

---

# Développement d'un outil d'évaluation non destructive des bétons par ondes EM - Simulation et validation expérimentale.

M. Sbartai<sup>1\*</sup>, F. Demontoux<sup>2</sup>, A. Dulac<sup>1,2</sup>, Sylvain Bernadet<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Université de Bordeaux, I2M UMR 5295, Département de génie civil Environnemental, CNRS, INRA, France.

<sup>2</sup>Université de Bordeaux, IMS UMR 5218, 16 av Pey Berland 33607 Pessac, France

[\\*zm.sbartai@us2b.u-bordeaux1.fr](mailto:*zm.sbartai@us2b.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 et de la salinité des bétons basée sur la propagation des ondes électromagnétiques dans la gamme de fréquences 1 – 3 GHz. Une simulation numérique d'antennes rectangulaires « 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 chlorides 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 micro-waves 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 and chlorides content on real structures based on electromagnetic waves at frequencies range of 1 to 3 GHz. Numerical simulations of rectangular antennas was done for optimal design and frequency. A comparison with measurements in air and on concrete having various moisture content indicated good effectiveness of the developed antennas.*

*MOTS-CLÉS : END, humidité béton, onde électromagnétique, antenne, radar.*

*KEYWORDS: NDT, concrete moisture, electromagnetic wave, antenna, 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,...). Le radar est un système électromagnétique à impulsion qui émet un rayonnement électromagnétique et enregistre les différents échos des 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 (Sbartai et al., 2006 ; Klysz et al., 2007). 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 (Robert, 1998). 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 et la salinité.

L'objectif de notre étude est de développer une antenne avec une géométrie optimisée adaptée à la caractérisation physique des bétons in situ. Pour atteindre cet objectif et améliorer l'auscultation par radar, nous avons mené trois approches conjointes et complémentaires. La première a consisté à étudier les propriétés électromagnétiques des bétons, la deuxième nous a amené à développer des antennes optimisées pour une meilleure sensibilité et la troisième nous permettra de définir un algorithme liant nos paramètres de mesure à la salinité et l'humidité des bétons. Ce papier présente les deux premières étapes en l'occurrence, la mesure de la permittivité des matériaux cimentaires (ciment, mortier, bétons) 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 radar est gouvernée par les propriétés électromagnétiques des bétons. La connaissance de ces propriétés et de leur comportement physique en fonction de l'humidité et la salinité des bétons est donc très importante pour comprendre l'interaction du signal radar avec le matériau béton. L'étude proposée dans ce papier porte tout d'abord sur la caractérisation électromagnétique des matériaux constituant les bétons dans la gamme des fréquences radar (de 1 à 3 GHz).

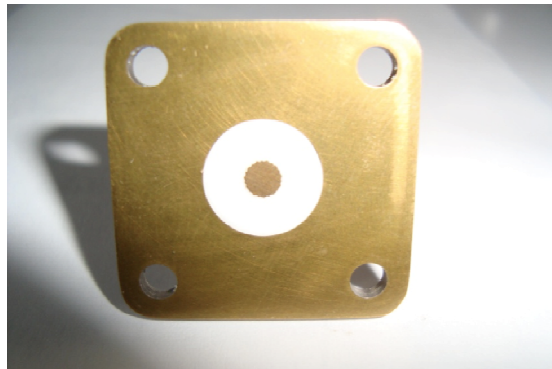
## Développement d'un outil d'évaluation non destructive des bétons par ondes EM

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 (1 à 3 GHz).

Pour une meilleure estimation des propriétés diélectriques, deux techniques de mesures ont été envisagées. La technique par sonde à effet de bout « terminaison ouverte » permet une mesure sur une gamme de fréquence élevée. Elle est très sensible à l'état de surface des matériaux. La mesure en cavité résonante est très précise mais ne donne une information que sur une très faible gamme de fréquences (Demontoux et al., 2008). 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 au générateur d'ondes EM « Analyseur réseau vectoriel » et une sonde à effet de bout. On montre sur les figures 3 et 4 un exemple de résultats de la variation de la permittivité en fréquence pour un béton avec une teneur en eau massique de 7% (15% en volume). Ces figures montrent une dispersion électromagnétique (effet de la fréquence de mesure) dans les faibles fréquences (< 1 GHz). Cependant, dans la gamme des fréquences GPR, cet effet est négligeable. On note également une dispersion statistique de l'ordre de 0.5.



