



Partie 1 – Évaluation non destructive des matériaux

DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS DE COUCHES MINCES DANS LE BÉTON À L'AIDE D'UN GÉORADAR COMMERCIAL À HAUTES FRÉQUENCES : APPROCHE PIC-À-PIC ET ANALYSE FRÉQUENTIELLE DU COEFFICIENT DE RÉFLEXION

**DETERMINING THE PROPERTIES OF THIN FILMS IN CONCRETE USING
A COMMERCIAL HIGH FREQUENCY GPR: THE PEAK-TO-PEAK APPROACH
AND THE FREQUENCY ANALYSIS OF THE REFLECTION COEFFICIENT**

Audrey VAN DER WIELEN^(a), Frédéric NGUYEN^(b), Luc COURARD^(a*)

a. Université de Liège, Matériaux de construction - b. Université de Liège, Géophysique appliquée
* auteur correspondant : luc.courard@ulg.ac.be

RÉSUMÉ

Le Ground Penetrating Radar (GPR) est un outil efficace pour l'inspection non destructive de structures en béton. Il est largement utilisé pour détecter les armatures et les zones humides ou pour évaluer l'épaisseur des éléments. Mais lorsqu'un élément contient une couche mince, les ondes radar sont soumises à de multiples réflexions sur les interfaces et la couche apparaît dans le radargram comme une unique réflexion, dont l'étude détaillée peut permettre de déterminer l'épaisseur et la permittivité de la couche mince. Deux approches ont été considérées dans cette étude. Dans la première, l'analyse est basée sur l'amplitude pic-à-pic de la réflexion. La seconde approche comporte une ana-

lyse fréquentielle du coefficient de réflexion, dont l'amplitude et la phase sont alors calculées pour différentes fréquences, ce qui permet en théorie de déterminer à la fois la permittivité et l'épaisseur de la couche.

Les deux méthodes ont été validées numériquement, par simulations en différences finies, et testées expérimentalement sur des échantillons de béton contenant une lame d'air d'épaisseur variable. Nous avons montré que l'analyse fréquentielle permettait d'atteindre une précision plus élevée dans l'estimation des paramètres pour un faible coût de calcul supplémentaire. L'efficacité de la méthode dépend des conditions et est optimale pour les couches de permittivité élevée présentant un contraste important avec la matrice.



ABSTRACT

The Ground Penetrating Radar (GPR) is an efficient tool for the non-destructive inspection of concrete structures. It is widely used for the detection of rebars or humid zones or for evaluating the thickness of elements. But when an element contains a thin layer, the radar waves are submitted to multiple reflections on the interfaces and the layer appears in the radargram as a single reflection, whose detailed analysis can allow determining the thickness and the permittivity of the thin layer.

Two approaches were considered in this paper. In the first one, the analysis is based on the peak-to-peak reflection amplitude. The second approach uses a frequency analysis of the reflection coefficient, whose amplitude and phase can then be calculated for several frequencies. With this method, the thickness and permittivity of the layer can in theory be simultaneously determined.

Both methods were numerically validated through finite difference simulations and experimentally tested on concrete samples containing an air layer of variable thickness. We showed that the frequency analysis allowed to reach a higher precision in the parameters estimation for a limited additional computing cost. The method efficiency depends on the conditions and is optimal for layers with a high permittivity presenting a large contrast with the matrix.

Mots-clés : GPR, Ground Penetrating radar, couches minces, inspection non destructive

* * *

1. INTRODUCTION

Le GPR, ou Ground Penetrating Radar, est une technique de prospection non destructive utilisée depuis une vingtaine d'années pour l'inspection de structures de génie civil. Le principe du GPR est d'envoyer, à l'aide d'une antenne émettrice, des impulsions électromagnétiques (de fréquences variant de 500 MHz à 2.6 GHz pour l'inspec-

tion des structures) dans le milieu à étudier. Ces impulsions se réfléchissent sur les interfaces entre des milieux de propriétés diélectriques différentes (Figure 1 (a)). Une antenne réceptrice mesure l'amplitude du signal électromagnétique au cours du temps, que l'on appelle trace. En mesurant l'intervalle de temps entre l'émission de l'impulsion et l'enregistrement de son écho, la profondeur de l'interface peut être déterminée si on connaît la vitesse des ondes électromagnétiques dans le matériau, et inversement. Cette méthode permet de détecter les vides, les zones humides et les changements de matériau. [1]

