



L'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150-1 UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

Solution quasi universelle au problème récurrent de la détermination des caractéristiques électromagnétiques de tous types de matériaux dans le domaine des hyperfréquences

Quasi-universal solution to measure the electromagnetic characteristics of every kind of materials in microwave region

Auteurs : GEORGET Elodie, ABDEDDAIM Redha, SABOUROUX Pierre

Aix Marseille Université, CNRS, Ecole Centrale Marseille, Institut Fresnel, 13013 Marseille, France,
elodie.georget@fresnel.fr, redha.abdeddaim@fresnel.fr, pierre.sabouroux@fresnel.fr

Mots-clefs : Caractérisation électromagnétique – matériaux solides, granulaires, liquides, substrats souples
Key words : Electromagnetic characterisation, Solids, Granular materials, liquids, tissues

Résumé

Depuis l'avènement de l'électromagnétisme dans les années 40 [1] avec l'entrée des télécommunications sans fil dans la vie courante, connaître avec la plus grande précision les caractéristiques électromagnétiques des matériaux mis en œuvre est devenu, et reste une préoccupation principale. Actuellement un grand nombre de techniques et de savoir-faire existent, cependant, un appareil de type *Epsilonmètre* n'est toujours pas disponible pour le grand public. Quelques solutions techniques sont éventuellement disponibles avec néanmoins des limitations substantielles. Ces solutions ne sont pas toujours simples à utiliser pour la permittivité et/ou la perméabilité complexes. En outre, suivant le type de matériau étudié, qu'il soit solide, en poudre ou bien encore liquide, la solution technique diffère... Pour tenter de résoudre quasiment toutes les limitations, une solution basée sur une configuration en propagation guidée et utilisant un Porte Echantillon Universel a été développée. Actuellement, le système est validé dans le cadre de matériaux solides, liquides, granulaires ou pulvérulents [2]. Nous testons aujourd'hui le système dans le cas de matériaux fins et souples pour des caractérisations de substrats souples utilisés de plus en plus, notamment en RFiD.

Introduction

A l'heure actuelle, bien connaître les valeurs réalistes et non pas seulement les valeurs de la littérature des caractéristiques électromagnétiques des matériaux, devient un besoin incontournable pour tous les utilisateurs de ces matériaux dans le domaine des radiofréquences et des hyperfréquences. Cette connaissance précise doit passer par une étape de mesures. Or, à ce jour, comme nous l'avons déjà souligné dans le résumé, il n'y a pas d'appareil dédié à ce type de mesures ; seulement des moyens plus ou moins complexes qui nécessitent des savoir-faire et une connaissance approfondie des phénomènes. C'est dans ce contexte que nous proposons la solution décrite dans cet article qui se trouve être une première étape à l'établissement d'un moyen plus autonome, à savoir, un *Epsilonmètre*. La problématique de cette étape est de concevoir et surtout de valider un moyen de mesure permettant de répondre aux besoins en caractérisations de tous les types de matériaux, qu'ils soient solides, semi-solides (granulaires, pulvérulents, gels, ...) ou encore liquides. Pour répondre donc à ce besoin, nous avons étudié un système de mesure en configuration propagation guidée large bande avec une zone utile dans laquelle tous les types de matériaux peuvent y être confinés.

Ce système universel de positionnement et de confinement des matériaux sous test dans une cellule de mesure, aujourd'hui breveté, est la première étape à la constitution de ce moyen autonome de mesure. Ce système universel de confinement de matériaux sous test est associé au concept de base *EpsiMu*® [2] qui lui-même exploite, à la base, le protocole Nicolson & Ross. Le concept de base *EpsiMu*® est validé depuis plusieurs années avec des matériaux solides [3], d'une part, par notre équipe et d'autre part, par des industriels ayant des besoins récurrents dans ce domaine. Des modifications associées à des simplifications permettent maintenant de proposer un système ultra simple pouvant être implémenté sur n'importe quelle chaîne de mesures vectorielles. Le concept de base *EpsiMu*® a pour but d'en proposer une utilisation très simple voire intuitive.

