

## Partie 1 – Évaluation non destructive des matériaux

# DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'ÉVALUATION NON DESTRUCTIVE DES BÉTONS PAR ONDES EM – SIMULATIONS NUMÉRIQUES ET EXPÉRIMENTATIONS

## DEVELOPMENT OF A NON DESTRUCTIVE EVALUATION TOOL CONCRETE USING WAVE EM – NUMERICAL SIMULATIONS AND EXPERIMENTS

**TC. MAÏ<sup>(a)</sup>, ZM. SBARTAI<sup>(a\*)</sup>, F. DEMONToux<sup>(b)</sup>, F. BOS<sup>(a)</sup>**

a. 2M, UMR 5295, Département de génie civil Environnemental, Université de Bordeaux, CNRS, INRA, France.

b. IMS, UMR 5218, Université Bordeaux, 16 av Pey Berland 33607 Pessac, France

\* ZM SBARTAI : zm.sbartai@i2m.u-bordeaux1.fr

### RÉSUMÉ

*L'évaluation de l'humidité et de la salinité des bétons est une phase cruciale au diagnostic des structures corrodées dans un contexte de préservation du patrimoine bâti. L'utilisation des techniques d'Evaluation Non Destructive (END) permet d'établir un diagnostic efficace sans endommager la structure. Les ondes électromagnétiques dans la gamme des micro-ondes sont reconnues sensibles à la variation de l'humidité des matériaux diélectriques comme le béton. Le but de cette étude est de développer un outil d'évaluation non destructive de l'humidité des bétons basée sur la propagation des ondes électromagnétiques dans la gamme de fréquences 1 – 3 GHz. La première étape a consisté à mesurer et à modéliser la permittivité des bétons en fonction de leur teneur en eau. En deuxième étape, une simulation numérique d'antennes planaires « patch » a été effectuée par modélisation de la géométrie de l'antenne en utilisant la méthode des éléments finis. Les*

*antennes ont été par la suite conçues et utilisées pour une comparaison entre les simulations numériques et des mesures effectuées dans l'air et dans des bétons à humidité variable.*

### ABSTRACT

*The evaluation of moisture and chloride content of concrete is a crucial phase for the diagnosis of corroded structures in the context of heritage preservation. The use of non-destructive techniques (NDT) allows to carrying out an effective diagnosis. Electromagnetic waves in the microwaves frequencies are recognized as a powerful tool for moisture evaluation of dielectric materials as concrete. The goal of this study is to develop an optimal tool for the evaluation of moisture content on real structures based on electromagnetic waves at frequencies range of 1 to 3 GHz. Numerical simulations of patch antennas were done for*

*optimal design and frequency. A comparison with measurements in air and on concrete having various moisture contents indicated good effectiveness of the developed antennas.*

**Mots-clés :** Humidité, Durabilité, propagation, Permittivité, Radar, GPR

\* \* \*

## 1. INTRODUCTION

Depuis une vingtaine d'années, le système radar ou GPR (Ground Penetrating Radar) est reconnu comme une méthode non destructive incontournable en vue d'une auscultation rapide et efficace des structures de génie civil (ponts, chaussées, etc.). Le radar est un système électromagnétique à impulsion qui émet un rayonnement électromagnétique et enregistre les différents échos liés aux contrastes électromagnétiques. Généralement, il est utilisé pour détecter et localiser les armatures dans le béton, mesurer des épaisseurs (enrobage, dalle, chaussée) et détecter des défauts de structures. Depuis peu, sa sensibilité aux variations d'humidité et de salinité dans les bétons est étudiée [1,2]. Cela est dû essentiellement à la relation entre la permittivité des bétons qui gouverne la propagation des ondes EM et l'humidité ainsi que la salinité des bétons [3,4]. Ces deux paramètres (humidité et salinité) sont deux facteurs d'initiation de la corrosion des armatures dans le béton. L'évaluation de ces deux facteurs (humidité et salinité des bétons) par méthode non destructive comme le radar est une application innovante qui permettra d'améliorer le diagnostic des structures. Cependant, la méconnaissance des caractéristiques des antennes commerciales limite la compréhension des phénomènes d'interaction avec le matériau béton. D'autre part, ces antennes sont également limitées par leur forme puisque leur application principale est la détection. Il est donc important de développer des antennes adaptées à la caractérisation du milieu comme l'évaluation de l'humidité. L'intérêt d'un tel développement est d'une part, la maîtrise de la géométrie, l'intensité, la fréquence et la largeur de la bande d'émission voire le diagramme de rayonnement. D'autre part, la mesure en large bande de fréquences permettrait d'ausculter différentes profondeurs et d'envisager ainsi la caractérisation des gradients de propriétés diélectriques.

