
Contribution au développement du radar pour la caractérisation non destructive du béton

J.-P. Balayssac, V. Kringkaï, M. Sbartai, G. Klysz, S. Laurens, G. Arliguie

*Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC)
INSA – UPS Génie Civil
135 avenue de Rangueil
F-31077 TOULOUSE Cedex 04
jean-paul.balayssac@insa-toulouse.fr*

RÉSUMÉ. *L'évaluation non destructive tend à devenir un maillon incontournable dans la chaîne du diagnostic des ouvrages en béton. Mais des développements visant à améliorer les techniques, à définir leur sensibilité et à valider leur applicabilité sur sites sont nécessaires. Cet article décrit les développements destinés à utiliser la technique radar comme un outil de caractérisation non destructive des propriétés du béton. Sans pour autant négliger l'ensemble du signal, on s'intéresse tout particulièrement à la partie du signal qui se propage directement de l'émetteur au récepteur c'est à dire en surface du matériau. Des essais de sensibilité vis à vis d'indicateurs de durabilité du béton ont été réalisés sur corps d'épreuve de laboratoire mais aussi sur ouvrages afin de définir le domaine de validation de la technique. Enfin diverses voies d'inversion des paramètres de mesure pour remonter aux indicateurs recherchés sont également explorées par le biais de modèles physiques ou statistiques.*

ABSTRACT. *Non destructive evaluation is more and more involved in the diagnosis of the structures. But some developments for improving, defining the sensitivity and validating the techniques remain necessary. This paper describes the achieved developments for using the radar as a non destructive testing method for the evaluation of concrete properties. Even if the whole propagated signal is analysed, we focus on the part which directly propagates from the transmitter to the receiver (direct wave). Some sensitivity tests regarding two concrete durability indicators are realised both on laboratory samples and on structures. Finally, different ways for the inversion of the measured data are explored by mean of physical or statistical models.*

MOTS-CLÉS : *évaluation non destructive, béton, radar, teneur en eau, chlorures .*

KEYWORDS: *non destructive evaluation, concrete, radar, moisture, chlorides.*

1. Introduction

La technique radar est désormais reconnue comme un outil usuel dans l'évaluation non destructive des ouvrages en béton. Mais elle demeure essentiellement utilisée pour la recherche d'objets enfouis dans le béton (des armatures, des câbles ou des inserts métalliques) ou pour la reconnaissance de discontinuités ou de géométries. Des recherches assez récentes ont montré que le radar peut également être utilisé comme un outil de caractérisation de l'état du matériau ce qui lui ouvre de nouveaux champs d'application (Laurens, 2001), (Garciaz, 2001), (Dérobert, 2003). L'objectif de cet article est de faire un bilan des travaux réalisés depuis près de 10 ans au LMDC dans ce cadre. Deux indicateurs du béton sont essentiellement ciblés, la teneur en eau et la teneur en chlorures. Le signal radar est analysé en terme d'atténuation et de vitesse, en exploitant les différents signaux réfléchis mais aussi la partie de signal qui se propage directement de l'émetteur vers le récepteur, l'onde directe. Des résultats obtenus en laboratoire ou sur ouvrages ont clairement démontré la sensibilité de ce signal aux deux indicateurs recherchés. Des moyens de traitement adaptés ont été développés pour extraire des signaux les paramètres caractéristiques en terme d'atténuation et de vitesse. Des moyens d'inversion à partir de modèles physiques et statistiques sont également en cours de développement pour extraire directement des signaux ou de leurs attributs instantanés les paramètres caractéristiques du matériau.

2. Principe général de la technique radar et notions sur les propriétés électromagnétiques d'un milieu à pertes

De nombreux auteurs ont rapporté le principe de l'auscultation radar en génie civil (Bunney, 2004], (Clemena, 1991). Il ne s'agit ici que d'une rapide description du principe simplifié des auscultations de structures en béton armé par radar impulsif avec des antennes couplées. Il s'agit d'un radar de marque GSSI modèle SIR 2000, utilisant des antennes couplées de fréquence centrale 1,5 GHz (GSSI modèle 5100). Un radar permet d'émettre une impulsion électromagnétique qui va se propager en s'atténuant plus ou moins dans le milieu ausculté. Les interfaces présentant un contraste de propriétés électromagnétiques réfléchissent une partie de l'énergie émise par la source. Ces réflexions sont enregistrées par le récepteur pendant un intervalle de temps prédéfini par l'opérateur et constituent un radargramme montrant l'amplitude du signal reçu en fonction du temps. La figure 1 montre le type de radargramme que l'on peut supposer obtenir pour une dalle de béton armé possédant deux lits d'armatures lors d'une auscultation radar en mode bistatique par des antennes couplées. Sur cet exemple, l'énergie rayonnée par l'antenne qui constitue le « signal source » ou « signal incident » se propage dans toutes les directions du demi-espace matérialisé par l'interface air/béton en dessous de l'antenne émettrice (E).

