onde radar  $\lambda$ . Le principal modèle de simulation présenté dans ce travail est un simple espace bidimensionnel (2D) vide dans lequel une antenne de 1 mm rayonne en son centre. Dans cet espace, il sera possible de rajouter n'importe quel matériau modélisé. Une fois le modèle conçu, COMSOL procède à la résolution d'équations d'onde électromagnétique aux nœuds du maillage afin de fournir les amplitudes radar à une seule fréquence GPR à la fois (voir figure 1), ce qui représente une onde stationnaire.

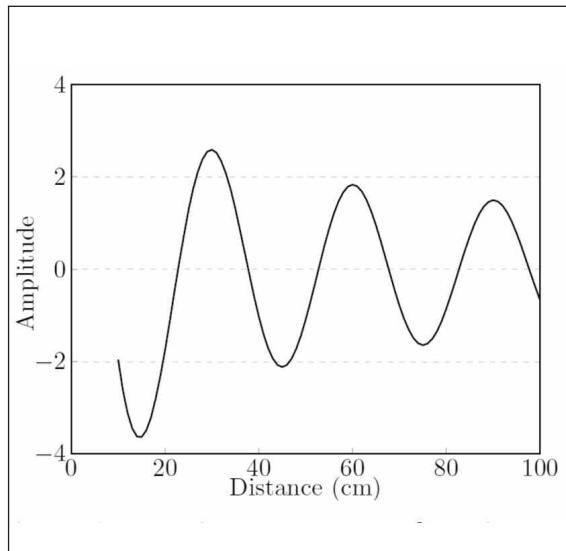
Afin d'avoir un signal temporel, le modèle doit être résolu dans une bande de fréquences équivalentes à celle d'un signal radar. Dans le cas présent, on utilise un spectre de fréquences centré à 1 GHz correspondant à un signal d'antenne radar disponible au laboratoire. Afin d'obtenir un signal temporel, la transformée de Fourier inverse est appliquée au spectre de la réponse GPR obtenu dans la bande de fréquences sélectionnée [20].

Afin d'obtenir le radargramme de la figure 2, il suffit de juxtaposer tous les signaux radar extraits sur une ligne de balayage. Pour ce faire, on résout dans un premier cas le modèle précédent en y rajoutant une plaque en métal horizontale à 40 cm sous l'antenne. Les signaux sont ensuite extraits sur une ligne horizontale à des distances de l'antenne allant de 10 cm à 90 cm successivement à un pas de 1 cm. Sur le radargramme, on observe clairement la réflexion sur la plaque en métal paraissant après l'onde directe. On note que ce radargramme est obtenu à 1 GH, bien qu'il soit possible de changer sa fréquence en associant à son spectre une bande de fréquences différente.

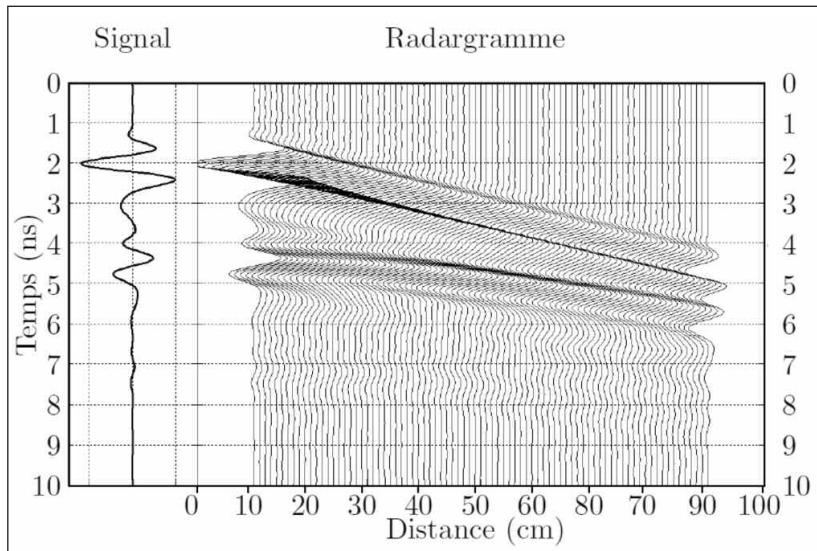
## 3. AVANTAGE DE LA FLEXIBILITÉ DU MAILLAGE

Avec cette méthode, on montre qu'afin d'avoir des résultats précis, il suffit de raffiner le maillage du modèle au tiers de la longueur d'onde ( $\frac{\lambda}{3}$ ), ce qui est la taille maximale des éléments. Pour ce faire, on modélise un vide introduit à 20 cm sous la surface d'une dalle de béton épaisse de 50 cm. L'antenne est placée sur cette surface et le vide long de 10 cm et épais de 3 cm a une forme carrée ensuite courbée (Figure 3). On impose au milieu du vide les propriétés EM d'une solution saline 30 ppm (vide rempli d'eau salée [21]).