L'objectif de notre étude est de développer une antenne avec une géométrie optimisée adaptée à la caractérisation physique des bétons. Pour atteindre cet objectif et améliorer l'auscultation par radar, nous avons mené deux étapes conjointes et complémentaires. La première a consisté à étudier et modéliser les propriétés électromagnétiques des bétons. La deuxième nous a amené à développer des antennes optimisées pour une meilleure sensibilité dans le domaine fréquentiel. Ce papier présente les deux étapes en l'occurrence, la mesure de la permittivité des matériaux cimentaires avec différentes techniques de mesures ainsi que la simulation numériques et le développement des antennes.

## 2. ETUDE DES PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES DES BÉTONS

La mesure du signal électromagnétique est gouvernée par les propriétés diélectriques des bétons. La connaissance de ces propriétés et de leur comportement physique en fonction de l'humidité des bétons est donc très importante pour comprendre l'interaction des signaux avec le matériau béton. L'étude proposée dans cet article porte tout d'abord sur la caractérisation électromagnétique des matériaux constituant les bétons dans la gamme des fréquences radar (de 1 à 3 GHz). Les constituants les plus utilisés dans les bétons sont sans doute le ciment qui est le liant hydraulique et les granulats (sable et graviers). Une première étape a consisté à caractériser ces deux matériaux. Pendant cette étude, l'effet de l'humidité de ces matériaux est pris en compte. L'étude de ces effets se fait en parallèle avec l'analyse du phénomène de dispersion électromagnétique dans les matériaux qui est étudié en modifiant la fréquence de mesure sur une bande proche des fréquences GPR (0,2 à 4 GHz).

Pour une meilleure estimation de l'effet de dispersion et pour étudier une large bande de fréquences la méthode de la sonde à effet de bout a été envisagée [5,6]. Cependant, elle est très sensible à l'état de surface du matériau testé. Concernant les matériaux granulaires (sable et gravier), la mesure en cavité résonante a été utilisée car elle permet d'effectuer des mesures sur des formes géométriques complexes mais la gamme de fréquences est très faible [7]. Nous ne présenterons ici que les résultats de la sonde à effet de bout sur le béton. L'objectif de ces différentes approches est d'obtenir des données précises sur les propriétés des bétons car ces données sont indispensables à l'étude de l'algorithme d'inversion et aux simulations numériques. Les figures 1 et 2 représentent respectivement une cavité résonante connectée à l'analyseur de réseau vectoriel et une sonde à effet de bout.

Les figures 3 et 4 présentent un exemple de résultats de la variation de la permittivité en fréquence pour un béton avec une teneur en eau massique de 7% (17% en volume). Ces figures montrent une dispersion électromagnétique (effet de la fréquence de mesure) dans les faibles fréquences (< 1 GHz). En effet on observe une augmentation assez forte de la permittivité dans les faibles fréquences. Cependant, dans la gamme des fréquences GPR (1-2 GHz), cet effet est négligeable. Notons également que cet effet est négligeable dans le cas d'un béton sec. La dispersion statistique est de l'ordre de plus ou moins 0,5.

Sur la figure 4, la variation de la permittivité est représentée en fonction du degré de saturation. Cette relation a été modélisée par deux modèles analytiques à trois phases CRIM (Complex refractive index model) (Eq.1) et De Looor (Eq.2). Les paramètres ont été ajustés sur les mesures des permittivités des granulats et de la pâte de ciment. La permittivité de la phase liquide a été calculée par le modèle de Debye pour une salinité de 5g/l. Les résultats montrent un bon ajustement du modèle CRIM de la permittivité réelle et imaginaire. Cependant, le modèle De Looor semble sous-estimer la permittivité imaginaire.