Dans de nombreuses structures, les éléments détectés par l'utilisateur du radar peuvent être relativement fins, mais avec une étendue assez vaste. Ainsi, l'épaisseur d'une couche d'étanchéité dans un tablier de pont ou le vide et l'isolation dans mur en maçonnerie peuvent être considérés comme des couches minces. Lorsqu'une onde radar rencontre une telle couche, elle est soumise à de multiples réflexions sur les interfaces (Figure 1 (b)). La couche apparaît alors dans le radargram comme une unique réflexion, dont une étude détaillée va être requise pour déterminer l'épaisseur et la permittivité de la couche.

2. THÉORIE DE LA DÉTECTION DES COUCHES MINCES

La réflexion des ondes radar est décrite par le coefficient de réflexion, R , qui vaut le rapport entre l'amplitude de l'onde incidente, I , et celle de l'onde réfléchie. Lorsqu'un signal rencontre une couche mince, la réflexion observée R_{121} correspond à la somme des différents multiples réfléchis dans la couche (Figure 1 (b)). L'amplitude de l'onde résultante varie donc en fonction des interférences entre les différents multiples, pouvant être destructives ou constructives selon le temps de transfert dans la couche. Si l'atténuation subie par l'onde dans la couche peut être négligée, et que l'onde incidente peut être assimilée à une onde plane sinusoïdale, le coefficient de réflexion R_{121} est donné par [1, 2] :

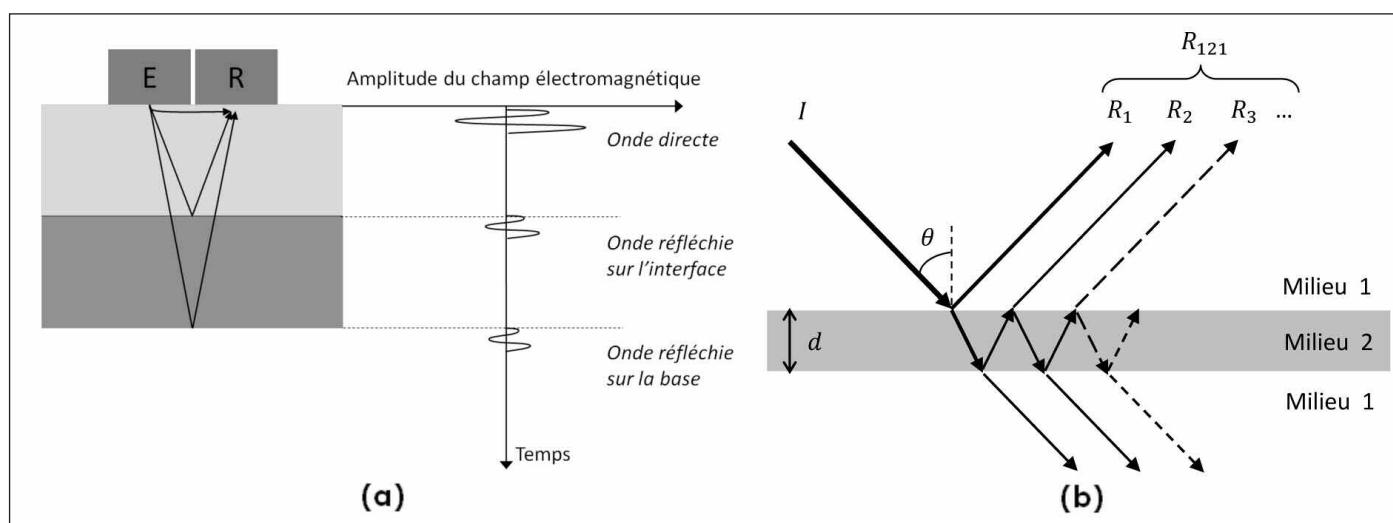


Figure 1. (a) Mesure d'une trace avec le GPR; (b) réflexions multiples sur une couche mince.

$$R_{121} \left(\frac{d}{\lambda}, R_{12} \right) = R_{12} \frac{1 - e^{i \frac{4\pi d}{\lambda} \cos \theta}}{1 - R_{12}^2 e^{i \frac{4\pi d}{\lambda} \cos \theta}} \quad (1)$$