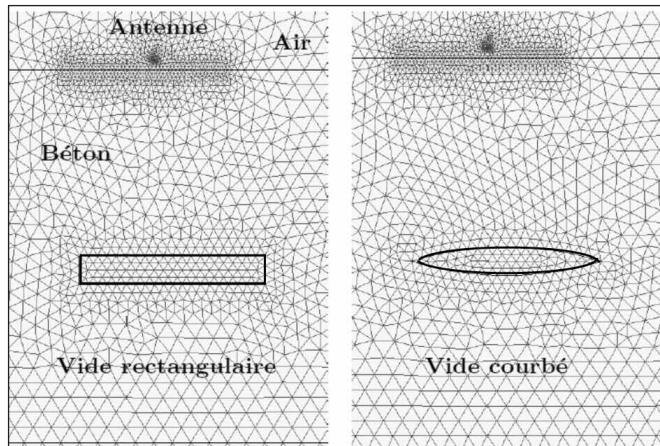
Pour les deux cas, on obtient des radargrammes aussi précis que si on double le raffinement du maillage dans le vide, ce qui montre que le maillage de ( $\frac{\lambda}{3}$ ) est suffisant pour avoir des données précises. De plus, le nombre d'éléments du modèle entier n'a pas augmenté de plus de 16 % après avoir doublé le raffinement du maillage dans le milieu du vide. On a alors un avantage important de la méthode FEM pour les modèles d'application en génie civil.



**Figure 1: Amplitude du champ électrique en fonction de la distance de l'antenne.**



**Figure 2: Radargramme pour le modèle de réflexion fait de signaux extraits aux distances de l'antenne entre 10 cm et 90 cm.**

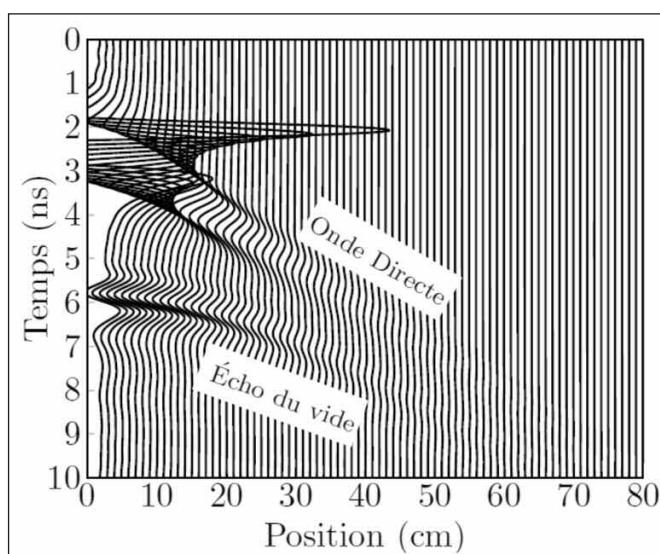


**Figure 3 : Vides rectangulaire et courbé introduits dans deux modèles de béton.**

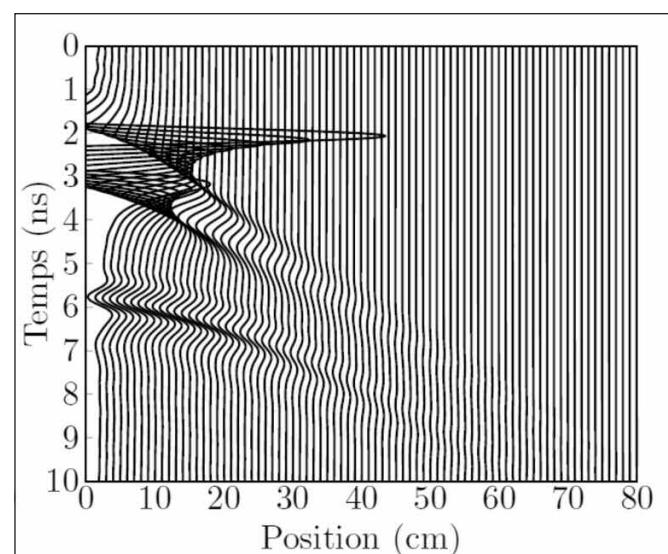
## 4. VALIDITÉ ET EXACTITUDE DE LA MÉTHODE

Afin d'appliquer la méthode FEM pour simuler la réponse GPR, on démontre sa validité pour toutes les propriétés des ondes radar. Pour cela, on procède à trois modélisations différentes pour montrer l'exactitude des données obtenues avec cette méthode, chacune vise une des trois propriétés suivantes : les temps d'arrivées, les amplitudes du signal et sa distorsion dans les milieux dispersifs.