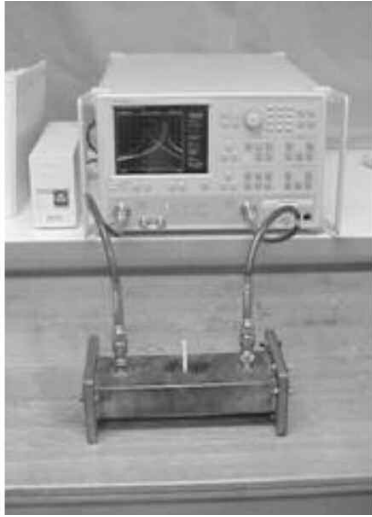


Figure 1 : Cavité resonante à gauche

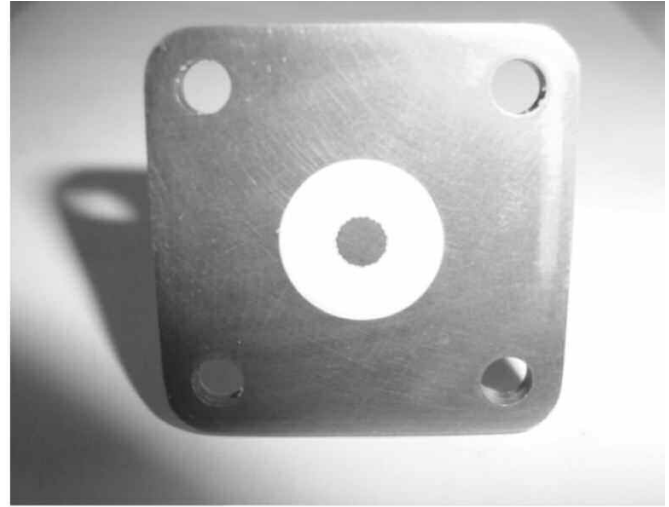


Figure 2 : sonde à effet de bout à droite

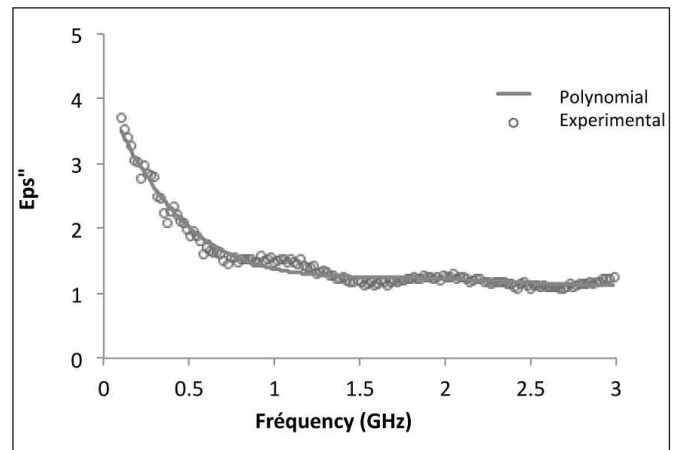
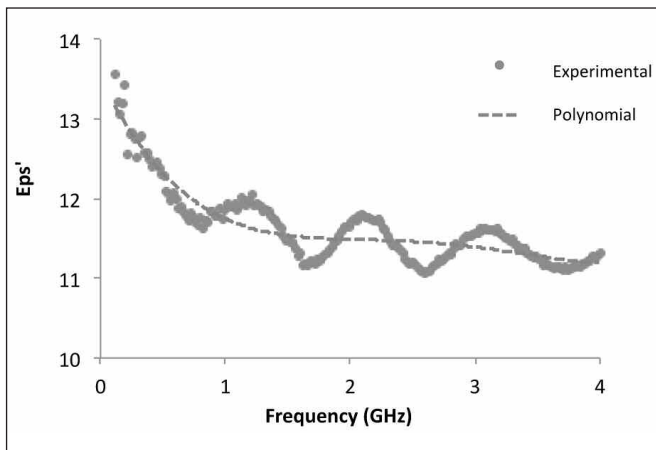