Où d est l'épaisseur de la couche, λ est la longueur d'onde dans la couche, θ est l'angle incident et R_{12} est le coefficient de réflexion correspondant à une réflexion sur une interface simple du milieu 1 et vers le milieu 2, qui peut être calculé par les équations de Fresnel [1]. Si l'onde n'est pas plane ou si l'atténuation dans la couche ne peut être négligée (par exemple si la couche est trop épaisse ou conductrice), une alternative consiste à calculer les n premiers multiples réfléchis par la couche et à les additionner. Si x est la distance entre les antennes [3], la réflexion globale R_{121} est ainsi assimilée à cette valeur tronquée de la somme totale :

$$R_{121} = R_1(\lambda, \theta_1, x) + R_2(\lambda, \theta_2, x) + \dots + R_n(\lambda, \theta_n, x) \quad (2)$$

Outre le fait que cette seconde méthode permet de tenir compte de l'atténuation dans la couche, elle prend également en considération l'inclinaison spécifique de chaque multiple (Figure 2 (a)). L'évolution du coefficient de réflexion calculé par les deux méthodes est représentée à la Figure 2 (b) pour le cas d'une couche d'air (donc de permittivité $\epsilon_r = 1$) enfouie dans du béton ($\epsilon_r = 7.7$) à une profondeur de 10 cm.

Le déphasage des pics observés par les deux méthodes est dû à l'offset de 4 cm entre les antennes, qui n'est pas négligeable par rapport à la profondeur de la couche. Lorsque l'épaisseur de la couche peut être considérée comme faible par rapport à la longueur d'onde, le coefficient de réflexion devient directement proportionnel à l'épaisseur de la couche [1, 4]. Pour que la couche soit détectée dans le signal radar, il faut que l'amplitude mesurée soit supérieure au bruit de la mesure.

3. DÉTECTION DES COUCHES MINCES PAR ANALYSE PIC-À-PIC

La méthode la plus simple pour étudier la réflexion d'une onde radar sur base d'une trace est de mesurer l'amplitude pic-à-pic de la réflexion, c'est-à-dire la différence entre le maximum et le minimum de l'amplitude mesurée. Sur base d'une trace radar, le coefficient de réflexion est estimé en divisant l'amplitude mesurée sur la couche par celle mesurée sur un réflecteur parfait placé à la même position. Ainsi, les contributions de l'atténuation dans le matériau ou du diagramme de radiation de l'antenne sont supprimées.

Le dispositif expérimental pour mesurer le coefficient de réflexion en laboratoire consiste en deux dalles de béton bien lisses d'une épaisseur de 10 cm, entre lesquelles des espaces en plastique ou en bois sont glissés afin d'assurer la présence d'une lame d'air d'épaisseur contrôlée (entre 0.1 et 9.6 cm). Le dispositif est représenté à la Figure 3 (a). La réflexion sur un réflecteur parfait est obtenue en insérant une feuille d'aluminium entre les dalles à la place des espaces, tandis que l'onde directe est obtenue en plaçant directement les deux dalles l'une sur l'autre. Cette onde directe est soustraite de chaque mesure afin d'isoler la réflexion [5]. La permittivité diélectrique relative du béton est évaluée à l'aide d'un essai de réflexion sur la surface [3, 5]. Elle est ainsi estimée à 7.7. L'antenne radar est un modèle MALÅ de contact, présentant une fréquence nominale de 2.3 GHz.

A la Figure 3 (b), les résultats obtenus sont comparés à l'estimation théorique, obtenue par la méthode de la somme des premiers termes. On observe que seul un maximum est visible avant stabilisation de l'amplitude. Ceci est dû au fait que l'onde incidente n'est pas une sinusoïde mais une impulsion. Lorsque l'épaisseur est importante, les différentes réflexions se séparent dans la trace radar et n'interagissent donc plus. Ceci est confirmé à l'aide de simulations en dif-

