

Application du radar géophysique à l'évaluation des variations de permittivité et de résistivité de surface des matériaux

Conception d'une antenne spécifique et traitement des données

Jean-Luc GARCIAZ

Jean-Louis PERRIN

Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux (LERM)

Objectifs

La détermination de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques, aux fréquences radar de l'ordre de 1 GHz, permet de mesurer les variations de permittivité relative (constante diélectrique) d'un matériau donné, avec pour principal objectif d'estimer les variations de sa teneur en eau. Il a en effet été démontré [1, 2] que la permittivité d'un matériau variait principalement en fonction de sa teneur en eau. Pour un matériau donné, une augmentation de quelques pour-cent de sa teneur en eau provoque une élévation très sensible de sa permittivité relative.

Ce type d'application du radar n'est pourtant pas le plus courant. En effet, le radar géophysique est traditionnellement utilisé en « réflectométrie » pour la détection et l'étude de la géométrie des discontinuités dans le sol ou dans les matériaux, et le plus souvent avec un dispositif « monostatique » ou « pseudo-monostatique » (antennes d'émission et de réception en un même point ou très rapprochées) [3, 4].

Cependant, une antenne pseudo-monostatique conventionnelle ne permet pas de mesurer avec précision la vitesse de propagation de l'onde directe transmise dans un matériau entre l'émetteur et le récepteur. De plus, il paraît difficile de dissocier l'atténuation due à la résistivité de celle due à la modification des diagrammes de rayonnement en champ proche, en fonction de la constante diélectrique.

Au contraire, un dispositif bistatique (émetteur et récepteur séparés, et à distance variable) permet une analyse suffisamment précise du signal de l'onde transmise directement entre l'émetteur et le récepteur, sans être soumis à l'influence des cibles situées à quelques centimètres de profondeur puisque les échos qui leur sont associés arrivent temporellement après l'onde directe.

Par ailleurs, dans ce domaine de fréquences de l'ordre du gigahertz, l'atténuation des ondes dépend beaucoup plus de la résistivité électrique que de la constante diélectrique. Par conséquent, l'étude des atténuations à l'aide d'un dispositif bistatique adapté à détecter des anomalies de conductivité électrique, associées par exemple à la présence de sels, ferait du radar un outil applicable à la caractérisation des matériaux.

L'objectif principal est donc de bien dissocier la mesure de ces deux paramètres : vitesse de propagation d'une part, et mesure de l'atténuation de l'onde radar directe d'autre part.

Dans cette optique, l'étude a comporté les deux étapes suivantes :

- conception et élaboration d'une antenne à haute fréquence (~ 1 GHz), bistatique à couplage direct sur les matériaux, conservant un bon rendement (sensibilité, rapport signal/bruit) lorsque l'émetteur et le récepteur sont distants de 15 à 20 centimètres ;
- réalisation de mesures pour vérifier les corrélations, d'une part, entre la vitesse de propagation et la teneur en eau et, d'une part, entre l'atténuation de l'onde directe et la résistivité électrique.

Conception de l'antenne bistatique 1 GHz

Cette antenne a été élaborée pour présenter les principales caractéristiques suivantes :

- fréquence centrée sur 1 GHz environ pour travailler en haute résolution dans les premiers centimètres de profondeur d'investigation (profondeur *a priori* équivalente à la longueur d'onde, soit environ 10 cm à cette fréquence dans les matériaux courants) ;
- diagramme de radiation peu focalisé, de type omnidirectionnel à l'émission et diagramme de sensibilité symétrique à la réception (fig. 1) afin d'obtenir des signaux d'amplitude suffisante lorsque l'émetteur et le récepteur sont espacés (conservation de la dynamique et du rapport signal/bruit de l'onde directe). De plus, ces diagrammes doivent être le moins affectés possible par les variations de permittivité relative. Ces caractéristiques ont été optimisées en perfectionnant la position du blindage et la forme des éléments rayonnants (dipôles du type « bow-tie »), à partir de données théoriques [5-8] et avec de nombreux essais empiriques réalisés en laboratoire dans le cadre d'un projet de recherche interne ;
- prise en compte de l'aspect pratique en vue d'applications concrètes : antenne de petites dimensions ($18 \times 10 \times 5$ cm), légère (700 g) et avec un seul canal d'enregistrement (fig. 2).