Figure 3 : Permittivité en fonction de la fréquence

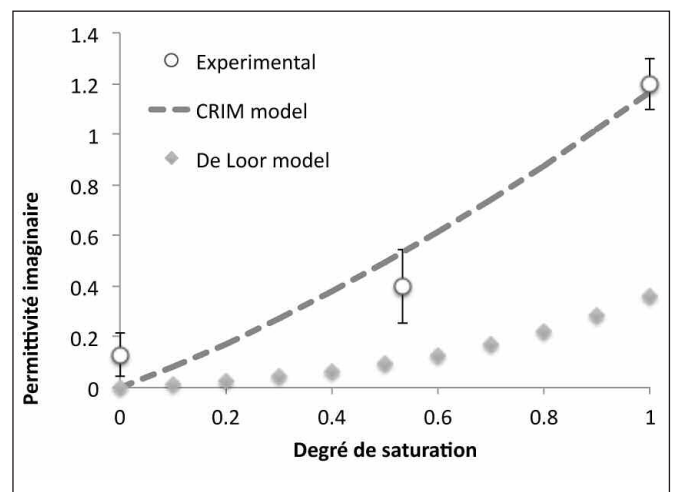
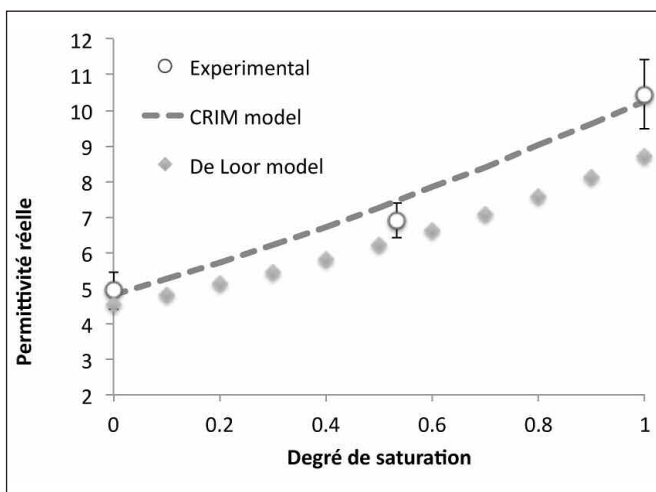


Figure 4 : Permittivité mesurée et modélisée (CRIM et De Loo)

$$\sqrt{\epsilon} = (1 - \phi) \times \sqrt{\epsilon_s} + (1 - S_w) \times \phi \times \sqrt{\epsilon_a} + (\phi S_w \sqrt{\epsilon_{sw}}) \quad (1)$$

$$\frac{\epsilon - \epsilon_s}{3\epsilon} = (1 - \epsilon_w) \phi \frac{\epsilon_a - \epsilon_s}{\epsilon_a - 2\epsilon} + S_w \phi \frac{\epsilon_{sw} - \epsilon_s}{\epsilon_{sw} - 2\epsilon} \quad (2)$$

$\epsilon$  est la permittivité complexe du béton,  $\phi$  est la porosité,  $S_w$  le degré de saturation en eau,  $\epsilon_a$  (permittivité de l'air),  $\epsilon_{sw}$  (permittivité de l'eau dans le béton),  $\epsilon_s$  est la permittivité du solide.