Une partie du signal incident est directement transmis à l'antenne réceptrice (R), c'est le signal S_1 qui constitue l'onde directe émetteur récepteur. Une part de l'énergie rayonnée va se réfléchir sur les armatures du 1^{er} et 2^{ème} lit, ce qui constitue les signaux S_2 et S_3 et ainsi de suite pour les interfaces suivantes. Généralement l'antenne est déplacée sur un profil linéaire et des radargrammes sont enregistrés suivant un pas centimétrique. Ces radargrammes sont ensuite traités par seuillage et représentés en niveaux de gris ou de couleurs. Leur juxtaposition permet d'obtenir une image en deux dimensions de la structure auscultée appelée « coupe-temps », classiquement utilisée pour le repérage des armatures.

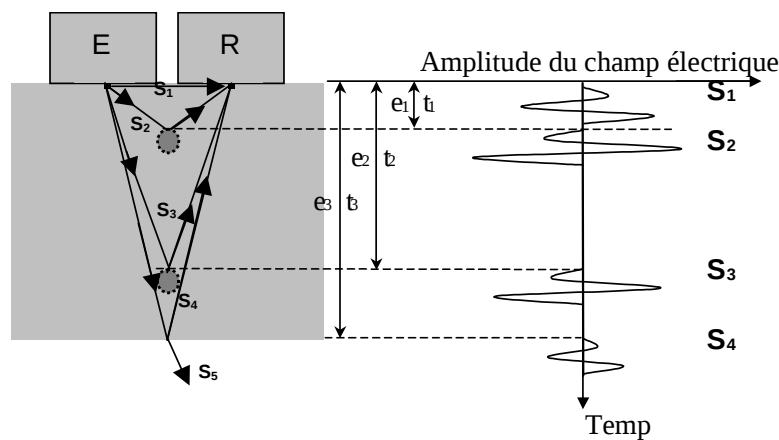


Figure 1 : schéma de principe de l'auscultation radar sur une dalle en béton armé

La réponse d'un matériau non magnétique comme le béton à une excitation électromagnétique fait appel à deux paramètres, la conductivité électrique, σ [S/m] liée aux courants de conduction et la permittivité diélectrique, ϵ [F/m] relative aux phénomènes de polarisation. Le béton n'étant pas un diélectrique parfait mais un matériau à pertes sa permittivité devient une grandeur complexe dont la partie imaginaire traduit les pertes. En outre comme la conductivité du béton n'est pas nulle, l'application d'un champ électrique variable engendre donc un courant de conduction ainsi qu'un courant de déplacement. Aux pertes diélectriques évoquées précédemment, s'ajoutent donc des pertes ohmiques par effet Joule. Il est impossible, dans la gamme de fréquence étudiée par la technique radar (300MHz-2GHz), de distinguer les contributions respectives des phénomènes de conduction et de polarisation.

On définit alors une permittivité effective relative (ϵ_r) qui est une combinaison complexe de la permittivité et de la conductivité et qui permet de traiter le matériau comme un diélectrique ayant une permittivité effective complexe, la

conductivité du matériau étant alors prise en compte par la partie imaginaire de la permittivité (équation 1).

$$\varepsilon_r = \frac{1}{\varepsilon_0} \left(\varepsilon + \frac{\sigma}{i\omega} \right) = \varepsilon_r' - i\varepsilon_r'' \quad [1]$$

avec ε_0 la permittivité diélectrique du vide $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8,854 \cdot 10^{-12}$ [F/m]

où ε_r' et ε_r'' sont les parties réelle et imaginaire de ε_r et sont appelés respectivement **constante diélectrique** et **facteur de perte**.

