

MODÉLISATION DE LA PROPAGATION DES ONDES RADAR DANS LES STRUCTURES EN MAÇONNERIE

R. Hamrouche^(*)(¹), J. Rhazi⁽²⁾, G. Klysz⁽¹⁾, JP Balayssac⁽¹⁾, G. Ballivy⁽²⁾,

⁽¹⁾ Université de Toulouse ; UPS, INSA ; LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions) ;

135, avenue de Rangueil ; F-31 077 Toulouse Cedex 04, France

⁽²⁾ GRAI (Groupe de Recherche en Auscultation et en Instrumentation) University of Sherbrooke

Sherbrooke (Québec) Canada J1K 2R1

^(*): corresponding author

e-mail : rhamrouc@insa-toulouse.fr

rani.hamrouche@usherbrooke.fr

Résumé

Ce travail concerne l'application du radar à l'évaluation nondestructive des structures en maçonnerie de briques pour rechercher des défauts de jointoiment en profondeur. L'objectif est d'aider les gestionnaires à mieux appréhender le volume de joints à ré-injecter dans le cas de travaux de renforcement.

Comme première approche à ce travail, un modèle numérique d'une antenne radar de 1.5 GHz de fréquence centrale est utilisé pour définir la sensibilité des ondes radar à la détection des défauts de jointoiments. Les simulations sont réalisées en configuration bi-statique séparée, c'est à dire en utilisant un émetteur et un récepteur séparés. Un algorithme spécifique de traitement des signaux simulés a été développé pour localiser les défauts. Le traitement proposé consiste à comparer les signaux réfléchis aux temps réels en supposant que chaque point de l'espace modélisé est un réflecteur. Le calcul des temps de trajet qui permet de cerner le signal correspondant à chacun des points de l'espace se fait en utilisant une valeur de vitesse estimée à partir du trajet de l'onde directe émetteur-récepteur dans le matériau. Des algorithmes permettant d'établir des tomographies de vitesse de l'onde directe ont également été développés. Une étude paramétrique mettant en œuvre ces deux algorithmes a permis de définir des limites en termes de taille, d'orientation et de profondeur du défaut recherché. Les premiers résultats expérimentaux obtenus sur un mur expérimental de maçonnerie sont prometteurs et montrent que des défauts de jointoiment peuvent être détectés en surface et en profondeur.

1. Introduction

Dans les structures en maçonneries, la dégradation du mortier de jointoiment engendre une fragilisation puis la destruction des structures. En effet, le mortier joue un rôle liant et assure la continuité entre les briques, l'altération de cette continuité constitue donc un risque pour l'ensemble de la maçonnerie. Les causes de cette dégradation peuvent être principalement mécaniques, chimiques ou biologiques.

Plusieurs techniques de contrôle non destructif sont actuellement utilisées comme la tomographie sonore/séismique, système d'impact-écho, mesures de conductivité et de résistivité, thermographie infrarouge, radar... mais peu de ces techniques ont été appliquées sur les structures en maçonnerie. Cela est d'autant plus vrai en ce qui concerne l'utilisation de la technique radar pour la recherche des vides dans ces structures [1].

L'objectif de cette étude est de contribuer au développement du radar pour la détection des vides, en mettant en œuvre des simulations numériques, dans le but est de vérifier la sensibilité de cette technique aux défauts de jointement, et de valider un algorithme de traitement des signaux capable de faire ressortir, localiser et dimensionner ces défauts.

Dans cette étude nous avons procédé à la caractérisation électromagnétique des briques et du mortier de chaux, suivi par des simulations sur la propagation des ondes électromagnétiques dans un mur en maçonnerie, avec et sans vides, suivi de développement d'algorithmes afin de construire des images 2D à partir des signaux recueillis des simulations. Enfin, un mur de dimension réel a été construit afin de procéder à une première validation de ces algorithmes.

2. Estimation de la Conductivité électrique et permittivité diélectrique (Briques et Mortier) :

Les trois briques utilisées pour les mesures sont de type foraine de dimension (42x28x5 cm). Les mesures sont effectuées à température ambiante et les briques sont prises à l'état naturel sans conditionnement préalable (humidité des briques 0.08%). Mis à part la face destinée aux mesures toutes les faces ont été recouvertes d'un film en aluminium afin d'assurer une bonne réflexion des ondes radar. La première position du récepteur mobile est de 22.2cm de la position fixe de l'émetteur, succédé de 10 déplacements d'un pas de 1 cm. On obtient donc 11 signaux correspondant aux différentes positions de l'émetteur.