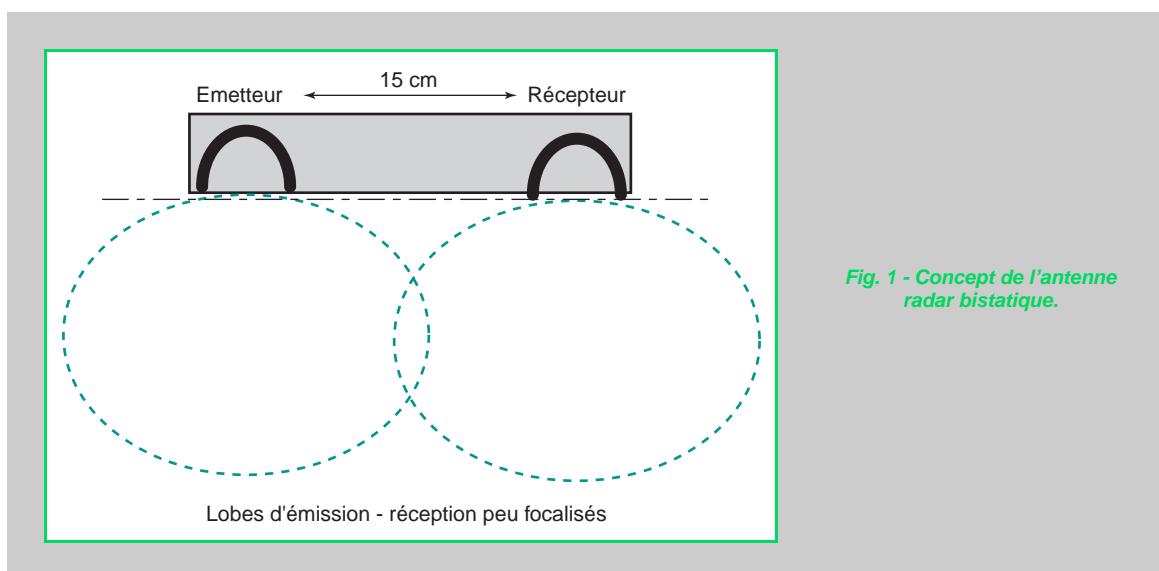


Fig. 1 - Concept de l'antenne radar bistatique.



Fig. 2 - Prototype d'antenne radar.

Essais en laboratoire

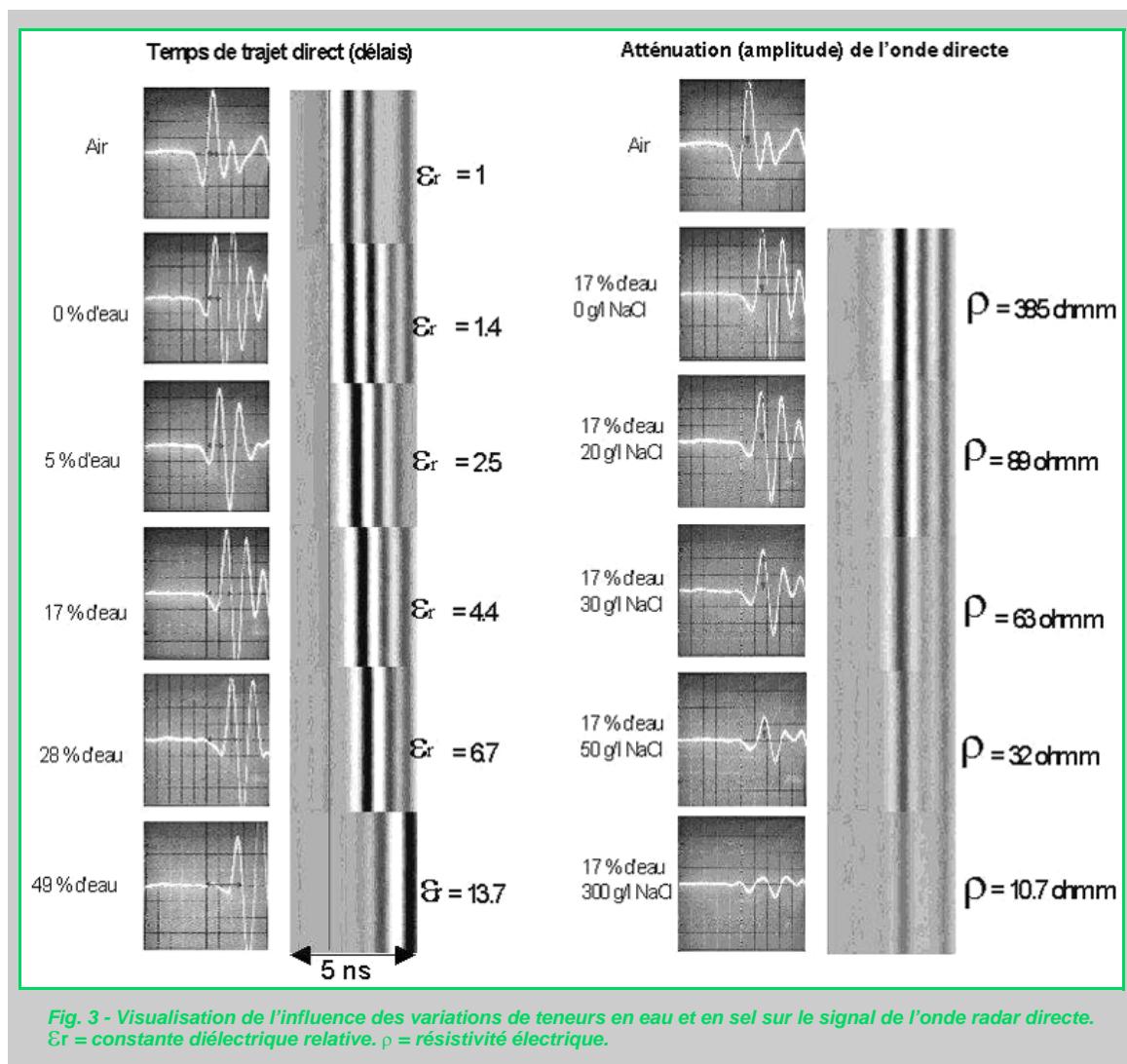
Des éprouvettes de béton cellulaire ont été confectionnées et imprégnées d'eau ou d'une solution saline pour les essais en laboratoire. Ce type de matériau, dont la porosité ouverte atteint plus de 50 %, a été choisi pour obtenir très facilement de grandes variations de teneurs en eau et en sel.