Dans cet article, après avoir présenté la technique (moyens expérimentaux et formalisme de dépouillement), nous présenterons des résultats appuyés soit de comparaisons à des données présentes dans la littérature, soit à des

utilisations de ces données dans certaines problématiques. Par exemple, nous simulons une antenne monopôle sur un substrat souple dont on a déterminé au préalable, les caractéristiques électromagnétiques.

1. Description de la cellule expérimentale

La cellule est une ligne coaxiale originale munie d'un Porte Echantillon indépendant et interchangeable. Ce Porte Echantillon est conçu de telle sorte qu'il soit possible de positionner, de confiner, toutes natures de matériaux du solide (les échantillons seront usinés aux dimensions internes du Porte Echantillon), aux liquides injectés dans la zone de confinement via des microtubes. Enfin pour les autres types de matériaux semi-solides plusieurs solutions sont utilisées : soit des positionnements par compactage pour les matériaux granulaires ou pulvérulents, ou par moulages pour les matériaux sous forme de gels ou par polymérisation (résines, ciments, plâtres...) directement dans la zone utile. Dans le cas des matériaux souples, souvent de faibles épaisseurs comme c'est le cas pour les substrats souples, des échantillons usinés aux dimensions de la cellule sont positionnés dans la zone échantillon.

La cellule de mesures est une ligne de propagation à dimensions variables¹ (figure 1 et 2) [4] avec comme dimensions pour les diamètres extrêmes 7 mm (connecteur PC7) et 13 mm (zone échantillon) tout en conservant une impédance caractéristique de 50 Ω.

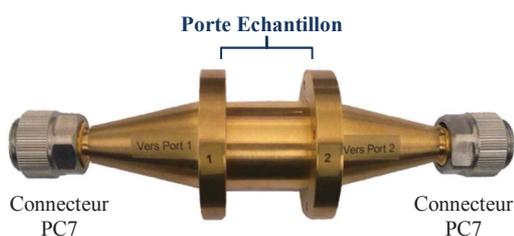


Figure 1 : Image de la cellule à Porte Echantillon

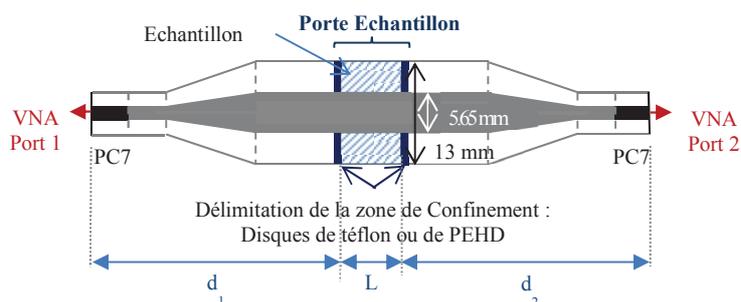


Figure 2 : schéma côté de la cellule à Porte Echantillon

2. Description des traitements de données

Associés à cette solution technique, des algorithmes permettent de déterminer les caractéristiques électromagnétiques des matériaux sur toute la bande de fréquences choisie à partir de la matrice S mesurée à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel. Ces algorithmes ont pour point de départ la méthode de Nicolson & Ross [5, 6] auxquels on associe des opérations de *de embedding* [7], une technique des moindres carrés [8] et un modèle électrique simple de la cellule déterminé expérimentalement (longueurs électriques et affaiblissement linéique).

La ligne coaxiale est étudiée dans son mode fondamental de propagation à savoir, le mode Transverse ElectroMagnétique (TEM). Les pertes linéiques α de la ligne coaxiale sont évaluées à partir de la relation :

$\alpha = -\frac{\ln(|S_{21, cellule vide}|)}{d_1 + L + d_2}$ (figure 2) et avec k la constante de propagation. La méthode Nicolson & Ross [5] est alors utilisée et les expressions pour la permittivité et la perméabilité s'expriment :

$$\mu_r^* = j \frac{c}{2\pi f L} \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right) [-\ln(T) - (j\theta(T) + 2\pi n)] \quad \varepsilon_r^* = j \frac{c}{2\pi f L} \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right)^{-1} [-\ln(T) - (j\theta(T) + 2\pi n)]$$

Avec T et Γ exprimés à partir de la matrice S mesurée de l'échantillon.