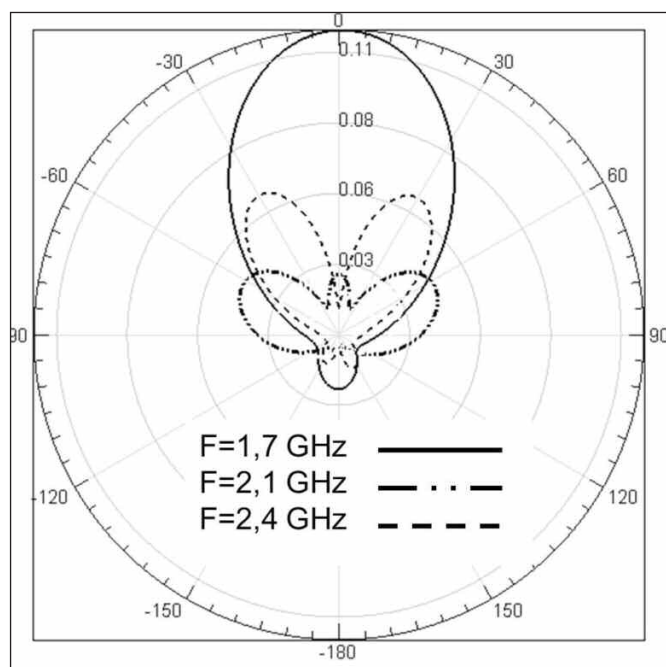


Figure 5 : Diagramme de rayonnement

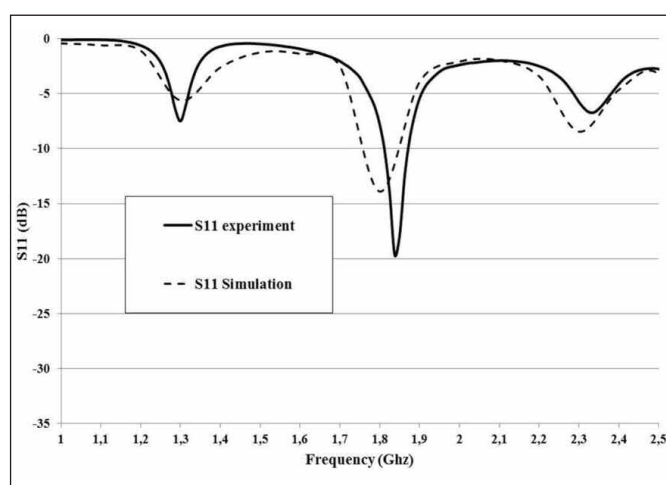


Figure 7 : Comparaison entre mesure et simulation dans l'air (coefficient de réflexion)

### 3. CONCEPTION ET MODÉLISATION D'ANTENNES EM

Nous avons développé un modèle numérique 3D (méthode FEM-logiciel HFSS-ANSYS) qui représente deux antennes et le béton en interaction. L'objectif est de représenter le plus possible la réalité afin d'obtenir un outil précis de simulation des signaux recueillis par les antennes de mesures. Pour choisir la fréquence de résonance, nous avons simulé le diagramme de rayonnement des antennes. Pour une meilleure transmission de l'énergie, une fréquence de 1.7 GHz semble appropriée pour une mesure en surface du béton (Fig 5). A cette fréquence, la figure 6 représente la simulation du champ électrique d'une antenne émettrice placée à côté d'une antenne réceptrice. Cet outil nous a permis de développer et d'optimiser la géométrie des antennes. Les dimensions d'une antenne

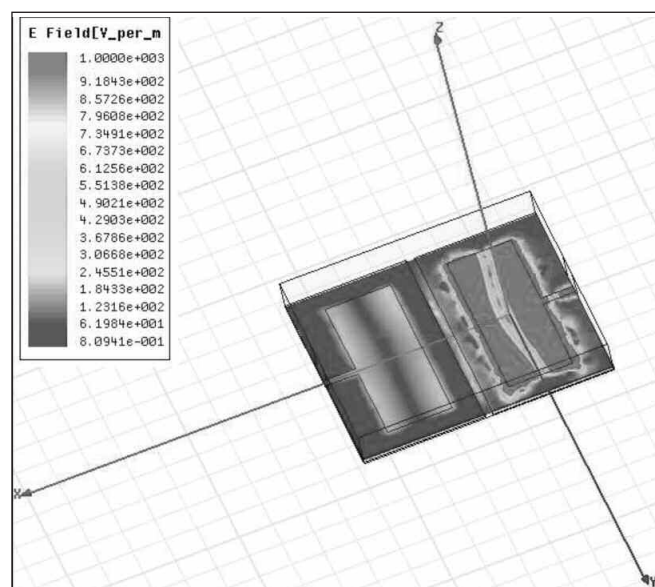


Figure 6 : Simulation du champ électrique

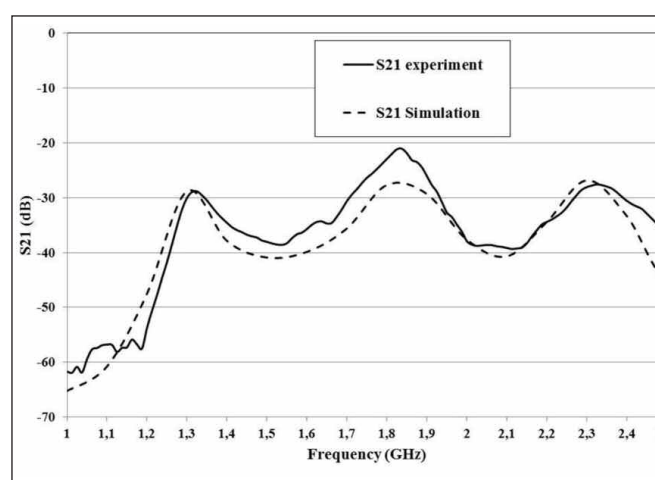


Figure 8 : Comparaison entre mesure et simulation dans l'air (coefficient de transmission)