Dans un premier cas, les temps d'arrivées dans la réponse GPR d'un modèle de simulation sont comparés à ceux des formules théoriques correspondantes [22]. On trouve des valeurs similaires pour les deux calculs, comme montré dans le radargramme de simulation dans la Figure 5. Ce dernier est obtenu en procédant à un balayage de signaux radar émis par une antenne 1 GHz, sur la surface d'un sol modélisé d'une épaisseur de 50 cm. Tous les fronts d'ondes



**Figure 4 : Radargramme pour le modèle avec un vide rectangulaire (à gauche) et courbé (à droite).**





radar prévus sont observés comme des traces qui concordent grandement avec la théorie (lignes en pointillés). Afin de montrer la fiabilité de cette méthode pour le calcul des amplitudes des signaux radar, un milieu absorbant est modélisé, dans lequel l'amplitude du signal radar est atténuée selon la valeur du coefficient d'absorption attribué à ce milieu. Les signaux extraits sont transmis à différentes distances d'une antenne 400 MHz placée au centre du milieu. On montre dans la Figure 6, les valeurs d'atténuation du signal radar en fonction de la fréquence et à différentes distances dans un milieu de permittivité  $\epsilon = 9 - j$ . Ces valeurs de l'atténuation, calculées par la normalisation des amplitudes sur les signaux dans un milieu non absorbant, s'avèrent également en grande concordance avec celles calculées par l'expression théorique ci-dessous. Cette même concordance est obtenue pour toutes les autres différentes valeurs de imposées au milieu absorbant, d'où la validité de cette méthode pour le calcul des amplitudes. L'atténuation théorique est exprimée comme :

$$\frac{Y(f)}{Y_0(f)} = \exp\left(-\frac{2\pi n''}{c} f z\right) \quad (1)$$

où  $Y(f)$  et  $Y_0(f)$  sont respectivement l'amplitude dans le milieu absorbant et non absorbant,  $n''$  et la partie imaginaire de  $\sqrt{9 - j}$  (racine de la permittivité),  $f$  est la fréquence,  $z$  est la distance de la source et  $c$  est la vitesse de la lumière. Dans le troisième cas, un milieu dispersif est modélisé afin de montrer que la forme des signaux (distorsion) ne varie qu'en fonction des propriétés imposées au milieu, et ce de manière similaire aux variations prévues par le calcul théorique. Le milieu absorbant du cas précédent est remplacé par un milieu auquel on impose une permittivité variable en fonction de la fréquence de l'onde radar (dispersion). Les signaux extraits à différentes positions sont similaires à ceux prévus théoriquement comme montré dans la Figure 7. On montre alors que cette méthode de simulation de la réponse GPR est fiable pour déduire la forme des signaux radar, tout comme elle est fiable pour déduire leur temps d'arrivée et leur amplitude. Afin de prévoir le signal dispersé théoriquement, on multiplie sa transformée de

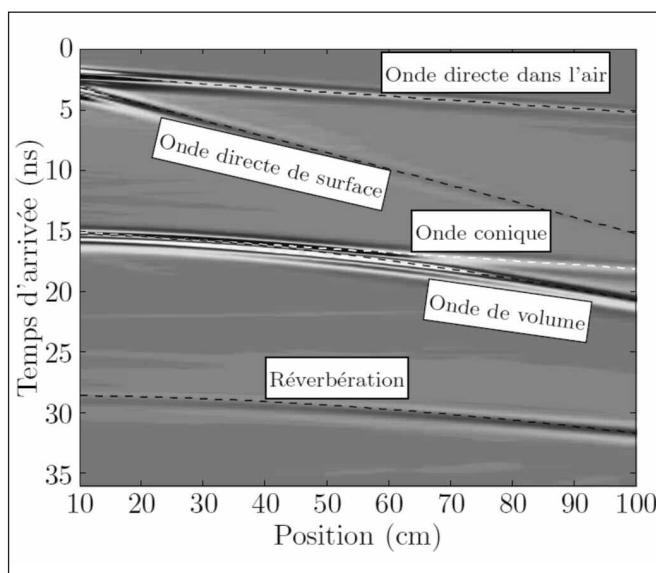


Figure 5 : Traces de radargramme pour les différentes ondes observées comparées à la théorie (courbes en pointillés).