Afin de corriger les divergences qui peuvent apparaître, on utilise une méthode non linéaire des moindres carrés [8].

3. Résultats obtenus

Pour valider dans sa globalité cette technique dite universelle, nous l'avons testée sur des échantillons de différentes natures physiques, à savoir solides, semi-solides et liquides. Pour chaque type de matériaux, deux traitements sont présentés : celui obtenu directement avec la méthode de Nicolson et Ross (NR) et celui de la méthode des moindres carrés (NLSQ). La bande de fréquence de l'étude est comprise entre 100 MHz et 10 GHz.

3.1. Matériau solide : PEHD

Pour les solides, nous avons choisi de tester la technique sur un matériau très classique, du PolyEthylène Haute Densité (PEHD) [10]. Ce matériau a été testé avec d'une part, la cellule 13mm et d'autre part, avec une cellule de référence : une ligne coaxiale simple (ligne à air 7mm [2]) (figure 3) Les résultats obtenus sur deux échantillons de (PEHD) avec deux cellules de mesures différentes (ligne à air 7 mm et cellule conique 13 mm) sont représentés sur la figure 3.

¹ Brevet FR/1101697 / WO2012/164229



Figure 3 : Cellule 7mm

Cellule 13mm - coaxiale conique

Sur la figures 4, sont regroupés les résultats obtenus avec la Cellule Conique 13 mm et ceux obtenus avec la simple cellule coaxiale 7 mm.

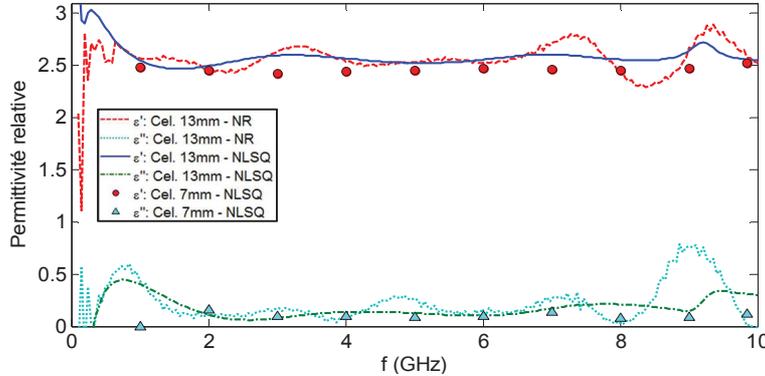


Figure 4 : Matériau Solide : Polyéthylène Haute Densité (PEHD)

3.2. Matériau Granulaire : Sable

Pour les semi-solides, la technique a été validée à partir d'échantillons de sable de la Dune du Pilat [11] tamisé pour avoir une granulométrie contrôlée des particules comprise entre 200 et 300 μm . Les résultats ont été confrontés à ceux obtenus à partir de mesures effectuées en espace libre des champs diffractés par une sphère de PMMA (Plexiglas) remplie de ce même sable. Les valeurs de permittivité ont été alors obtenues en minimisant un critère de comparaisons entre les mesures et des résultats de modélisation à partir d'un modèle analytique de Mie [12].

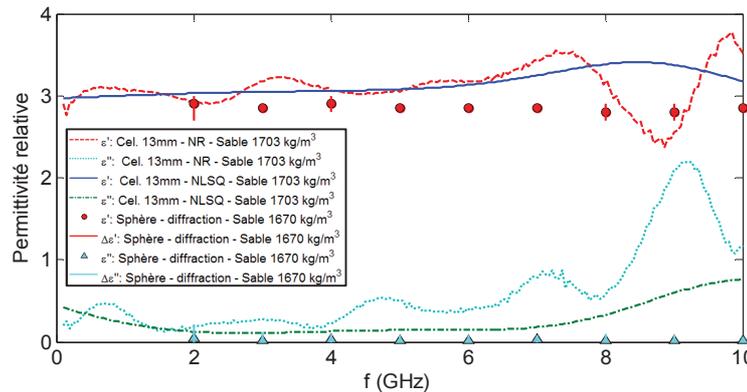


Figure 5 : Matériau Granulaire : Sable

La densité du sable dans cette sphère est un peu plus faible que la densité du sable dans le Porte Echantillon d'EpsiMu®, ce qui explique les écarts légers observables entre les divers résultats.