sont de 12x4x0.2 cm. Notre travail a ensuite consisté à valider notre modèle numérique en effectuant des comparaisons avec des résultats expérimentaux. Les figures 7 et 8 présentent respectivement les simulations et les mesures dans l'air des coefficients de réflexion (S11) et le coefficient de transmission (S21). Ces figures montrent une très bonne concordance entre les calculs et des mesures effectuées dans l'air (permittivité réelle = 1).

Ces antennes réalisées, nous avons testé leur sensibilité à la variation de l'humidité des bétons. Les mesures ont été effectuées en réflexion et en transmission. Notons que la transmission est plus intéressante car elle ne nécessite pas l'existence d'un réflecteur et n'est pas sensible à la variation de sa géométrie ni de sa position. La figure 9 représente une image de la mesure réalisée avec un jeu d'antennes sur un béton et connectées à un analyseur de réseaux vectoriel. Le signal émis est un carré de largeur fixe égale à 40 MHz. Un balayage fréquentiel est effectué



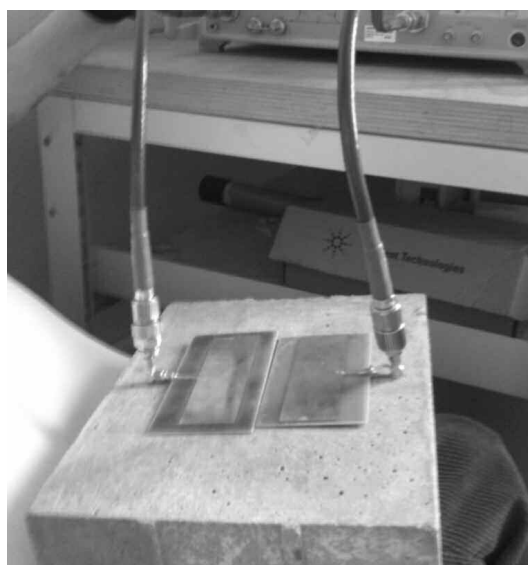


Figure 9 : Mesure des antennes sur béton

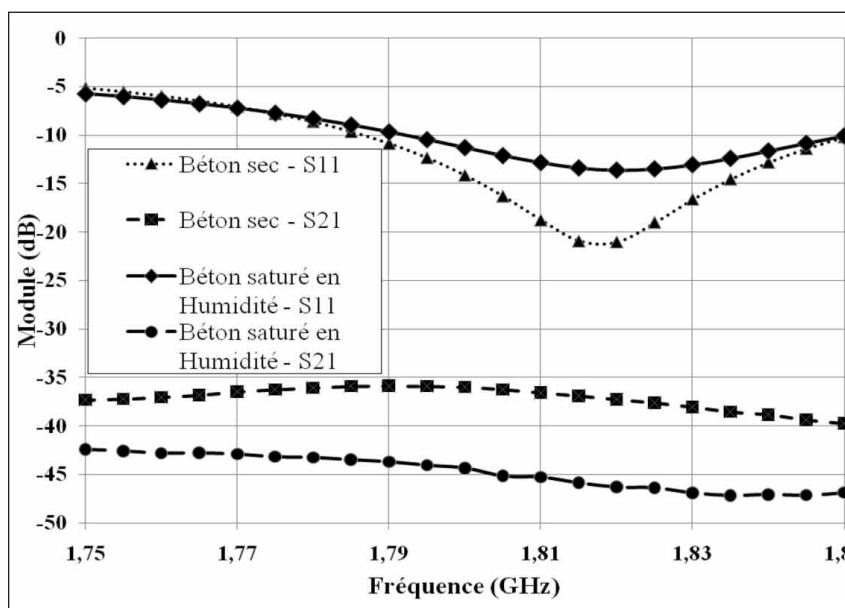


Figure 10 : Comparaison entre mesures en réflexion et en transmission sur béton saturé et sec à l'air