Pour le mortier de chaux, 3 dalles de mortier de même dimension que les briques (50x25x5 cm) ont été fabriquées. Le dispositif de mesure est le même que sur les briques. Les mesures sont effectuées sur ces dalles après qu'elles soient totalement carbonatées et que leurs poids soient stabilisés. La composition choisie pour la fabrication du mortier est celle utilisée par Nathalie Domède [2].

Tableau 1 : Composition du mortier

Matériaux	Quantité
Chaux	400 Kg/m ³
Sable (0/5)	1025 litres
Eau	275 litres

Le radar utilisé est un SIR-2000 de la compagnie GSSI[®], avec deux antennes de 1.5GHz model 5100 de la même compagnie. Chaque antenne possède à l'intérieur un émetteur et un

récepteur, l'utilisation de deux antennes est utilisée dans notre cas pour obtenir un angle de réflexion variable.

L'estimation de la conductivité électrique et permittivité diélectrique est réalisé à l'aide du modèle numérique FDTD d'antenne GPR développé par G. Klysz [3], dans ces simulations, les dimensions des briques et dalles de chaux ont été respectées, le but de l'estimation étant d'ajuster les paramètres électromagnétique jusqu'à obtenir une bonne corrélation entre les signaux simulés et ceux mesurés [4].

Le résultat présenté dans la figure 2 montre un exemple de corrélation entre le signal mesuré des briques et le signal simulé. L'exemple présenté ici correspond à des signaux enregistrés à la position 11 du récepteur, donc à une distance de 23.9 cm. Les paramètres électromagnétiques introduits dans le modèle et qui devraient correspondre aux caractéristiques électromagnétique réelles de notre matériau (dans ce cas la brique) sont une permittivité relative $\epsilon_r=3$, et une conductivité de $\sigma=0,02$ S/m.

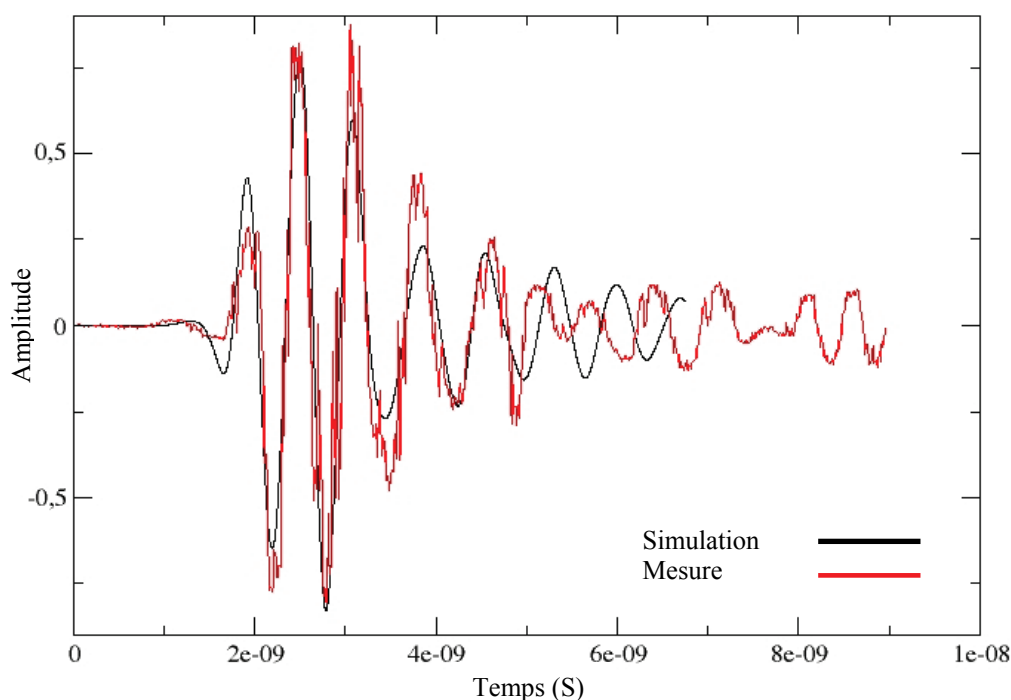


Figure 1 : Comparaison entre le résultat de simulation et de mesure sur brique

Dans le cas des dalles de mortier les paramètres électromagnétiques ainsi déterminés sont une permittivité relative $\epsilon_r=8$, et une conductivité de $\sigma=0,065$ S/m.

