

Apport de la simulation numérique à l'auscultation des ouvrages de béton

B. Filali, Ph. D., J. Rhazi, ing., Ph. D.
Auscultech inc.
Info@auscultech.com
Sherbrooke (Québec) Canada

Résumé

La simulation numérique des contrôles non destructifs des matériaux a fait ces dernières années des progrès considérables. Cette simulation permet non seulement d'accroître l'efficacité et le potentiel des méthodes de contrôle non destructif, mais aussi de prédire les résultats d'une technique donnée et définir ses conditions de mise en œuvre les plus performantes, tout en limitant les coûts de développement. L'objet de cette présentation est de montrer l'apport important de la simulation numérique en ce qui concerne l'auscultation des dalles de béton armé par la technique Géoradar. Les cas de l'infiltration de l'eau et des ions chlorures ainsi que des délaminations sont considérés.

1. Introduction

La corrosion des armatures est la principale cause de dégradation des ouvrages en béton armé, notamment les dalles des ponts et des stationnements. Cette corrosion est causée par l'infiltration de l'eau et des ions chlorures dans les dalles. La technique du Géoradar est très appliquée depuis quelques années pour évaluer la probabilité de cette corrosion des armatures dans ces dalles selon deux proches. La 1^{ère} approche considère l'atténuation de la réflexion des ondes sur les armatures supérieures alors que la 2^{ème} approche considère la réflexion des ondes sur le fond des dalles. Par ailleurs, la détection de la délamination au niveau des armatures supérieures est également effectuée selon les deux approches citées ci-dessus. L'analyse des relevés se base sur le fait que les endroits où l'on enregistre de faibles réflexions sont les endroits où la probabilité de corrosion est forte ainsi que la délamination. Le présent article tente de déterminer l'approche la plus fiable dans chacun des deux cas et ceci au moyen de la simulation numérique.

2. Principe de l'auscultation par Géoradar

La figure 1 ci-dessous illustre le principe général de la techniques Géoradar. Cela consiste à transmettre une onde électromagnétique dans le matériau investigué, et à enregistrer sa réponse à cette excitation. Le défi du contrôleur consiste alors à traiter cette réponse de manière à en extraire l'information sur le matériau.

L'onde électromagnétique transmise dans le matériau interagit avec ce matériau. Elle est affectée non seulement par les propriétés physiques et l'état d'intégrité du matériau investigué mais également par les hétérogénéités de ce matériau. Ces hétérogénéités influencent communément ou séparément les différentes propriétés de l'onde et peuvent être impossible à

identifier et évaluer si les paramètres d'essais ne sont pas pertinemment choisis. Dans tous les cas, la simulation numérique s'avère être un outil puissant permettant de prédéterminer tous les paramètres d'essai (ex. fréquence des ondes la plus pertinente, polarisation des antennes, configuration des mesures (monostatiques ou bistatiques)) et de prévoir la réponse du milieu suite à des changements dans ces propriétés physiques ou/et géométriques.

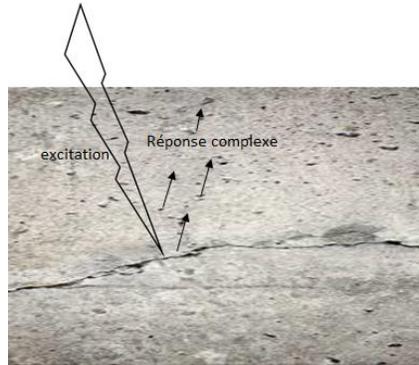


Figure 1 Principe général des techniques de CND

3. Simulation numérique des relevés Géoradar

La simulation numérique des essais Géoradar a initialement été introduite pour les applications en géophysique [1]. En effet, les relevés Géoradar pour les applications en géophysique peuvent s'avérer coûteux en temps et équipements et demandent une importante précision. La simulation numérique préliminaire des cas d'études avant les sorties in-situ est devenue pratique courante pour optimiser les relevées et prévenir la perte de ressources.