tous les 10 MHz entre 1 GHz et 4 GHz. Ces mesures fréquentielles montrent un bon contraste des mesures en réflexion et en transmission enregistrées sur deux dalles d'un même béton pour deux taux d'humidité (Fig. 10). Sur la courbe du signal transmis, une sensibilité maximale est enregistrée à une fréquence proche de 1,8 GHz avec une atténuation de l'ordre de 8 dB entre un béton saturé et un béton humide séché à l'air libre. Cependant, une étude statistique reste à faire pour évaluer la qualité du matériel développé dans le cadre de cette étude (répétition des mesures, multiplication des échantillons, tests sur d'autres taux de saturation, etc.).

## 4. CONCLUSIONS

La phase de modélisation nous a permis de dimensionner et de réaliser un premier jeu d'antennes. Parallèlement nous avons réalisé des dalles à deux taux d'humidité. Les mesures obtenues montrent une concordance des simulations avec les mesures réalisées. D'autre part, les mesures montrent une perte d'énergie de l'ordre de 8 dB entre un béton peu humide (humidité ambiante) et un béton saturé. Les premiers résultats de cette étude sont encourageants et nous permettront d'une part d'étudier l'effet de la salinité et d'autre part de développer un algorithme d'inversion qui liera les paramètres mesurés (coefficients de transmission et de réflexion) à l'humidité des bétons. Il est également envisagé dans cette étude de développer d'autres géométries d'antennes large bande.