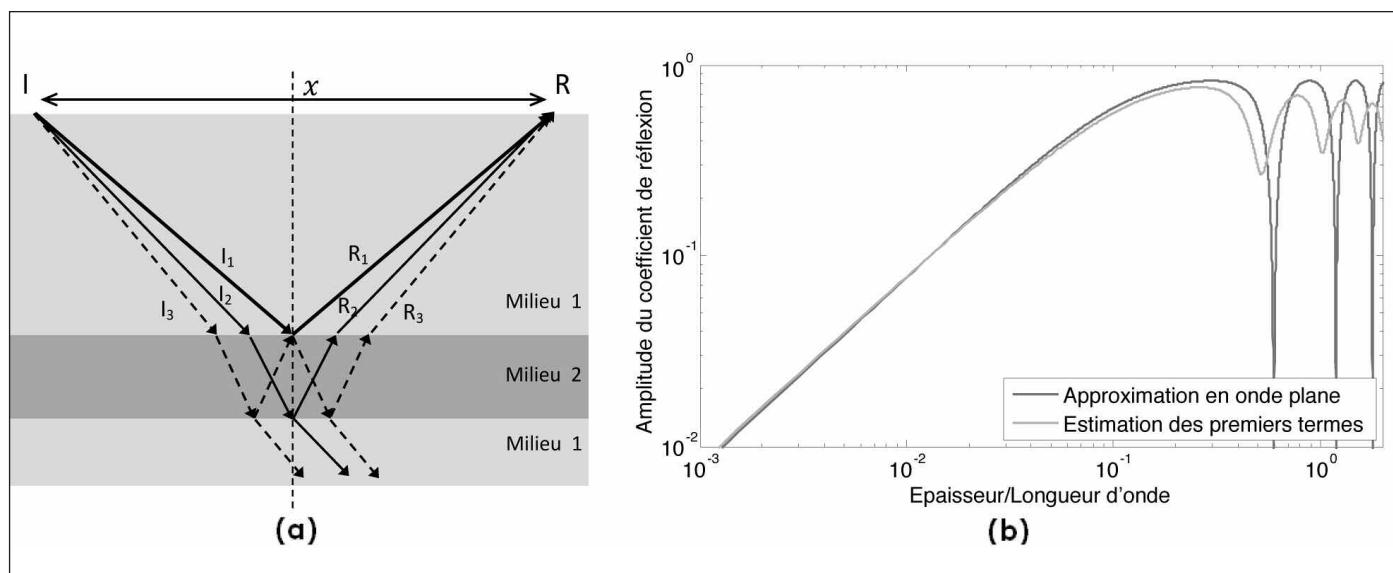


Figure 2. (a) Variation de l'inclinaison des différents multiples lorsque la couche est peu profonde ; (b) coefficient de réflexion en fonction du rapport (épaisseur / longueur d'onde).