La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD : Finite Difference Time Domain) est la plus appliquée. Elle consiste à concevoir un modèle de simulation comportant tous les éléments de l'essai, puis à obtenir la réponse Géoradar sous forme de radargramme ou d'animation de la propagation d'onde à travers l'espace du modèle [2]. Plusieurs logiciels de simulation numérique disponibles sur le marché emploient cette méthode, (ex. GprMax, XFDTD).

En génie civil, la modélisation numérique est appliquée pour des modèles représentant des éléments structuraux (ex. dalles, poutres, colonnes). Il peut par exemple s'agir de mesures Géoradar sur des éléments de maçonnerie où l'on cherche généralement à détecter les anomalies à la jointure entre les briques [3]. Il peut également être question de la caractérisation structurelle de ponts via notamment la localisation et la caractérisation des armatures et joints dans les dalles des tabliers [4]. Les monuments historiques ont également été modélisés pour les mesures Géoradar pour la détection de la détérioration dans les structures en pierre [5].

4. Application à l'infiltration de l'eau et des ions chlorure dans les dalles en béton armé

4.1 Les modèles de simulation

Ce travail vise à étudier l'effet de l'infiltration d'eau et d'ions chlorure dans une dalle en béton armé sur la propagation des ondes Géoradar. Pour cela, on procède à la simulation de modèles de

béton armé infiltré d'une solution saline à différentes profondeurs à partir de la surface extrados. Le modèle représente une dalle de béton armé de 20 cm d'épaisseur recouverte d'une couche d'asphalte de 7 cm. Deux rangées d'armatures sont également introduites à l'intérieure de la dalle. La géométrie du modèle est présentée à la figure 2 qui suit.

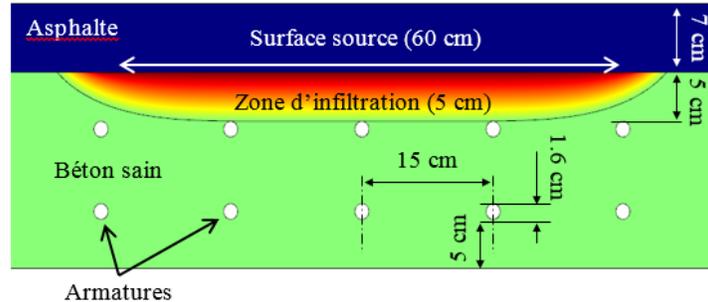


Figure 2 : Illustration du modèle d'infiltration à 5 cm de profondeur

Pour le présent travail, cinq différents modèles sont simulés correspondant aux profondeurs d'infiltration de 2.5 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm à partir de la surface (extrados), en plus d'un modèle de référence représentant une dalle sans infiltration.

La zone d'infiltration est caractérisée par une haute permittivité en assurant une transition avec le béton sain et ce sur une épaisseur de 5 cm lorsqu'il y a saturation [6]. La permittivité ϵ et la conductivité σ du béton à l'état normal et saturé sont déduites à partir de la littérature [7,8]. On a imposé, pour une fréquence de 2 GHz, une valeur de $\epsilon^x = 8$ et $\sigma = 400$ mS/m à la saturation et $\epsilon^x = 6$ et $\sigma = 100$ mS/m pour un béton sain.

La géométrie du volume infiltré est tracée en respectant la condition de pénétration à profondeur égale à partir de la surface source. Cette pénétration assure une transition aux propriétés de béton sain et s'étend sur une épaisseur de 5 cm maximum lorsqu'on a saturation à la surface. Dans le présent cas, lorsque la profondeur de pénétration totale est supérieure à l'épaisseur de transition maximale (5 cm), un volume de saturation apparaît sur une profondeur supplémentaire.