Les mesures ont été réalisées sur deux séries de cinq blocs, de taille identique ($30 \times 17 \times 10$ cm) :

- première série : cinq blocs contenant chacun une teneur en eau distincte (0 à 50 %), dans le but de mesurer des variations de permittivité relative. Les teneurs en eau ont été mesurées par pesées des volumes d'eau imprégnant les blocs après étuvage à 70 °C pendant 48 heures ;

➤ seconde série : cinq blocs contenant la même teneur en eau (17 %), mais avec une concentration en chlorure de sodium variant de 0 à 300 g/l afin d'obtenir des résistivités électriques décroissantes ; les résistivités ont été mesurées avec un dispositif dipôle-dipôle carré de 5 cm de côté [9, 10].

Les paramètres d'acquisition des signaux (gains, filtres, durée d'écoute) sont identiques pour tous les essais dont les résultats sont présentés sur les oscillogrammes et les radargrammes (fig. 3).



Exploitation des résultats

Les résultats, présentés sous forme de courbes des teneurs en eau en fonction des délais (fig. 4) et d'amplitude du signal en fonction de la résistivité (fig. 5), montrent qu'il existe des corrélations linéaires, d'une part, entre les teneurs en eau et les délais et, d'autre part, entre l'atténuation du signal et le logarithme de la résistivité, dans une gamme de valeurs comprise entre 10 et 500 ohm.m environ.

Des mesures de la vitesse de propagation en fonction de la teneur en eau ont également été réalisées sur trois échantillons de calcaire (fig. 4).

Les droites présentées sur le graphique de la figure 4 montrent des pentes différentes en fonction de la nature des matériaux (béton cellulaire ou calcaire), ce qui est normal compte tenu des différences de constante diélectrique intrinsèque et de porosité de chacun des deux matériaux. C'est pourquoi, pour des applications pratiques sur cas réels, un étalonnage des teneurs en eau en plusieurs points par prélèvements d'échantillons, étuvages et pesées, est nécessaire pour chaque type de matériau si l'on veut établir une cartographie des valeurs absolues d'humidité.