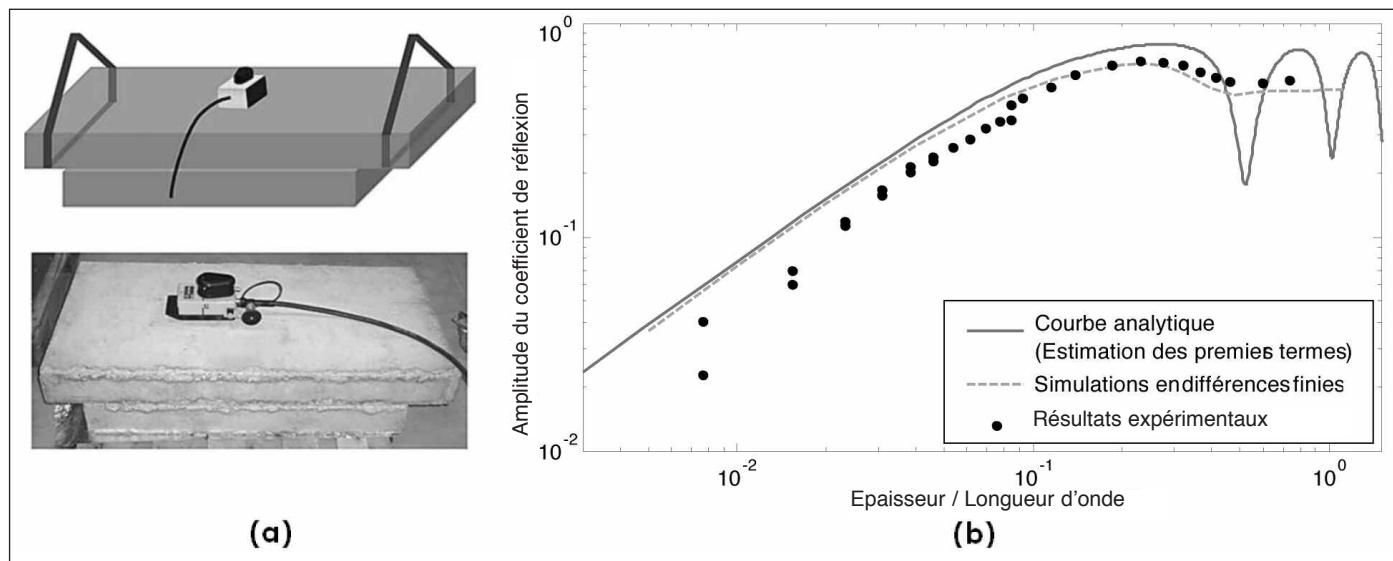


Figure 3. (a) Dispositif expérimental pour la mesure du coefficient de réflexion ;
(b) Comparaison des coefficients de réflexion pic-à-pic mesurés expérimentalement et par différences finies avec la courbe analytique calculée par la méthode de l'estimation des premiers termes.

férences finies (FDTD) menées à l'aide du logiciel GprMax 2D [6]. Les simulations sont menées avec une ondelette réaliste et les paramètres réels du problème. Les coefficients de réflexion pic-à-pic observés sont alors beaucoup plus proches des mesures effectuées que des courbes analytiques. Néanmoins, on observe que l'amplitude des coefficients de réflexions mesurés en laboratoire est inférieure aux prédictions théoriques et numériques pour les couches très minces. Ceci est probablement dû au bruit de la mesure et est susceptible de réduire fortement la précision de toute caractérisation de couche basée sur ce paramètre.

En résumé, le coefficient de réflexion pic-à-pic d'une couche mince peut être estimé par des relations analytiques si la couche mince est suffisamment fine ($d < \lambda/11$), mais il sera alors affecté par un bruit important. Si la couche est plus épaisse, des simulations numériques doivent être préférées pour estimer cette amplitude. Le coefficient de réflexion dépend du rapport épaisseur sur longueur d'onde. Une simple mesure ne permettra donc de déterminer l'épaisseur ou le remplissage de la couche que si l'autre valeur est connue.

CARACTÉRISATION DES COUCHES MINCES PAR ANALYSE FRÉQUENTIELLE

Pour pouvoir exploiter entièrement les informations contenues dans la réflexion de l'ondelette, il faut procéder à son analyse fréquentielle. En effet, l'impulsion du GPR contient tout un intervalle de fréquences et donc de longueurs d'onde, qu'il est utile de pouvoir exploiter séparément [7, 8]. Ceci est illustré à la Figure 4 (a), où sont représentés les spectres des mesures réalisées numériquement sur un réflecteur parfait et sur une couche humide ($\epsilon_r = 40$) de 1 cm d'épaisseur. Pour 13 valeurs de fréquences, le coefficient de réflexion est extrait de ces courbes en divisant l'amplitude mesurée sur la couche mince par l'amplitude mesurée sur le réflecteur parfait.

L'amplitude et la phase de ce coefficient sont représentées à la Figure 4 (b), où elles sont comparées à l'estimation analytique du coefficient de réflexion (obtenue par (1)). Les coefficients de réflexion obtenus sur base des simulations concordent très bien avec les estimations théoriques, et cette méthode permet d'exploiter leurs phases en plus de leurs amplitudes. En théorie, cette concordance peut permettre de déterminer les propriétés de la couche mince, en comparant les points mesurés à des points générés analytiquement pour différentes valeurs des paramètres recherchés (d et ϵ').

En pratique, cette méthode a été testée sur les mesures de couches d'air dans le béton, qui ont été précédemment analysée en fonction de l'amplitude pic-à-pic. A la Figure 5, les résultats expérimentaux sont comparés aux courbes théoriques obtenues par les méthodes de la somme des premiers termes et de l'approximation à une onde plane, pour le cas d'une couche de 6 mm d'épaisseur.

Dans ce cas précis, la méthode des premiers termes semble mieux prédire les résultats expérimentaux. L'amplitude est mieux estimée que la phase, qui présente un minimum local mal prédit par les équations.