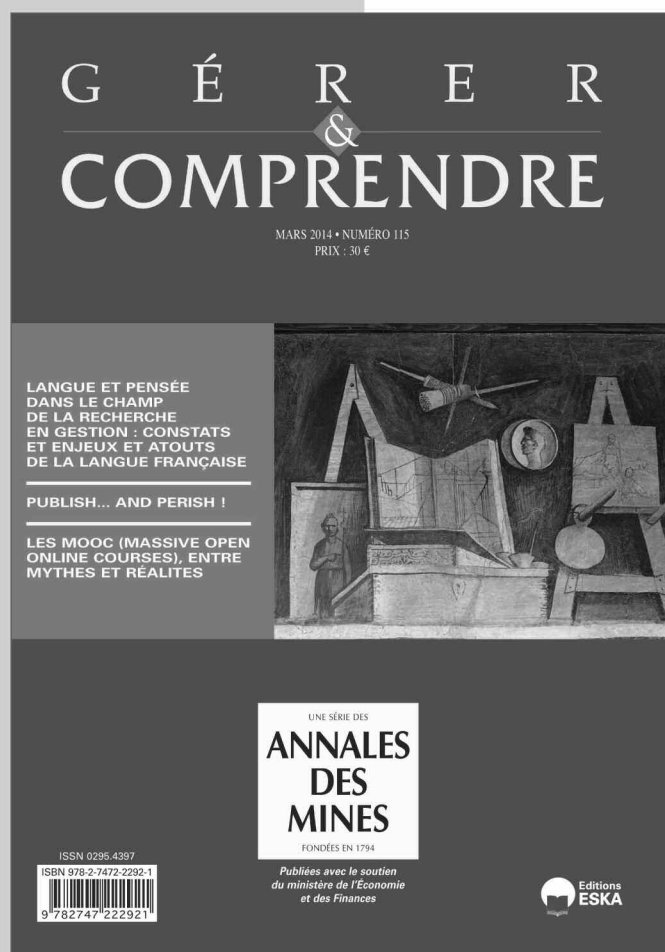
## RÉFÉRENCES

- [1] Sbartaï ZM, Laurens S, Balayssac J-P, Arliguie G, Ballivy G, Ability of the direct wave of radar ground-coupled antenna for NDT of concrete structures. NDT & E International, Volume 39, Issue 5, July 2006, Pages 400-407.
- [2] Klysz G, Balayssac J.-P. Determination of volumetric water content of concrete using ground-penetrating radar. Cement and Concrete Research, 37 (2007) 1164-1171
- [3] Robert A. Dielectric permittivity of concrete between 50 MHz and 1 GHz and GPR measurements for building materials evaluation, Journal of applied geophysics, Vol 40, 1998, pp 89-94.
- [4] Derobert Xavier, Villain Géraldine, Cortas Rachid, Chazelas Jean Louis. EM characterization of hydraulic concretes in the GPR frequency-band using a quadratic experimental design. NDTCE, Nantes, France, 2009.
- [5] Stuchly M. A. and Stuchly S. S. « Coaxial line reflection method for measuring dielectric properties of biological substances at radio and microwave frequencies- A review » IEEE Trans Instrum. Meas. 1980, vol IM-29, pp 176-183.
- [6] Mosig J.R., Besson J. C. E., Gex-Fabry M. and Gardiol F.E. « Reflection of an open-ended coaxial line and application to non destructive measurements materials » IEEE Trans Instrum. Meas., 1981, vol IM-30, pp 46-51.
- [7] Demontoux F, Le Crom. B, ruffié J.P, Wigneron J.P, Grant V.L, Mironov, Lawrence H. Electromagnetic characterization of soil-litter media : application of the microwave emissivity of the ground surface in forest. European journal of applied physics, Vol 44, 2008, pp 303-315.

# G É R & E R

# COMPRENDRE

## SOMMAIRE



- **LANGUE ET PENSÉE DANS LE CHAMP DE LA RECHERCHE EN GESTION : CONSTATS ET ENJEUX ET ATOUS DE LA LANGUE FRANÇAISE**  
Par Jean-François CHANLAT
- **PUBLISH... AND PERISH !**  
Par Sylvie CHEVRIER
- **LES MOOC (MASSIVE OPEN ONLINE COURSES), ENTRE MYTHES ET RÉALITÉS**  
Par Philippe DURANCE
- **LES OBSTACLES À LA GESTION DES RISQUES PSYCHO-SOCIAUX : QUATRE PISTES D'ANALYSE**  
Par Wim VAN WASSENHOVE
- **LES INSTITUTIONS ACADÉMIQUES FACE AUX COMPORTEMENTS DÉVIANTS DE LEURS ÉTUDIANTS. LE CAS D'UNE BUSINESS SCHOOL FRANÇAISE**  
Par Safwan MCHAWRAB, Aurélien ROUQUET et Jean-Baptiste SUQUET
- **CONTRE LA THÈSE DE LA MARCHANDISATION DU SOCIAL : L'EXEMPLE DES TRAVAILLEURS HANDICAPÉS EN ÉTABLISSEMENTS ET SERVICES D'AIDE PAR LE TRAVAIL (ESAT)**  
Par Benoit CRET et Guillaume JAUBERT
- **POUR UNE SOCIOLOGIE UTILE : LA SOCIOLOGIE D'INTERVENTION**  
Par Denis BERNARDEAU MOREAU
- **Pascal FUGIER**  
**DE LA VIOLENCE ORDINAIRE DANS LES ORGANISATIONS**  
À propos du livre de Gilles Herreros, *La violence ordinaire dans les organisations. Plaidoyer pour des organisations réflexives*, Toulouse, Éditions Érès, 2012.
- **Yannick LEMARCHAND**  
**REIMAGINING BUSINESS HISTORY**  
À propos du livre de Philip Scranton et de Patrick Fridenson, *Reimagining Business History*, Baltimore, John Hopkins University Press, 260 p., 2013.
- **Christophe VIGNON**  
**SURVIVRE, C'EST RÉSISTER UN APPEL À LA RESISTANCE LANCÉ AUX CADRES**  
À propos de l'ouvrage de Jean-Philippe Bouilloud, *Entre l'enclume et le marteau : les cadres pris au piège*, Seuil, 2012.

MARS 2014  
ISSN 0295.4397  
ISBN 978-2-7472-2292-1

### BULLETIN DE COMMANDE

A retourner aux Éditions ESKA, 12, rue du Quatre-Septembre, 75002 PARIS

Tél. : 01 42 86 55 65 - Fax : 01 42 60 45 35 - <http://www.eska.fr>

☐ Je désire recevoir ..... exemplaire(s) du numéro de **Gérer & Comprendre** Mars 2014 - numéro 115 (ISBN 978-2-7472-2292-1) au prix unitaire de 30 € TTC + 3,50 € de frais d'envoi.

Je joins ☐ un chèque bancaire à l'ordre des Éditions ESKA

☐ un virement postal aux Éditions ESKA CCP PARIS 1667-494-Z

Nom ..... Prénom .....

Adresse .....

Code postal ..... Ville .....