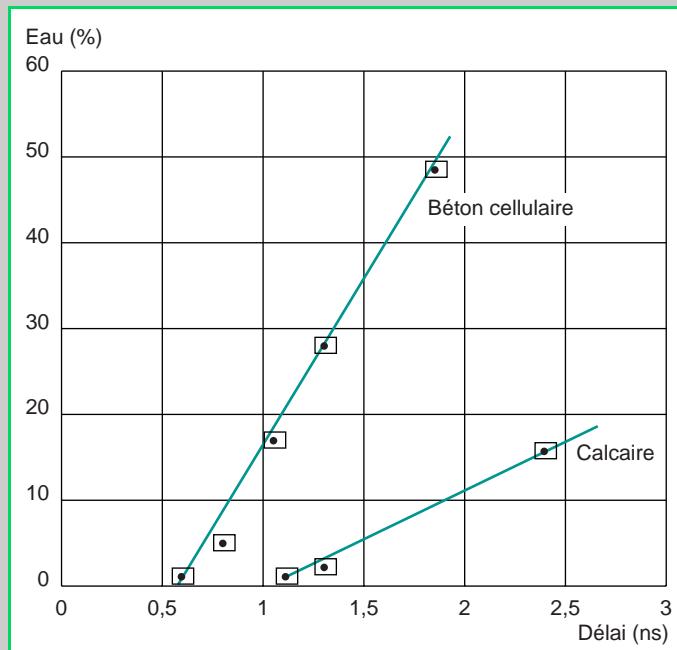


Fig. 4 - Teneurs en eau en fonction des délais de l'onde radar directe.

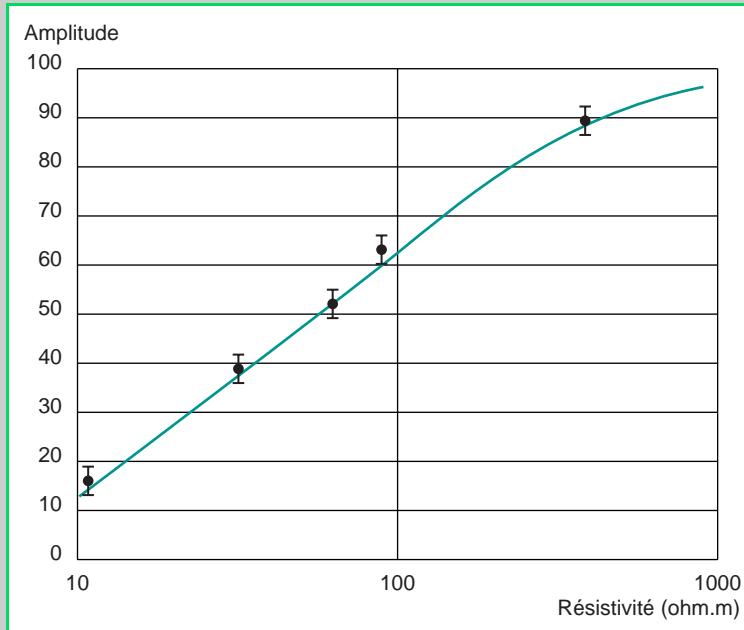


Fig. 5 - Amplitude du signal en fonction de la résistivité.

Avec une distance de 15 cm entre l'émetteur et le récepteur, la précision absolue sur la mesure des délais est de l'ordre de ± 50 ps, ce qui correspond, d'après le graphique, à une précision d'environ $\pm 1\%$ sur les valeurs de teneur en eau dans les blocs de béton cellulaire.

En ce qui concerne les mesures d'atténuation, il convient de rappeler que le but premier de cette étude est de vérifier la possibilité de mettre en évidence des variations relatives de résistivité et non pas de mesurer directement les teneurs en sel.

Les essais réalisés montrent bien la corrélation entre l'amplitude de l'onde directe et la résistivité pour une teneur en eau constante (17 %). La précision relative sur la mesure de l'amplitude étant de l'ordre de 5 %, on obtient une précision relative d'environ 10 % sur les mesures de résistivité dans la partie linéaire du graphique (de 10 à 500 ohm.m environ).

Néanmoins, avec ce type d'antenne adaptée, l'amplitude de l'onde directe ne varie que très peu en fonction de la permittivité relative, dans une gamme allant de 1,5 à 12 environ. Cette constatation découle de l'observation des oscillogrammes de la partie gauche de la figure 3 (les réglages sont les mêmes pour tous les essais). Ces résultats montrent que les diagrammes de radiation de ce type d'antenne varient peu en fonction de la constante diélectrique.

Dans ces conditions et avec ce type d'antenne, il semble donc possible d'apprécier les variations de résistivité indépendamment des variations de constante diélectrique.

Application à l'évaluation de la teneur en eau : traitement des données

Une application sur un site réel a été réalisée sur une maçonnerie ancienne constituée de blocs de calcaire revêtus d'un enduit de mortier.