Fourier par le facteur de phase dispersée avant de le constituer dans le domaine temporel. Cela se traduit par la multiplication par l'exponentiel complexe comme suit :

$$Y(f) = Y_0(f) \exp\left(-\frac{2\pi j f}{c} z n(f)\right)$$

où  $Y(f)$  et  $Y_0(f)$  sont les amplitudes fréquentielles des signaux dispersé et non dispersé respectivement,  $n(f) = \sqrt{18 - 0,38(f-1)}$  est l'indice de réfraction auquel on impose une variation linéaire par rapport à la fréquence  $f$  exprimée en GHz,  $z$  est la distance de trajet.

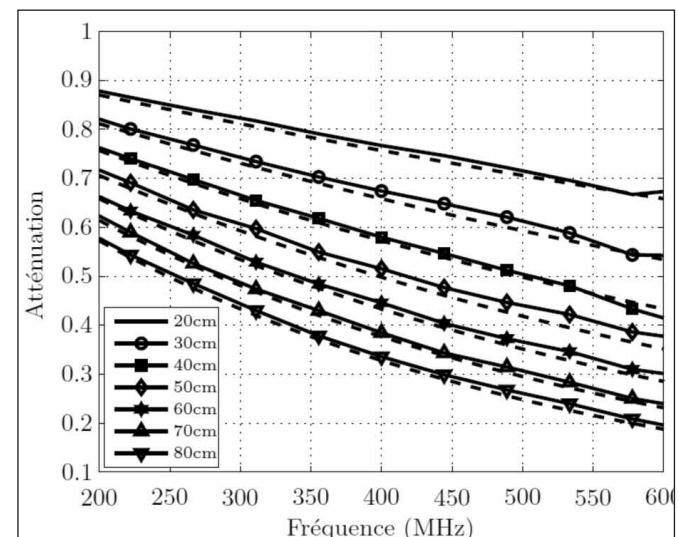


Figure 6 : Spectres d'atténuation aux différentes distances de l'antenne comparés aux courbes théoriques (en pointillés)

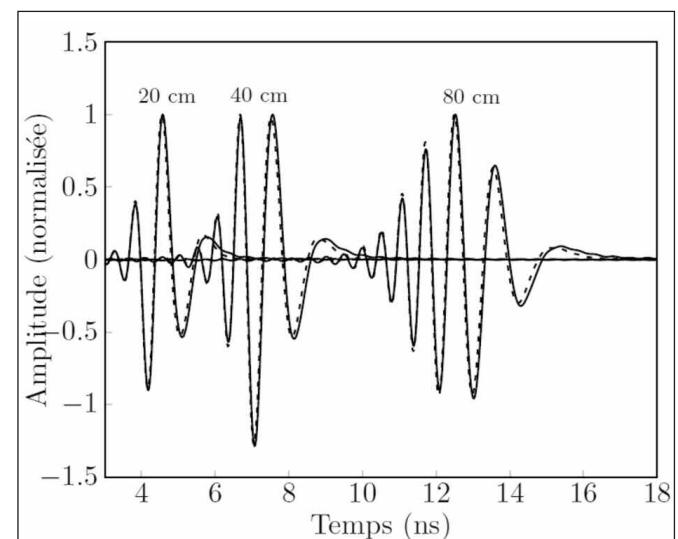


Figure 7 : Signaux dispersés extraits à différentes distances de l'antenne comparés à ceux prévus théoriquement (en pointillés)

## 5. EXEMPLE DE MODÈLE D'UNE FISSURE DANS UN BÉTON ARMÉ

Afin de mieux élucider l'avantage de la méthode FEM pour la modélisation de la réponse GPR appliquée en génie civil, un modèle plus complexe est simulé dans ce travail (Figure 8). Il s'agit d'une dalle de béton ( $\epsilon = 9 - j$ ) de