3. Simulation de la propagation des ondes électromagnétiques dans le béton.

Si on fait l'hypothèse que la propagation des ondes électromagnétiques dans le béton peut être assimilée à la propagation d'une onde plane progressive monochromatique se propageant dans une direction donnée, on montre que la constante diélectrique n'affecte que la vitesse de propagation et que l'atténuation est essentiellement liée au facteur de pertes. Un des objectifs du développement d'un outil de simulation est de vérifier ces hypothèses fortes. Nous avons pour cela proposé un modèle numérique de l'antenne radar utilisée, basée sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) (Klysz *et al*, 2004). Grâce à une modélisation adaptée du matériau ausculté, ce code de simulation nous a permis de mieux appréhender le rayonnement de l'antenne lors de son couplage avec différents matériaux et de vérifier les deux hypothèses précédentes sur l'ensemble des signaux analysés (direct ou réfléchi). Ce code a également permis de mieux analyser le mode de propagation du signal direct et de montrer que celui-ci se décompose en deux signaux, un premier se propageant dans l'air et un second se propageant dans le matériau. Enfin nous avons pu mettre en évidence l'incidence de la constante diélectrique du matériau de couplage sur la forme du diagramme de rayonnement.

4. Validation expérimentale de la sensibilité des ondes radar à la teneur en eau et en chlorures du béton

4.1. Sensibilité de la technique radar vis à vis de la teneur en eau

Afin d'étudier les effets de la teneur en eau sur les ondes radar nous avons utilisé des corps d'épreuve pour lesquels la teneur en eau est maîtrisée et répartie de manière homogène (Klysz, 2004), (Sbartai, 2005). Nous avons cherché à fabriquer des corps d'épreuve de dimensions suffisamment importantes pour limiter les effets de bords. Afin de mesurer les vitesses de propagation sur les corps d'épreuve étudiés, nous avons utilisé les antennes radar en mode bi-statique séparé suivant la technique d'ouverture d'angle (Klysz, 2004). Deux compositions de béton ont été

utilisées avec des rapports eau/ciment respectifs de 0,66 et 0,48 et des porosités accessibles à l'eau de 14,7 % et 12,5%. La figure 2 représente les variations de vitesse en fonction du volume d'eau rapporté au volume du corps d'épreuve (teneur en eau volumique) pour les deux bétons testés. Elle montre que la variation de la vitesse de l'onde directe dépend uniquement et de manière linéaire du volume d'eau et non du type de béton ou de sa porosité intrinsèque. Dans ce cas l'eau n'intervient que pour accroître la valeur de la vitesse de l'onde directe. Ce résultat est intéressant vis à vis des applications pratiques de la technique puisque la seule mesure de vitesse permettrait de remonter à la teneur en eau volumique d'un béton.

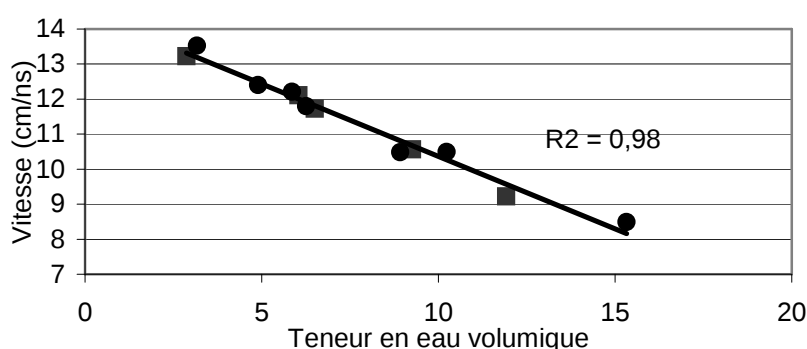


Figure 2 : Variation de la vitesse de l'onde directe en fonction de la teneur en eau volumique

En ce qui concerne les mesures d'atténuation des essais ont été réalisés sur une gamme de bétons plus étendue avec des porosités variant de 10 à 17% (Sbartai, 2005). Comme pour la variation de la vitesse, les résultats montrent à nouveau que l'atténuation varie linéairement en fonction de la teneur en eau volumique et ceci quelle que soit la porosité du béton. Plus la quantité d'eau augmente plus le signal est atténué, ce qui correspond à une augmentation des pertes dues à la forte polarisation des ondes «électromagnétiques en présence d'eau. Cette dépendance des deux paramètres essentiels de la propagation à la seule teneur en eau volumique est particulièrement intéressante vis à vis de futures applications pratiques de la technique.