Malgré cette concordance approximative pour la phase, nous avons tenté de voir si ces mesures pouvaient être suffisantes pour déterminer simultanément le remplissage et l'épaisseur des couches mesurées. Nous avons donc généré, par la méthode des premiers termes, les courbes théoriques d'amplitude et phase qui seraient obtenues pour tous les couples de valeurs $d-\epsilon'$, dans les intervalles $d=1-100$ mm et $\epsilon'r=1-81$ (avec une précision unitaire sur d et ϵ'). Pour chaque couple de valeurs, nous avons calculé l'erreur (au sens des moindres carrés) par rapport aux points expérimentaux obtenus pour les 13 fréquences considérées. Les erreurs obtenues pour l'amplitude et la phase ont été additionnées, après division de l'erreur de phase par 2π afin que les deux valeurs aient un intervalle de variation identiques. L'erreur globale, en fonction des deux paramètres, est représentée à la Figure 6 (a) pour le cas de la couche d'air de 6 mm. Les paramètres réels de la couche sont représentés par l'étoile blanche.

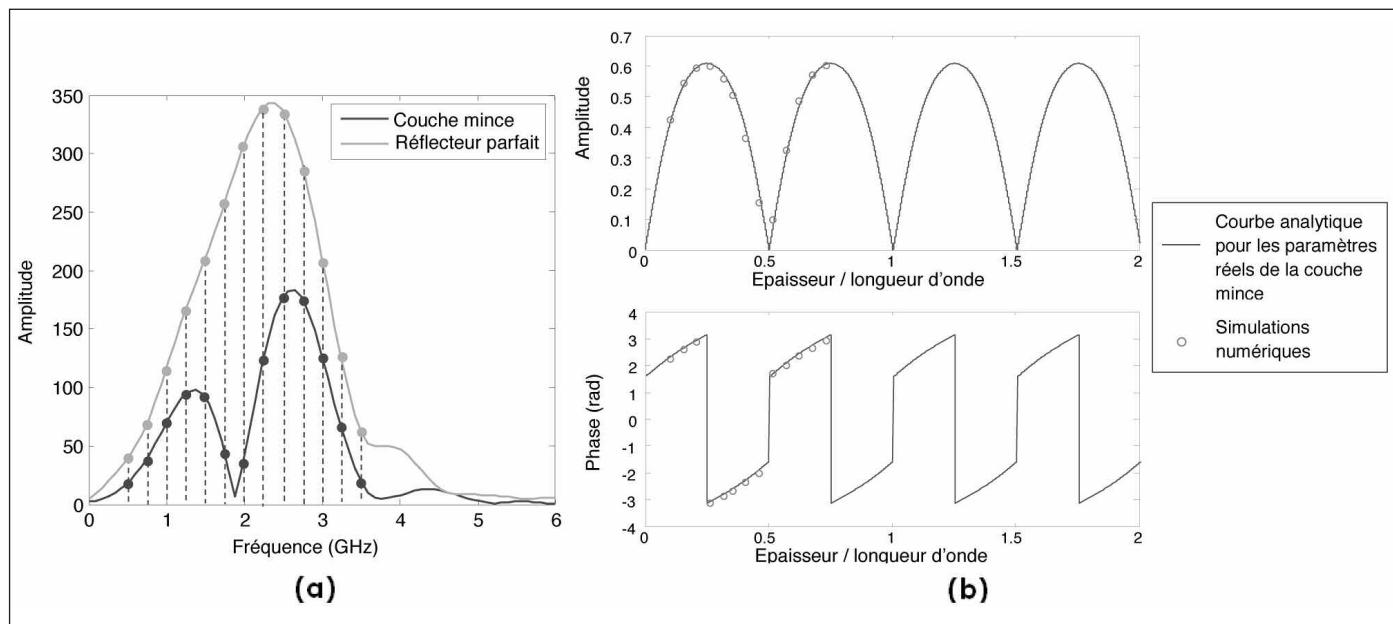


Figure 4. (a) Spectres fréquentiels des réflexions sur la couche mince et sur le réflecteur parfait ;
(b) Comparaison de l'amplitude et la phase de la réflexion obtenue par simulations en FDTD et de la courbe analytique obtenue par la méthode de l'approximation en onde plane.