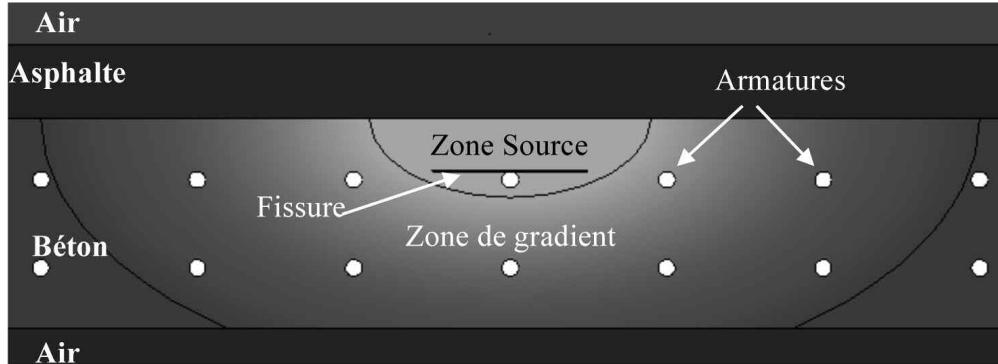


Figure 8 : Modèle d'un béton armé avec fissure dans une zone d'infiltration

20 cm d'épaisseur, sous 7 cm d'asphalte, comportant des armatures de 1,5 cm de diamètre, séparées de 15 cm et placées sous 5 cm d'enrobage en deux rangées. Une zone d'infiltration en eau et ions chlorure est modélisée dans la dalle à partir de la surface comme une zone de béton hautement infiltrée ( $\varepsilon = 12 - 3,5j$ ) entourée par une zone de transition intermédiaire avec le béton non infiltré. De plus, une fissure longue de 15 cm et ouverte de 1 mm est placée juste au-dessus de l'armature centrale, ce qui équivaut à une fissuration par corrosion du béton.

La simulation est faite pour un balayage d'antenne 1,5 GHz sur 4 m de surface de la dalle, sur laquelle, l'antenne est déplacée pour chaque extraction du signal, ce qui représente un changement de géométrie du modèle exigeant la reprise complète de la simulation pour chaque point de mesure. Le radargramme est présenté à la Figure 9, dans lequel on observe toutes les traces correspondantes aux éléments du modèle, qui sont : les armatures en métal, l'effet de la zone d'infiltration (retardement et atténuation des traces des armatures), ainsi que la fissure fine.

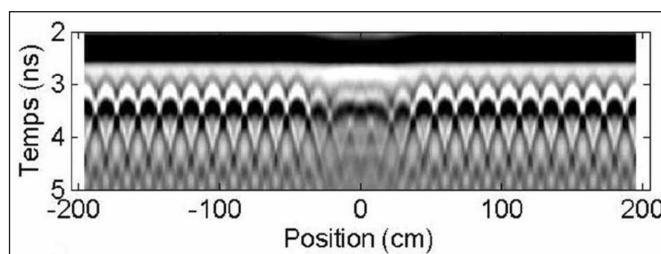


Figure 9 : Radargramme du modèle du béton armé, fissuré et infiltré.

## 6. CONCLUSION

Dans ce travail, on montre qu'il est plus avantageux d'appliquer la méthode FEM pour simuler la réponse GPR des modèles représentant des cas de génie civil. Pour ce faire, la procédure d'application de cette méthode est exposée avec toutes les étapes importantes qui suivent l'application d'un logiciel de simulation FEM. À la fin du calcul, un radargramme est obtenu, similaire à ce qui est fourni par les méthodes de simulation couramment appliquées. Afin de montrer l'avantage de cette méthode quant à son exigence en ressources informatiques, on a procédé à la modé-

lisation de vide en forme rectangulaire puis courbée dans un béton. On a montré que ce modèle requiert un maillage dont le nombre d'éléments est augmenté de près de 16 % lorsqu'on raffine doublement le milieu du vide, ce qui est relativement peu. La fiabilité de cette méthode est démontrée sur les trois propriétés des ondes radar, qui sont le temps d'arrivée, l'amplitude du signal, et sa dispersion (forme). Trois cas de simulation sont présentés correspondant à chaque propriété montrent que les valeurs de simulation sont similaires à celles calculées par les formules théoriques, et ce pour les trois propriétés. Un exemple de modélisation de béton plus complexe est présenté à l'appui, qui a été simulé avec succès en dépit de la complexité et finesse de ses éléments ainsi que du nombre de répétitions requises à cause du changement de géométrie par déplacement de l'antenne.

**Remerciements :** Ce travail de recherche a été mené dans le cadre de la Chaire industrielle du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG) sur l'auscultation des structures de béton (Université de Sherbrooke). Les auteurs remercient le CRSNG pour support financier.