3. Simulation de la propagation des ondes électromagnétiques dans différent cas de figure de mur en maçonnerie :

Les différentes simulations qu'on présente ici sont en 2D, les dimensions du mur en maçonnerie restent inchangées (327x58 cm), les dimensions des briques sont celles citées précédemment (28x5 cm), l'épaisseur du joint de mortier de chaux est de 2 cm. dans la première simulation le mur est considéré comme homogène, c'est à dire que les briques et les joints de mortier possèdent les mêmes valeurs de $\epsilon_r = 5.5$ et $\sigma=0.042$, ces valeurs sont obtenu en moyennant ϵ_r et σ des briques et du mortier. Pour la seconde simulation, les propriétés électromagnétiques des briques et des joints sont prises égales aux valeurs réelles trouvées précédemment ($\epsilon_r=3$ et $\sigma=0,02$ S/m pour les briques et $\epsilon_r=8$ et $\sigma=0,065$ S/m pour les joints en

mortier de chaux). Durant toutes les procédures de mesure la position de l'émetteur est fixe, il se trouve exactement au milieu d'une brique, et le récepteur occupera 28 positions toutes séparées d'un centimètre et dont la première se trouve à 13.9 cm de l'émetteur (figure 2). Le vide correspondant au défaut introduit est parallèle à la surface de mesure (2x5 cm) (figure 2). Le choix de cet appareillage de brique est de simplifier cette première phase de notre étude, il sera ensuite suivi par une étude paramétrique qui portera sur les limites de détection de notre algorithme, notamment en variant l'appareillage, la dimension des vides ainsi que la distance qui les sépare.

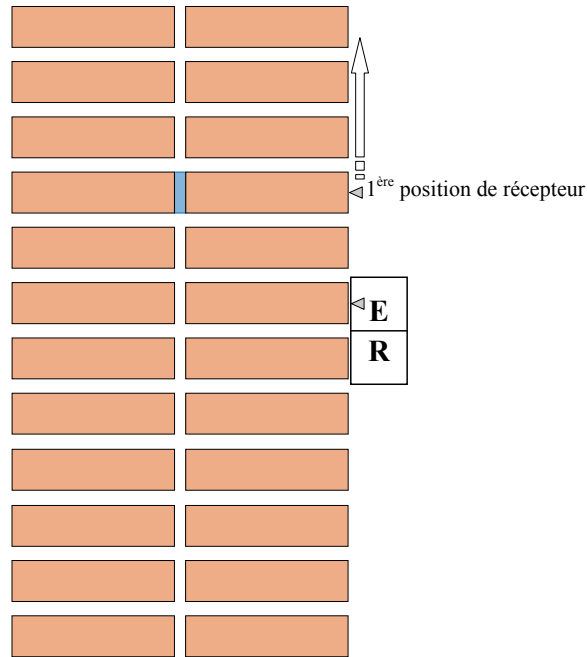


Figure 2 : Vide de joint parallèle à la surface de mesure

Les résultats des simulations pour la structure homogène (figure 3). Ces figures représentent l'évolution de l'onde électromagnétique à différents temps de propagation, avant le contact avec le vide, après le contact avec le vide et finalement au contact avec le fond du mur. Dans ce cas l'homogénéité fait en sorte que l'onde traverse la structure avec une évolution constante, et le moindre défaut créera une réflexion qui sera alors bien visible. Dans la figure 3, on voit clairement l'onde réfléchi par le vide et le fond du mur.