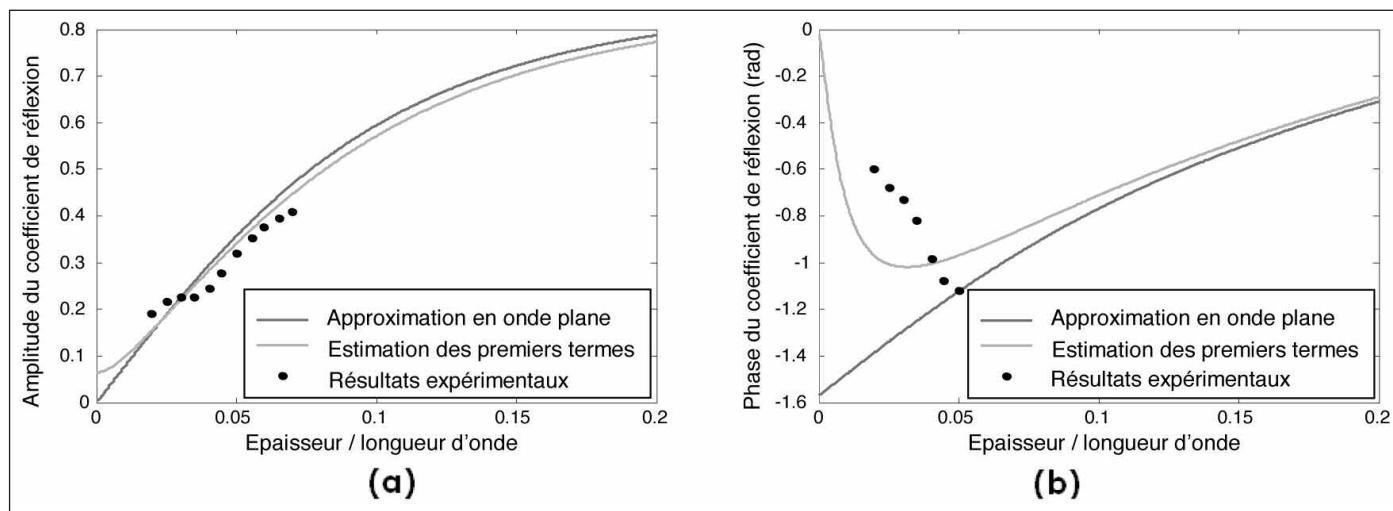


Figure 5. Comparaison de (a) l'amplitude et (b) la phase mesurées sur une couche d'air de 6 mm enfouie dans du béton avec les courbes théoriques calculées sur base de ses propriétés réelles.

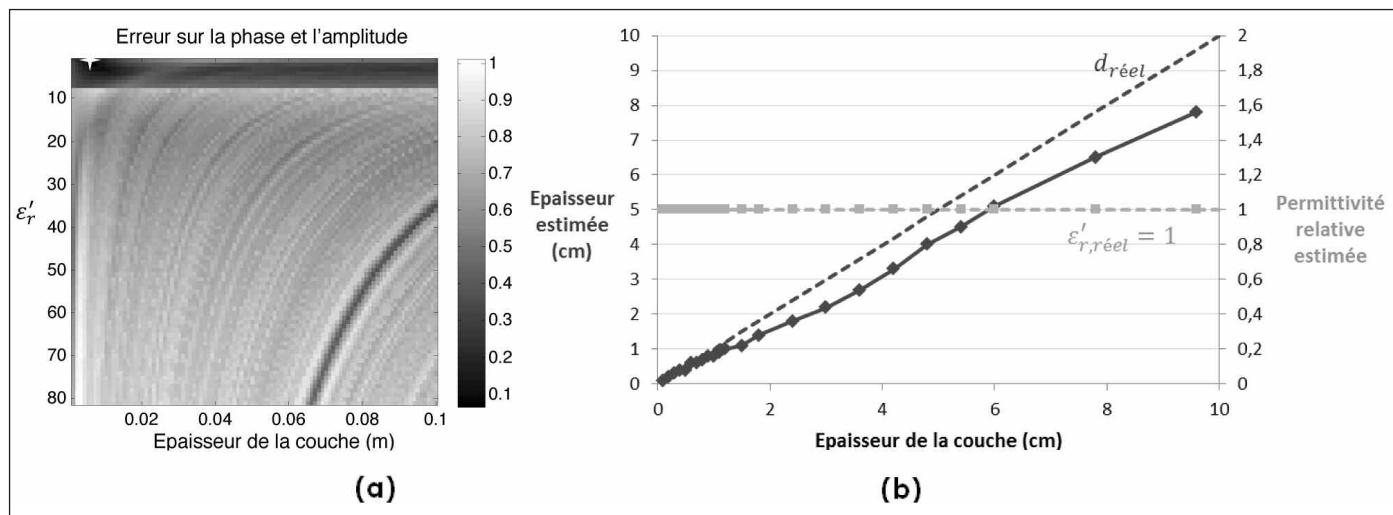


Figure 6. (a) Erreur sur la somme pondérée de l'amplitude et de la phase pour tous les paramètres considérés, dans le cas de la couche de 6 mm d'épaisseur ; (b) Comparaison des paramètres réels des couches testées avec les estimations expérimentales.