4.2 Les résultats des simulations

La Figure 3 montre le radargramme correspondant au modèle de référence (béton sain). On y distingue la réflexion à la surface du béton, des armatures supérieures et la réflexion sur le fond de la dalle. Les réflexions sur les armatures inférieures ne sont pas bien visibles car elles sont ici masquées par les armatures supérieures.

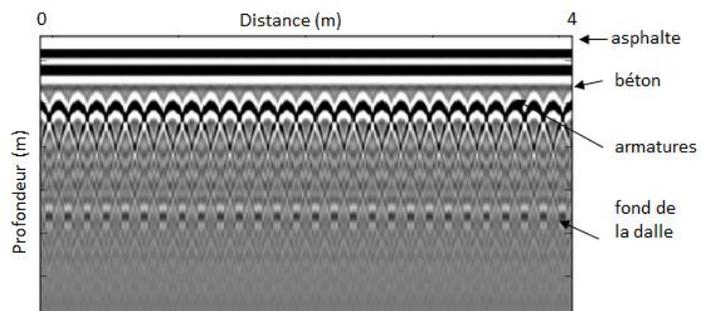


Figure 3 : Radargramme correspondant au modèle de référence

Les réflexions citées ci-dessus paraissent clairement affectées par l'infiltration de l'eau et des ions chlorure dans le béton, surtout à partir de 5 cm de profondeur (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**4c). En effet, comme la zone d'infiltration est caractérisée par de plus fortes permittivité et conductivité, elle transmet des réflexions plus retardées et atténuées. Cela se constate aussi bien sur les réflexions sur les 5 armatures centrales couvertes par la zone infiltrée que sur les réflexions sur le fond de la dalle.

Cet effet sur les réflexions affecte uniquement les échos de cibles situées dans l'infiltration. Cela apparaît clairement sur les radargrammes pour les différentes profondeurs où l'on constate que l'écho du fond de la dalle est plus affaibli lorsque l'infiltration est plus profonde, tandis que l'écho des armatures reste inchangé à partir de 10 cm de profondeur. Ces résultats indiquent donc que la réflexion des ondes Géoradar sur le fond des dalles est plus sensible à l'infiltration de l'eau et des ions chlorure dans les dalles. Cela peut être expliqué par le fait que l'onde est plus affectée par les propriétés du béton d'une épaisseur de 20 cm par rapport à un béton de recouvrement de 5 cm d'épaisseur.