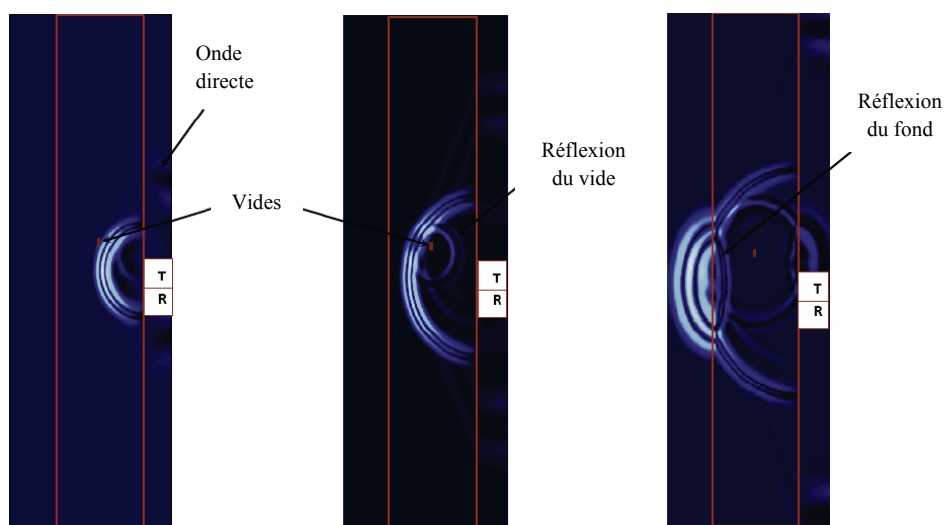


Figure 3 : Vide de joint parallèle à la surface de mesure (homogène)

Pour le cas d'une structure hétérogène, dans la figure 4, on peut voir la complexité qu'engendre un milieu aussi hétérogène que la maçonnerie, contrairement au milieu homogène, le milieu hétérogène constitué de deux matériaux dont les caractéristiques électromagnétiques sont différents, où les interfaces briques mortier génère de multiples réflexion qui vont brouiller le signal, le rendant ainsi difficile à interpréter, et ainsi distinguer les réflexions due aux interfaces à ceux due aux défauts, ce qui crée la nécessité d'un traitement spécifique des signaux reçu pour localiser le vide.

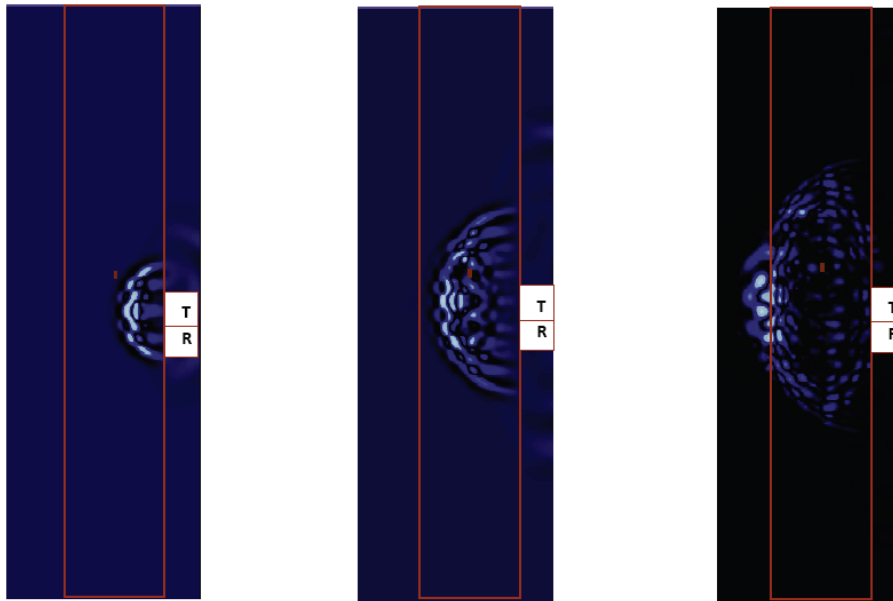


Figure 4 : Vide de joint parallèle à la surface de mesure (hétérogène)