Les mesures ont été acquises selon une série de huit profils continus de 2,5 m de longueur, espacés de 20 cm. La digitalisation du signal reçu permet de mesurer le temps de propagation de l'onde directe quasiment en continu sur chaque profil, avec une résolution temporelle d'environ 40 ps (fig. 6).

La cartographie des délais, établie à partir du traitement des huit profils parallèles (fig. 7), montre des anomalies comparables à celles obtenues par mesures capacimétriques, converties en teneurs en eau après étalonnage par étuvage d'échantillons (fig. 8).

Les différences relatives qui subsistent entre les deux cartes sont essentiellement liées aux différences de volumes de matériaux intégrés par les mesures. En effet, la profondeur d'investigation est de l'ordre de 10 cm avec le radar, ce qui correspond à la longueur d'onde approximative dans le matériau considéré et 4 cm en capacimétrie : or le gradient d'humidité en profondeur n'est probablement pas constant.

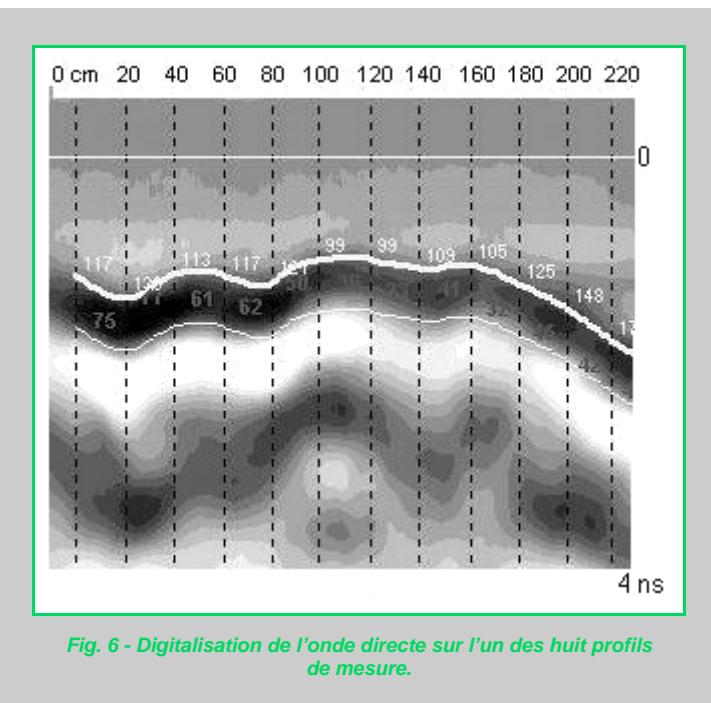


Fig. 6 - Digitalisation de l'onde directe sur l'un des huit profils de mesure.