*Figure 1. Cavité résonante*



*Figure 2. Sonde à effet de bout (sonde à terminaison ouverte)*

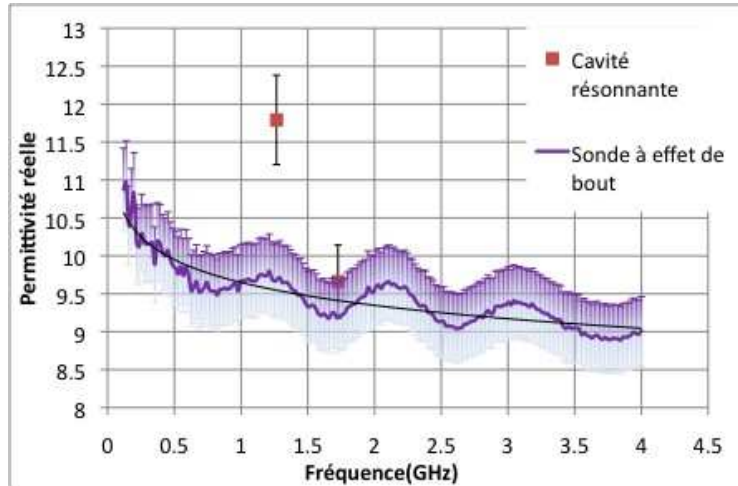


Figure 3. Permittivité réelle (béton saturée)

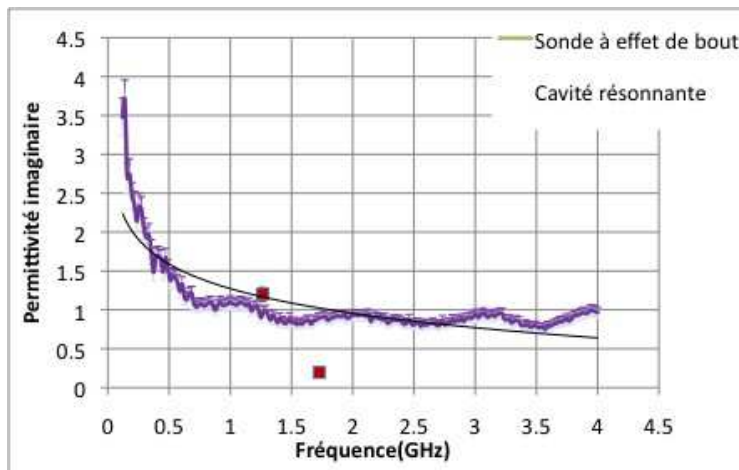


Figure 4. Permittivité imaginaire (béton saturée)

### 3. Modélisation

Nous avons développé un modèle numérique 3D (méthode FEM-logiciel HFSS-ANSOFT et ANSYS NLT) qui représente nos 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

## Développement d'un outil d'évaluation non destructive des bétons par ondes EM

figure 6 représente la simulation du champ électrique d'une antenne émettrice placée à coté d'une antenne réceptrice.