4. Principe de l'algorithme développé pour la reconstitution d'image et résultats :

Le principe de l'algorithme est assez simple, ça consiste à construire une image en 2D, allant de la position du premier émetteur et la dernière position du récepteur et à une profondeur voulue. Tout d'abord on suppose que tous les points qui constituent la surface de l'image finale sont réflecteurs. On calcule pour chaque point la distance totale parcourue par l'onde partant de l'émetteur jusqu'au point réflecteur, puis réfléchi et allant jusqu'au récepteur. Connaissant la vitesse de déplacement de l'onde dans le matériau, calculé au préalable en même temps que l'estimation du temps zéro, on peut déterminer le temps nécessaire pour que l'onde effectue tout le trajet, ce qui va nous permettre de localiser le début de ce signal supposé réfléchi par le point réflecteur dans le signal intégral enregistré par le récepteur. On extrait par la suite le signal réfléchi correspondant au point réflecteur, dont la longueur est égale à celle de l'onde directe. On calcule la norme de ce signal réfléchi et on enregistre dans une matrice cette valeur à la position correspondant au point calculé. L'application de ces calculs sur l'ensemble des points de la surface citée précédemment va nous donner une matrice dont l'affichage va nous donner une image 2D de la surface initiale.

Les résultats de l'application de cet algorithme sur les cas de simulations précédentes sont présentés dans les figures suivantes :

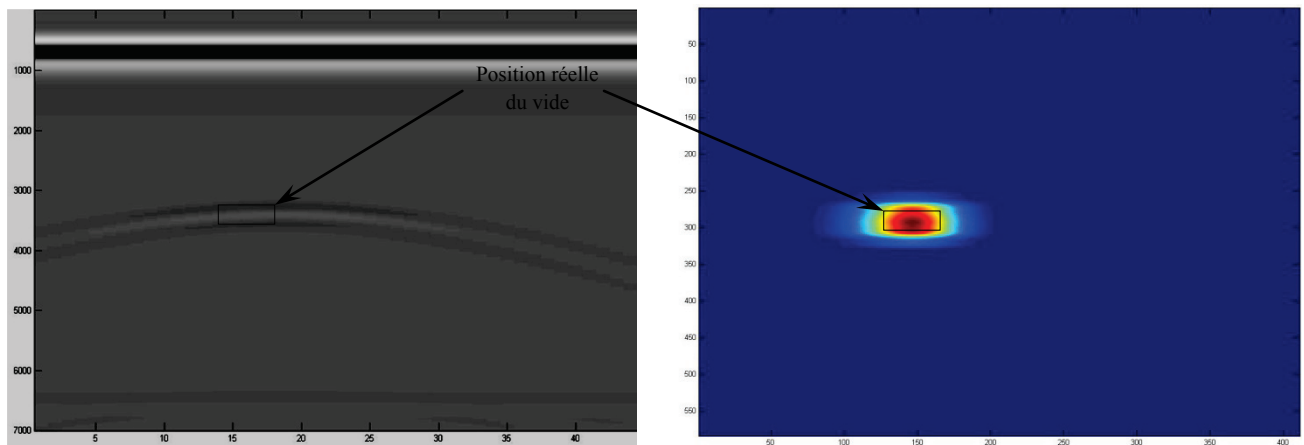


Figure 5 : Cas du mur homogène (résultat donné par l’algorithme à droite, radargramme donné par la simulation à gauche)

Dans la figure 5, le cas du mur homogène est assez simple de part l’uniformité de sa structure, ce qui rend un signal clair et simple à interpréter. En effet, il suffit de regarder le radargramme de la simulation pour distinguer la première réflexion, et qui représente l’onde directe, suivi par la réflexion du vide, en fin la réflexion sur le fond du mur. Dans notre résultat issu de l’algorithme, le vide est clairement représenté de part ces dimensions au centimètre près, ainsi que sa position réelle dans le mur.