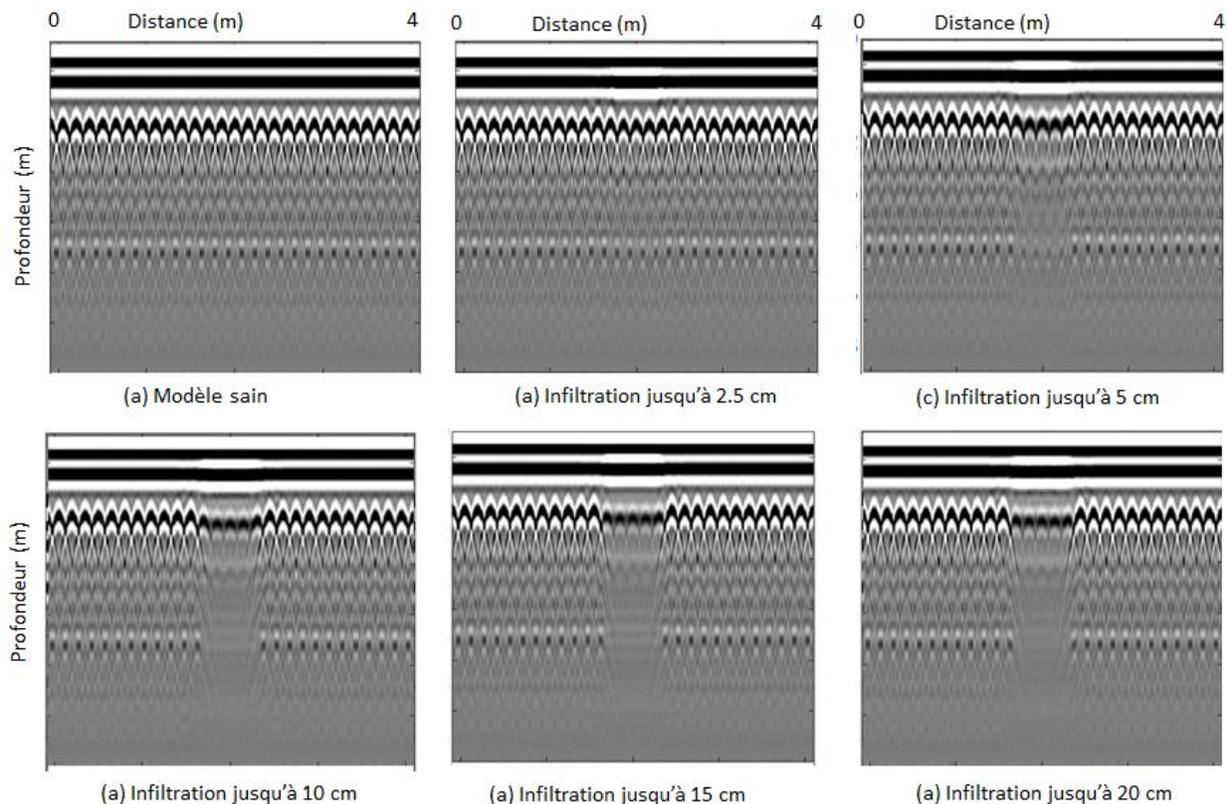


Figure 4 : Résultat des simulations numériques de l'infiltration

5. Simulation d'une délamination

La délamination dans le béton est une des anomalies les plus rencontrées qui apparaît généralement au niveau des armatures supérieures. Afin de prévoir sa détectabilité, une fissure est introduite dans un modèle de béton armé sain (sans infiltration d'eau ni d'ions chlorure). La fissure a une ouverture de 0,5 mm, une longueur de 300 mm et renferme de l'eau avec une salinité de 15 ppm, ce qui est traduit dans le modèle par un milieu de permittivité complexe

$$\varepsilon^* = 72 - 30 i.$$

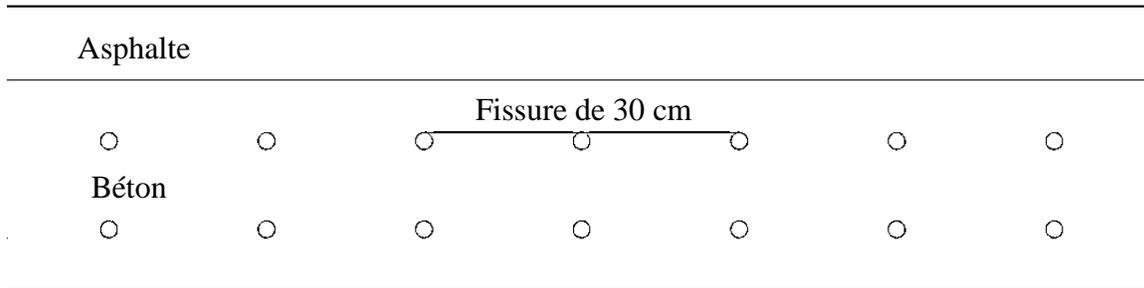


Figure 5 : Modèle de fissure dans le béton armé

Le radargramme correspondant à ce modèle de délamination (figure 6) révèle une réflexion claire correspondant à la fissure entre les trois armatures centrales. L'effet de la fissure se traduit par une distorsion significative de l'image des armatures. Ces armatures apparaissent en effet sous forme d'hyperboles bien définies lorsqu'elles sont dans un béton sain non délaminé. De plus, cette réflexion ne masque pas les échos provenant de cibles inférieures (fond de la dalle). Autrement dit, la présence de cette délamination n'a pas un grand effet sur l'intensité de la réflexion sur le fond de la dalle. Il en résulte que, dans le présent cas, l'analyse de la réflexion des ondes sur les armatures est plus informative sur la délamination du béton au niveau des armatures supérieures que l'analyse de la réflexion sur le fond des dalles.