4.2. Sensibilité de la technique radar vis à vis des chlorures

Des mesures ont été réalisées sur des corps d'épreuve conditionnés à différents degrés de saturation avec des solutions plus ou moins chargées en NaCl (de 40 à 120 g/l). Une procédure d'homogénéisation similaire à celle décrite au paragraphe précédent a été mise en œuvre.

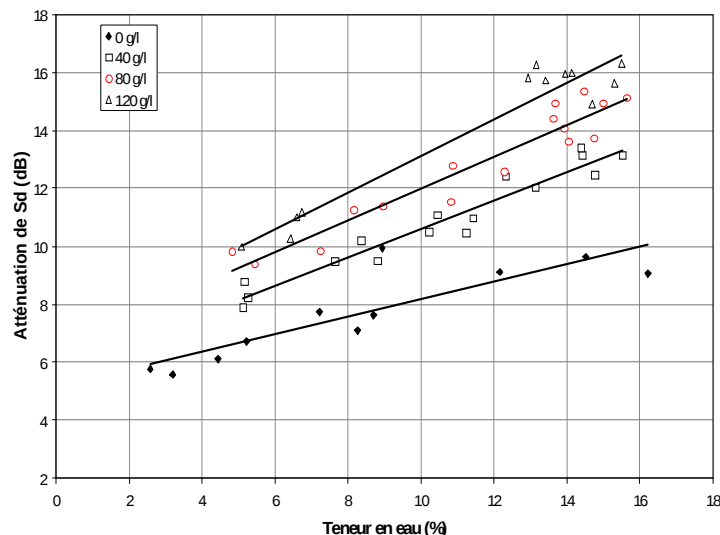


Figure 3 : effet des chlorures sur l'atténuation du signal direct

Les résultats en terme d'atténuation de l'onde directe sont présentés sur la figure 3 pour des teneurs en NaCl de 0, 40, 80 et 120 g/l. On remarque à nouveau une tendance linéaire entre l'atténuation et la teneur en eau volumique mais qui n'est pas indépendante de la teneur en sel dissous. Plus la quantité de sel est importante plus l'atténuation de l'onde est forte, de façon significative. Ceci est à relier à des pertes plus importantes en présence de sels, essentiellement à cause d'une plus forte conduction ionique. Ce résultat atteste donc de la sensibilité des ondes électromagnétiques à la présence des chlorures dans la solution interstitielle, ce qui a déjà été démontré par d'autres auteurs (Soutsos et al, 2001).

5. Applications sur ouvrages

De nombreuses études de cas ont été réalisées, essentiellement sur des ouvrages d'art. L'exemple présenté ici concerne un pont au dessus de la Garonne à Toulouse. Ce pont a fait l'objet de nombreuses auscultations non destructives dans le cadre d'un projet soutenu par le RGC&U (Klysz et al, 2003). L'objectif est de détecter des gradients de teneur en eau sur deux zones voisines (1.2 m x 0.8 m) à l'intrados du tablier de ce pont mais différemment altérées (repérées 5 et 6 dans la suite).

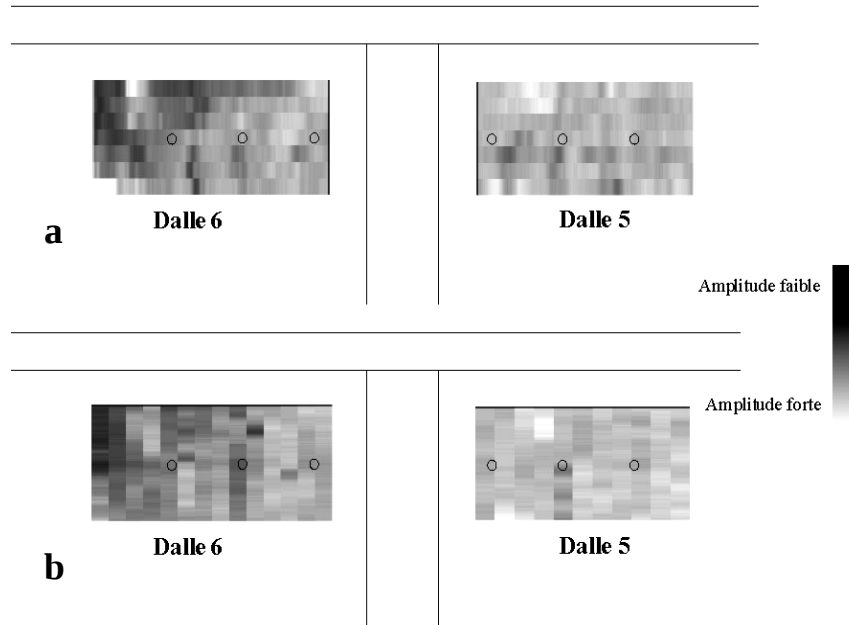


Figure 4: variations d'amplitude de l'onde directe sur des dalles présentant des contrastes d'humidité