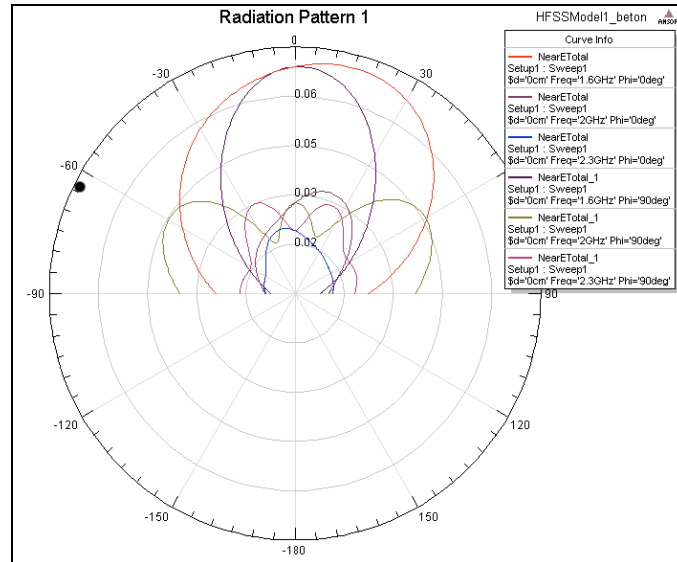


Figure 5. Diagramme de rayonnement à différentes fréquences

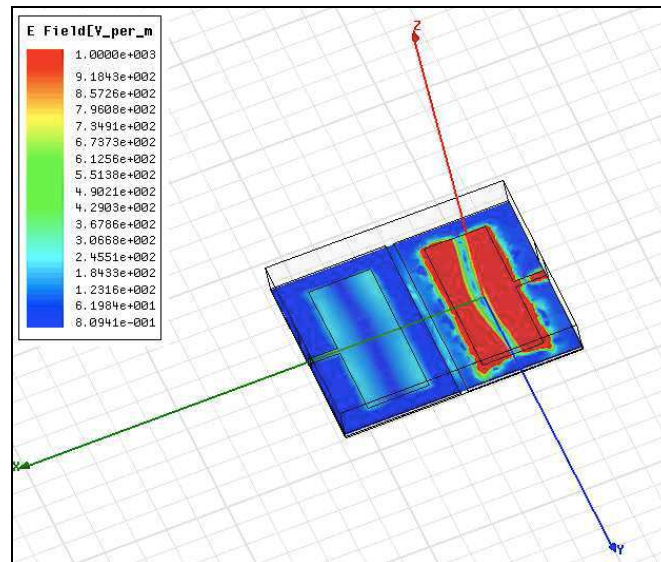
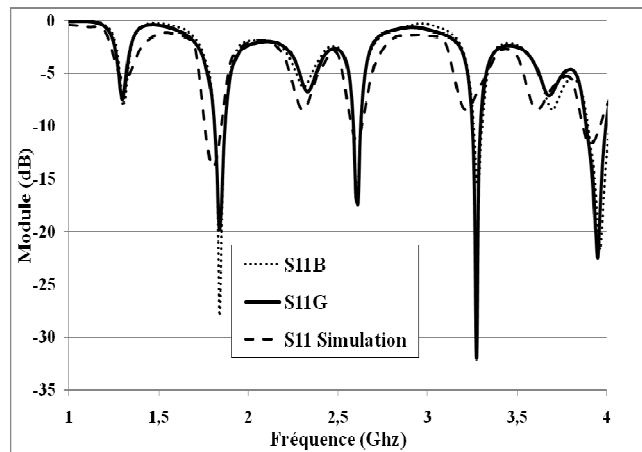


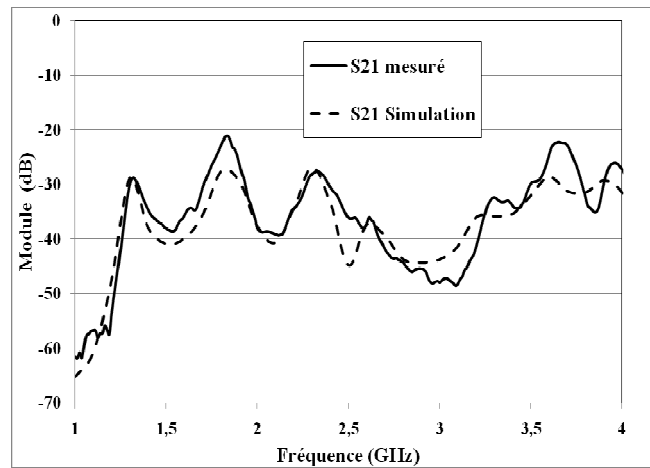
Figure 6. Simulation du champ électrique à 1.7 GHz

Cet outil nous a permis de développer et d'optimiser la géométrie de nos

antennes. Les dimensions d'une antenne 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 montrent une très bonne concordance entre les calculs et des mesures effectuées dans l'air (permittivité réelle = 1).