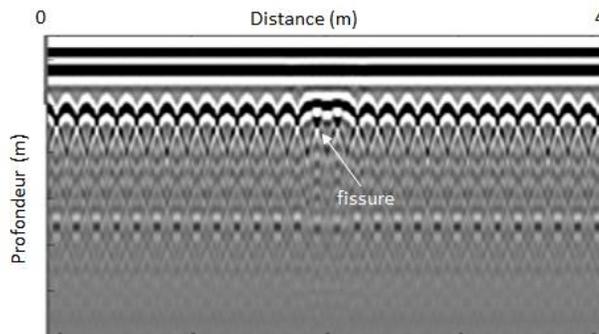


Figure 6: Résultat de la simulation à 2 GHz d'une dans le béton armé

6. Conclusions

Les simulations numériques de la propagation des ondes Géoradar présentées dans cet article indiquent qu'elles permettent d'observer clairement la détérioration du béton par infiltration de l'eau et des ions chlorure et par délamination. Il a notamment été démontré grâce ces simulations que la réflexion des ondes Géoradar sur le fond des dalles est plus sensible à l'infiltration de l'eau et des ions chlorures dans le béton que la réflexion sur les armatures. De même, il a été démontré que la détection de la délamination du béton au niveau de la rangée supérieure est plus facile en considérant la réflexion des ondes au niveau des armatures supérieures plutôt que la réflexion sur le fond des dalles.

La simulation numérique des phénomènes de propagation d'ondes dans les matériaux de construction s'avère donc utile pour la prédiction de résultats d'essais, pour optimiser les conditions d'essais, pour aider dans l'interprétation de relevés et pour le développement de nouvelles procédures d'essais.

Remerciements : Ce travail a été effectué en collaboration avec le Centre de recherche sur les infrastructures de béton (CRIB (www.lecrib.ca))

Références

- [1] Annan, A. P. (2003). *Ground Penetrating Radar Principle, Procedures & Applications* Mississauga.
- [2] Radzevicius, S. J., C.-C. Chen, J. L. Peters and J. J. Daniels (2003). "Near-field dipole radiation dynamics through FDTD modeling." *Journal of Applied Geophysics* **52**(2-3): 75-91.
- [3] Diamanti, N., A. Giannopoulos and M. C. Forde (2008). "Numerical modelling and experimental verification of GPR to investigate ring separation in brick masonry arch bridges." *NDT & E International* **41**(5): 354-363.
- [4] Belli, K., C. M. Rappaport, Z. He and S. Wadia-Fascetti (2009). "Effectiveness of 2-D and 2.5-D FDTD Ground-Penetrating Radar Modeling for Bridge-Deck Deterioration Evaluated by 3-D FDTD." *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* **47**(11): 3656-3663.
- [5] Solla, M., H. Lorenzo, F. I. Rial and A. Novo (2011). "GPR evaluation of the Roman masonry arch bridge of Lugo (Spain)." *NDT & E International* **44**(1): 8-12.
- [6] Kalogeropoulos, A., J. van der Kruk, J. Huginschmidt, J. Bikowski and E. Brühwiler (2013). "Full-waveform GPR inversion to assess chloride gradients in concrete." *NDT & E International* **57**(0): 74-84.
- [7] Halabe, U. B., A. Sotoodehnia, K. R. Maser and E. A. Kause (1993). "Modeling of the Electromagnetic Properties of Concrete." *ACI Materials Journal* **90**(6): 552-563.
- [8] Soustos, M. N., H. J. Bungey, S. G. Millard, M. R. Shaw and A. Patterson (2001). "Dielectric Properties of Concrete and their Influence on Radar Testing." *NDT & E International* **34**: 419-425.