La zone 6 présente des venues d'eau ainsi qu'une amorce de délamination visible avec aciers corrodés apparents alors que la zone 5 apparaît moins altérée. Des profils radars parallèles et perpendiculaires ont été réalisés tous les dix centimètres sur les zones tests sur lesquels nous avons analysé la variation d'amplitude de l'onde directe. Deux cartographies ont été réalisées à partir des profils radars parallèles soit longitudinaux (figure 4a), soit transversaux (figure 4b). On observe une zone particulièrement atténuante dans la partie gauche de la cartographie de la dalle 6, correspondant aux traces d'humidité visibles en surface montrant clairement l'influence de la teneur en eau sur l'atténuation des ondes radar. Ces essais ont été corroborés par des carottages qui ont permis de mettre en évidence les différences de teneur en eau dans l'épaisseur du tablier.

6. Conclusions et perspectives de développement

Dans le contexte actuel du développement des techniques d'évaluation non destructive des ouvrages de Génie Civil, cet article avait pour objectif de faire un rapide bilan des activités conduites au LMDC autour de la technique radar. Des études ont permis de démontrer clairement la sensibilité de la technique à des indicateurs essentiels que sont la teneur en eau et la teneur en chlorures. En outre des perspectives intéressantes ont été mises à jour et exploitées vis-à-vis de l'utilisation du signal direct émetteur-récepteur. Un nombre significatif d'applications sur sites a

permis de confirmer cette sensibilité. Des travaux de simulation numérique de la propagation ont été réalisés sur la base d'un code en différences définies adapté aux spécificités du matériel radar utilisé.

Les perspectives essentielles concernent aujourd'hui les méthodes d'inversions afin d'établir des lois de corrélation entre les paramètres issus de la mesure et les indicateurs recherchés. Deux possibilités sont envisagées : l'inversion du modèle physique de propagation des ondes ou bien l'inversion par des modèles statistiques mettant en œuvre des réseaux de neurones par exemple (Sbartai, 2005).

7. Bibliographie

- Bungey. J. H. (2004), « Sub-surface radar testing of concrete : a review » *Construction and building Materials*, vol. 18, p. 1-8
- Clemen G. C. (1991), « Short-pulse radar methods » in *CRC Handbook on Non Destructive Testing of Concrete*, Malhotra and Carino Editors, CRC Press, p. 235
- Dérobot X., "Techniques radar appliquées au génie civil", LCPC, n°J1050343, ISSN 1167-4865, 2003
- Garciaz J.L., Perrin J.L., "Application du radar géophysique pour l'évaluation des antennes spécifique et traitement de données", Journées Scientifiques ENDGC 2, Bordeaux, Novembre 2001
- Klysz G., Balayssac J.P., Dérobot X., Aubagnac Ch., "Evaluation of cover concrete by coupling some non-destructive techniques – Contribution of in-situ measurements", Non Destructive Testing in Civil Engineering, 16-19 September 2003, Berlin, Germany
- Klysz G. « Caractérisation du béton d'enrobage par technique radar : exploitation de l'onde directe émetteur-récepteur » Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2004, 240 p
- Klysz G., Ferrieres X., Balayssac J.P., Laurens S., "Numerical FDTD model for a GPR coupled antenna" *GPR 2004 (Ground Penetrating Radar)*, 21-24 juin, Delft, Pays Bas, p. 45-48, 2004
- Laurens S., "Aptitude de la technique radar à la caractérisation du béton d'enrobage _ Aide au diagnostic de la corrosion des armatures", Thèse de Doctorat, INSA Toulouse (France), Université de Sherbrooke (Canada), 2001, p 211
- Sbartai M., «Caractérisation physico-chimique des bétons par radar –approche neuromimétique de l'inversion », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse (France), Université de Sherbrooke (Canada), 2001, p 244
- Soustos. M. N., Bungey J. H., Millard S. G., Shaw M. R., Patterson A., "Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing" *NDT&E International*, vol. 34, 2001, pp 419-425