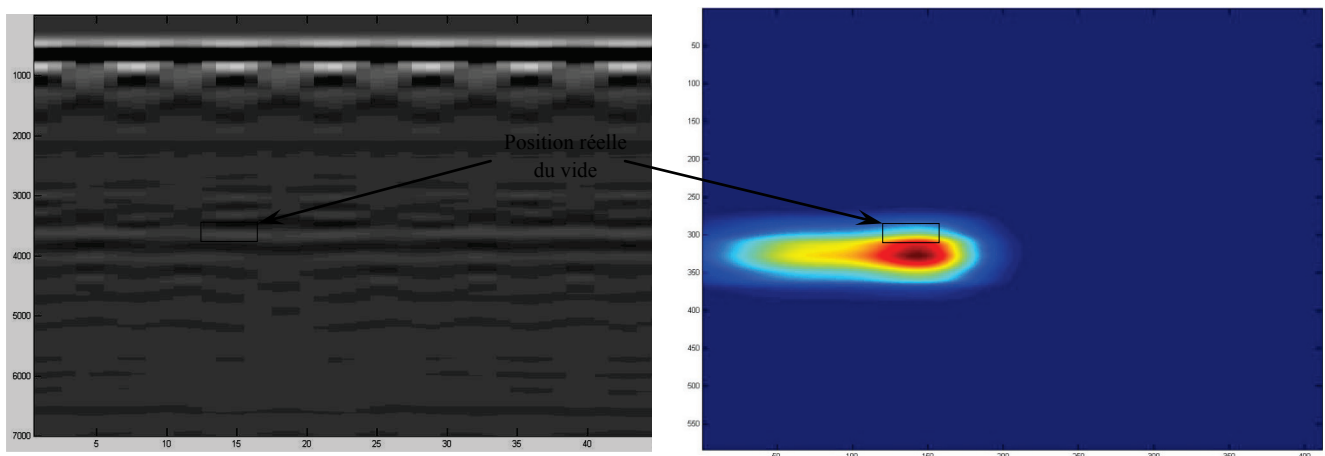


Figure 6 : cas du mur hétérogène (résultat donné par l’algorithme à droite, radargramme donné par la simulation à gauche).

Dans la figure 6, le cas du mur hétérogène est plus complexe de part la multitude d’interfaces que forme l’alternance brique mortier, et dont les caractéristiques électromagnétique varient de façon importante, ce qui rend le signal très complexe et difficile à interpréter. On peut voir sur le radargramme de la simulation la multitude de réflexions en comparaison avec le radargramme du mur homogène dans la figure 5. Dans notre résultat issu de l’algorithme, le vide du mur hétérogène (figure 6) est presque aussi clairement représenté que celui du mur homogène (figure 5), et cela de part ces dimensions au centimètre près, ainsi que sa position réelle dans le mur. Concernant la précision de localisation en profondeur, la différence peut être expliquée par l’erreur d’estimation de la vitesse d’onde dans le milieu. Cette erreur provient de l’arrangement des briques et du mortier (différence entre l’arrangement vertical et horizontal).

5. Conclusion :

Le but de cette étude est d'essayer de détecter des vides dans un milieu extrêmement complexe de par sa structure, et de la variation des caractéristiques électromagnétiques des matériaux qui le composent. Dans un premier temps nous avons essayé de connaître les caractéristiques électromagnétiques des briques et du mortier de chaux. Cela nous a permis par la suite d'engager des simulations afin de mieux comprendre la propagation des ondes radar dans le milieu, puis d'analyser l'effet des vides. L'application de notre algorithme sur les signaux simulés a donné des résultats encourageants. Pour valider cet algorithme, un mur en vraie grandeur a été construit en y intégrant des vides de différentes dimensions et orientations. Les premiers résultats obtenus sont très encourageants pour perfectionner notre algorithme et l'appliquer sur les structures en maçonnerie réelles afin de valider l'ensemble de nos travaux.

Remerciements.

Le financement de ces recherches est en partie assuré par la Chaire industrielle du CRSNG sur l'auscultation des ouvrages de béton (Université de Sherbrooke).

6. Références

1. D. M. McCann and M. C. Forde: Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures, NDT & E International Volume 34, Issue 2, March 2001, Pages 71-84.
2. Domède Nathalie. Méthode de requalification des ponts en maçonnerie. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France 2006.
3. G. Klysz, X. Ferrieres, J.P. Balayssac and S. Laurens: Simulation of direct wave propagation by numerical FDTD for a GPR coupled antenna, NDT & E International Volume 39, Issue 4, June 2006, Pages 338-347.
4. G. Klysz, J.P. Balayssac and X. Ferrières: Evaluation of dielectric properties of concrete by a numerical FDTD model of a GPR coupled antenna—parametric study, NDT & E International Volume 41, Issue 8, December 2008, Pages 621-631.