**Figure 7.** Paramètres  $S_{11}$  obtenus par simulation des antennes patch et mesures avec les deux antennes placées dans l'air



**Figure 8.** Paramètres  $S_{21}$  obtenus par simulation des antennes patch et mesures avec les deux antennes placées dans l'air

## Développement d'un outil d'évaluation non destructive des bétons par ondes EM

Ces antennes réalisées, nous avons testé la sensibilité de l'humidité des bétons à des mesures en réflexion et en transmission. La figure 9 représente une image de la mesure réalisée avec un jeu d'antennes sur un béton. Les antennes sont connectées à un analyseur réseau avec balayage fréquentiel. Ces mesures fréquentielles montrent un bon contraste des mesures en réflexion et en transmission enregistrées sur deux dalles d'un même béton pour différentes humidités (Fig. 10). 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.

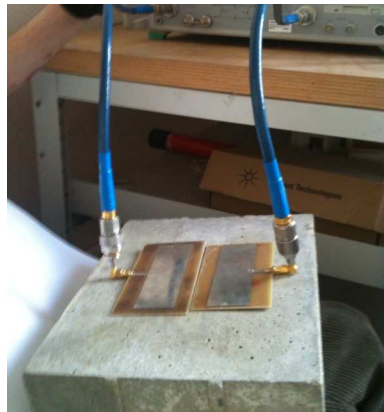


Figure 9. Mesure sur béton, les antennes développées sont directement connectées à l'analyseur réseau

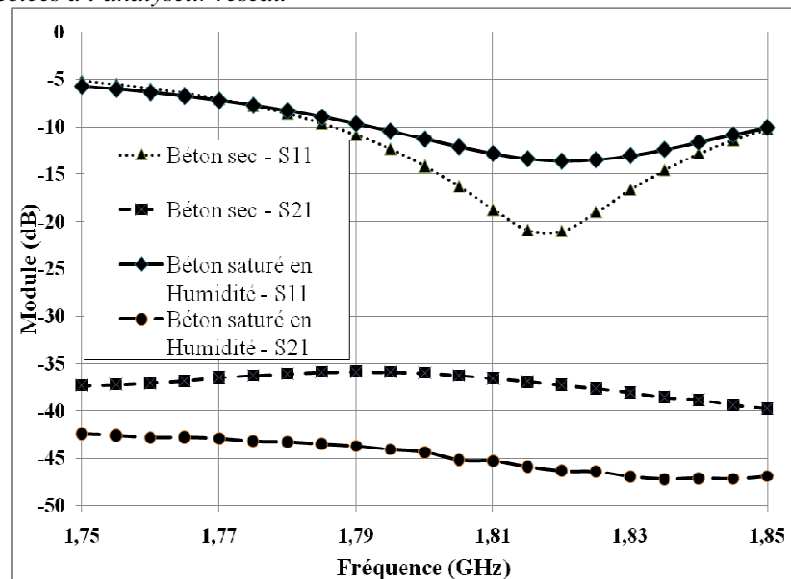
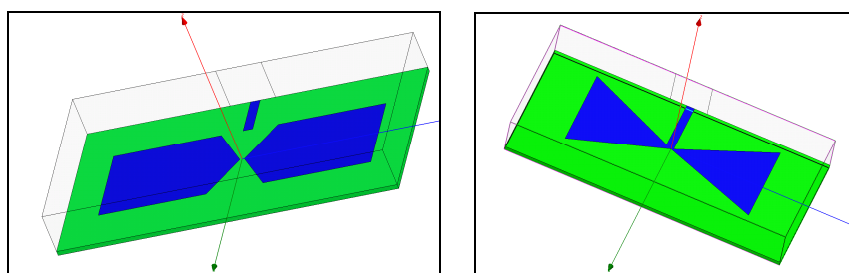


Figure 10. Paramètres S11 (réflexion) et S21 (transmission) obtenus par mesures sur un béton saturé et un béton séché dans l'air libre.

## Conclusion

La phase de modélisation nous a permis de dimensionner et de réaliser un premier jeu d'antennes. Parallèlement nous avons réalisé des dalles de différents types de bétons avec des humidités variables. 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 (figure 11).



*Figure 11. Simulation de nouvelles antennes pour une meilleure optimisation de la mesure*

## Bibliographie

- 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.
- Klysz G., Balayssac J.-P. Determination of volumetric water content of concrete using ground-penetrating radar. Cement and Concrete Research 37 (2007) 1164–1171
- 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.
- Sbartai 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.