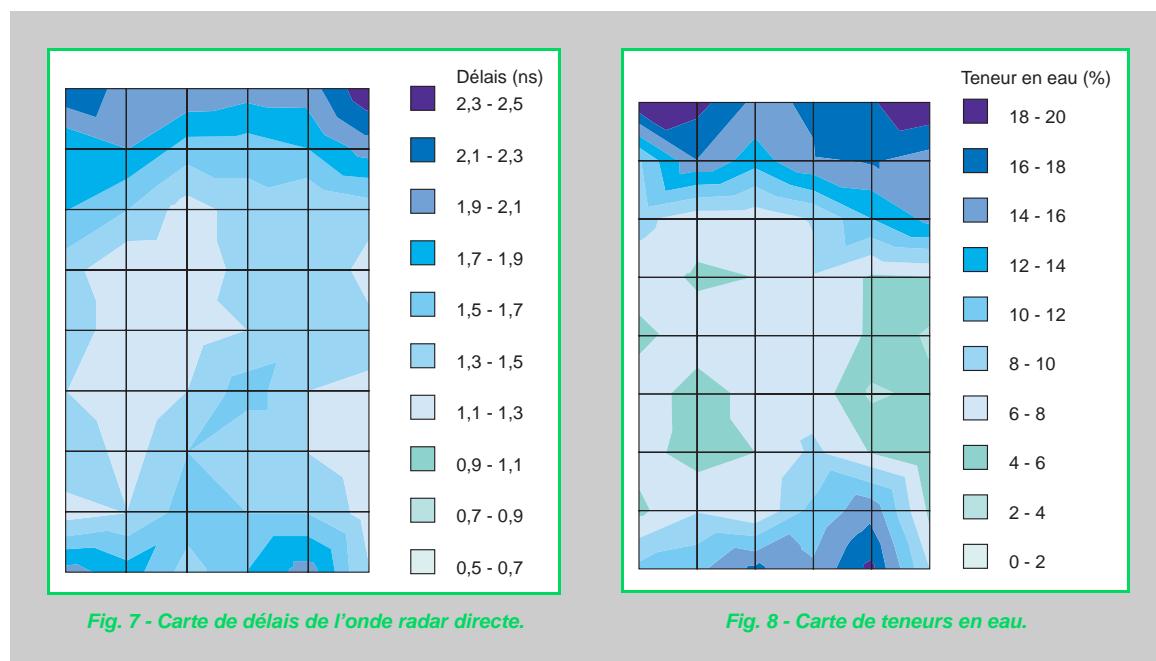


Fig. 7 - Carte de délais de l'onde radar directe.

Fig. 8 - Carte de teneurs en eau.

Conclusion

L'utilisation de la méthode radar, en mode bistatique avec un système de transducteurs optimisés à très hautes fréquences, permet l'étude précise de l'onde directe transmise entre un émetteur et un récepteur séparés pour des applications visant à évaluer les variations de teneur en eau et de résistivité électrique des matériaux dans les dix premiers centimètres de profondeur environ.

Sans toutefois chercher à obtenir des valeurs absolues précises, la mise en évidence des variations relatives d'une zone à une autre paraît d'ores et déjà envisageable pour des applications concrètes sur site, avec une sensibilité suffisante pour détecter rapidement des zones d'anomalies.

Certes, des essais complémentaires en laboratoire, sur des corps d'épreuve réalisés avec des matériaux plus conventionnels que le béton cellulaire, et sur des sites réels, devront être réalisés pour valider cette méthodologie, et notamment pour déterminer :

- le type de corrélation (linéarité ou non), d'une part, entre la permittivité relative et la teneur en eau et, d'autre part, entre l'atténuation du signal radar et la résistivité, sur différents types de matériaux (bétons, pierres, etc.) ;
- la sensibilité des mesures sur les matériaux *a priori* peu poreux ;
- la précision des mesures en regard de la sensibilité ;
- les limites d'application de la méthode (régularité et état des surfaces auscultées, homogénéité des matériaux dans les premiers centimètres, etc.).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ROBERT A., Dielectric permittivity of concrete between 50 MHz and 1 GHz and GPR measurements for building materials evaluation, *Journal of Applied Geophysics*, **40**, **1998**.
- [2] VAN DER WEGEN G., BOSMANS G., Quality assurance of fresh concrete by radar techniques, *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Proceedings, vol.2, **1995**, pp 1033-1040.
- [3] LEON PETERS J.R., DANIEL J.J., YOUNG J.D., Ground Penetrating Radar as a Subsurface Environmental Sensing Tool, *Proceeding of the IEEE*, vol. 82, **12**, **1994**.
- [4] ANNAN A.P., Transmission dispersion and GPR, *Environ. Eng. Geophys.*, **0 (2)**, **1996**, pp. 125-136.
- [5] LESTARI A.A., YAROVOY A.G., LIGHART L.P., *Adaptation Capabilities of a Wire Bow-Tie Antenna for Ground Penetrative Radar*, International Research Centre for Telecommunications-Transmission and Radar, Delft University of Technology.
- [6] STUTZMAN W.L., GHIELE G.A., *Antenna Theory and Design*, 2nd edition, **1996**.
- [7] DE JONGH R.V., YAROVOY A.G., LIGHART L.P., KAPLOUN I.V., SCHUKIN A.D., *Design and analysis of new GPR antenna concepts*, International Research Centre for Telecommunications-Transmission and Radar, Delft University of Technology.
- [8] SHLAGER K.L. et al., Optimization of Bow-Tie Antennas for Pulse Radiation, *IEEE trans. Anten. & Prop.*, vol. AP-42, **7**, **1994**.
- [9] SIRIEX C., LATASTE J.-F., BREYSSE D., FRAPPA M., Caractérisation de l'endommagement du béton par mesures électriques, *Materials and structures/Matériaux et Constructions*, vol. **35**, **2002**, pp. 204-210.
- [10] HAELTERMAN K., LAMBRECHTS L., JANSENS H., VAN GEMERT D., Geo-electrical survey of masonry, *Materials and structures*, **26**, **1993**.