## RÉFÉRENCES

- [1] M. Born, E. Wolf and A. B. Bhatia, *Principles of optics : electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*, Ed 7th edition (expanded), 1999, 924 Pages
- [2] J. Cai and G. A. McMechan, Ray-based synthesis of bistatic ground-penetrating radar profiles, *Geophysics*, Volume 60-1, 1995, Pages 87-96
- [3] K. S. Yee, Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Volume 14-1966, Pages 302-307
- [4] R. L. Roberts and J. J. Daniels, Analysis of GPR Polarization Phenomena, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Volume 1-2, 1996, Pages
- [5] T. Wang and A. C. Tripp, FDTD simulation of EM wave propagation in 3-D media, *Geophysics*, Volume 61-1, 1996, Pages 110-120
- [6] T. Bergmann, J. Robertsson and K. Holliger, Numerical Properties of Staggered Finite-Difference Solutions of Maxwell's Equations for Ground-Penetrating Radar Modeling, *Geophys. Res. Lett.*, Volume 23-1, 1996, Pages 45-48

- [7] J. M. Carcione, Ground-penetrating radar; wave theory and numerical simulation in lossy anisotropic media, *Geophysics*, Volume 61-6, 1996, Pages 1664-1677
- [8] J. R. Bourgeois and G. S. Smith, A fully three-dimensional simulation of a ground-penetrating radar: FDTD theory compared with experiment, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, Volume 34-1, 1996, Pages 36-44
- [9] F. L. Teixeira, W. C. Chew, M. Straka, M. L. Oristaglio and T. Wang, *Geoscience and Remote Sensing, 1997. IGARSS '97. Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development.*, 1997 IEEE International, à 3D PML-FDTD simulation of ground penetrating radar on dispersive Earth media, Volume 2, 3-8 Aug 1997, Pages 945-947 vol.2
- [10] F. L. Teixeira, C. Weng Cho, M. Straka, M. L. Oristaglio and T. Wang, Finite-difference time-domain simulation of ground penetrating radar on dispersive, inhomogeneous, and conductive soils, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, Volume 36-6, 1998, Pages 1928-1937
- [11] H.-W. Chen and T.-M. Huang, Finite-difference time-domain simulation of GPR data, *Journal of Applied Geophysics*, Volume 40-1-3, 1998, Pages 139-163
- [12] T. Bergmann, J. O. A. Robertsson and K. Holliger, Finite-difference modeling of electromagnetic wave propagation in dispersive and attenuating media, *Geophysics*, Volume 63-3, 1998, Pages 856-867
- [13] G. X. Fan and Q. H. Liu, *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1998. IEEE, à A PML-FDTD algorithm for general dispersive media in GPR and plasma applications*, Volume 4, 21-26 June 1998, Pages 2014-2017 vol.4
- [14] L. Gurel and U. Oguz, Three-dimensional FDTD modeling of a ground-penetrating radar, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, Volume 38-4, 2000, Pages 1513-1521
- [15] L. Gurel and U. Oguz, Simulations of ground-penetrating radars over lossy and heterogeneous grounds, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, Volume 39-6, 2001, Pages 1190-1197
- [16] K. Holliger and T. Bergmann, Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar, SPIE à Gold Coast, Australia, Finite-difference modeling of borehole georadar data, Volume 4084, Pages 836-841
- [17] K. Holliger and T. Bergmann, Numerical modeling of borehole georadar data, *Geophysics*, Volume 67-4, 2002, Pages 1249-1257
- [18] B. Lampe, K. Holliger and A. G. Green, GROUND-PENETRATING RADAR - A finite-difference time-domain simulation tool for ground-penetrating radar antennas, *Geophysics*, Volume 68-3, 2003, Pages 971-987
- [19] S. J. Radzevicius, C.-C. Chen, J. L. Peters and J. J. Daniels, Near-field dipole radiation dynamics through FDTD modeling, *Journal of Applied Geophysics*, Volume 52-2-3, 2003, Pages 75-91
- [20] W. D. Stanley, R. Dougherty and G. R. Dougherty, *Digital signal processing*, Ed 2nd, 1984, 514 Pages
- [21] A. Nyshadham, C. L. Sibbald and S. S. Stuchly, *Permittivity Measurements Using Open-Ended Sensors and Reference Liquid Calibration- an Uncertainty analysis*, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Volume 40-2, 1992, Pages 305-314
- [22] A. P. Annan, *Ground Penetrating Radar Principle, Procedures & Applications* S. S. Inc., Ed 2003, 270 Pages