Dans le cas de la couche de 6 mm d'air, le minimum est obtenu pour les valeurs exactes de la couche. La comparaison des courbes analytiques avec les résultats expérimentaux permet donc, dans ce cas, de déterminer exactement les paramètres de la couche. La même méthode a été appliquée pour toutes les couches d'air d'épaisseurs variant de 1 mm à 9.6 cm. Les résultats sont représentés à la Figure 6 (b). On observe que la permittivité est systématiquement correctement évaluée, tandis que l'épaisseur de la couche est sous-estimée pour les épaisseurs supérieures à 1 cm, avec une erreur ne dépassant pas 20 %.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

En conclusion, l'analyse pic-à-pic peut être utilisée pour participer à la caractérisation d'une couche mince, mais cette méthode est limitée aux couches très minces, à moins de comparer l'amplitude à une courbe numérique à la place de courbes analytiques. De plus, l'épaisseur et le remplissage de la couche ne peuvent être déterminés simultanément. Au contraire, l'analyse fréquentielle de la réflexion permet de déterminer complètement la couche. Sur bases de couches d'air d'épaisseur variable enfouies dans du béton, nous avons montré que la comparaison de quelques valeurs de l'amplitude et de la phase du coefficient de réflexion mesurés pour des valeurs représentatives avec des courbes analytiques pouvait permettre de déterminer à la fois la permittivité de la couche et son épaisseur (avec une erreur maximale de 20%).

La précision de la méthode devrait également être testée pour d'autres remplissages de couche. L'inspection de couches présentant un contraste de permittivité plus faible avec la matrice est susceptible de réduire la précision des tests, tandis que celle de matériaux de très haute permittivité (une couche saturée par exemple), peut potentiellement être décrite avec plus de précision, puisque l'intervalle de longueurs d'ondes utilisables pour un même intervalle de fréquences sera plus étendu.

Pour déterminer plus de paramètres, ou s'affranchir de la nécessité de comparer la réflexion à une réflexion sur un

réflecteur parfait, la solution consiste à effectuer des mesures à offset variable (CMP). Mais les équations analytiques doivent alors être améliorées, notamment pour tenir compte de l'onde latérale dans la couche et en surface, qui vont apparaître quand l'angle incident est important [3].

RÉFÉRENCES

- [1] Annan, A.P., Electromagnetic principles of Ground Penetrating Radar, dans *Ground penetrating radar theory and applications*, H.M. Jol, Editeur. 2009, Elsevier. Pages. 1-38.
- [2] Deparis, J. et Garambois, S., On the use of dispersive APVO GPR curves for thin-bed properties estimation: Theory and application to fracture characterization. *Geophysics*, 2009. 74(1): Pages J1-J12.
- [3] Van der Wielen, A., Characterization of thin layers into concrete with Ground Penetrating Radar. Thèse de doctorat. 2014, Université de Liège. 228 pages.
- [4] Widess, M.B., How thin is a thin bed? *Geophysics*, 1973. 38: Pages 1176-1176.
- [5] Van der Wielen, A., Courard, L. et Nguyen, F., Static Detection of Thin Layers into Concrete with Ground Penetrating Radar. *Restoration of Buildings and Monuments = Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege*, 2012. 18(3/4): Pages 247-254.
- [6] Giannopoulos, A., Modelling ground penetrating radar by GprMax. *Construction and Building materials*, 2005. 19(10): Pages 755-762.
- [7] Jeannin, M., Etude des processus d'instabilités des versants rocheux par prospection géophysique-Appart du radar géologique. Thèse de doctorat. 2005, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- [8] Grégoire, C. et Hollender, F., Discontinuity characterization by the inversion of the spectral content of ground-penetrating radar (GPR) reflections - Application of the Jonscher model. *Geophysics*, 2004. 69(6): Pages 1414-1424.