3.3. Matériau fin : Substrat Souple

L'échantillon est conditionné par un empilement de rondelles de substrat souple dans un porte échantillon. Les résultats obtenus avec les deux méthodes de traitement des mesures sont cohérents (figure 6.1). Cependant, du fait

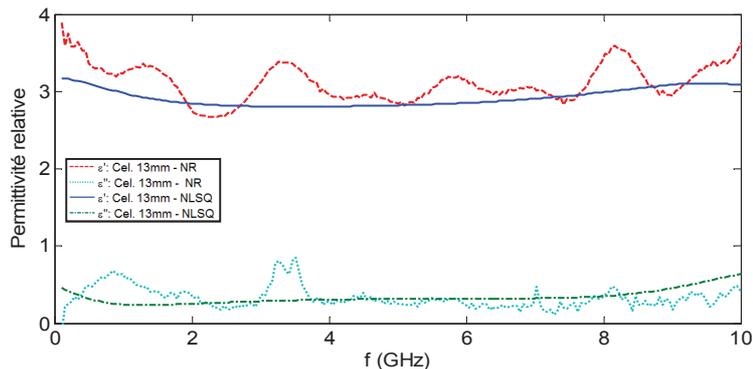


Figure 6.1 : Matériau fin : Substrat Souple, Echantillon constitué par un empilement de 10 rondelles de substrat souple d'épaisseur unitaire de 0,27 mm

qu'aucune valeur tabulée dans la littérature ne soit disponible, la seule solution pour valider ces valeurs réside en une simulation d'un élément rayonnant utilisant comme substrat cette toile enduite. Ainsi, une antenne monopôle imprimée sur ce substrat souple est simulée en prenant comme valeur de permittivité celle qui a été obtenue via la mesure. En outre, un prototype de cette antenne a été réalisé et mesuré en termes d'adaptation. Il s'avère que les résultats de la simulation et de la mesure, correspondent parfaitement (figure 6.2).

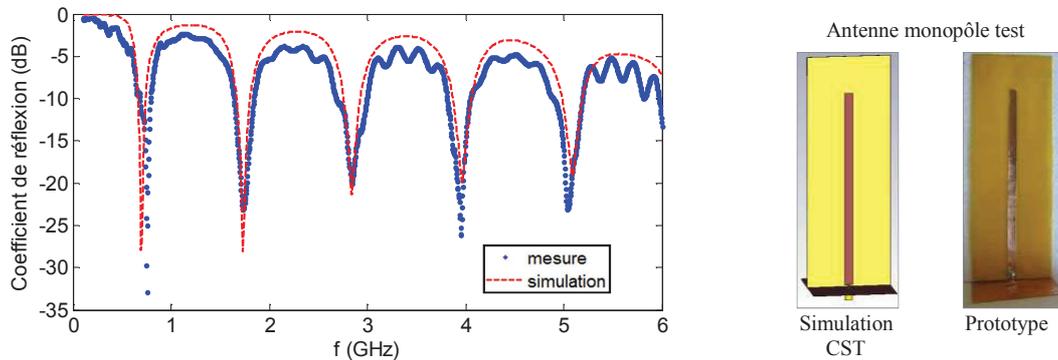


Figure 6.2 : Coefficient de réflexion de l'antenne monopôle sur substrat souple ($\epsilon_r^* = (3,0 - j 0,4)$)

3.4. Matériau Liquide : Ethanol

Concernant les liquides, après avoir adapté avec des microtubes un Porte Echantillon pour remplir la zone utile avec les liquides à tester (figure 7), nous avons comparé les résultats obtenus sur un échantillon d'éthanol à des résultats de la littérature [13, 14].



Figure 7 : Porte Echantillon « Liquides »

Pour valider la caractérisation de matériaux liquides, la mesure a été effectuée sur un échantillon d'éthanol avec un Porte Echantillon de 6 mm (volume utile 0.65 cm³). Les résultats ont été comparés à des valeurs extraites de la littérature [14] et obtenues à via une autre technique de la sonde à effet de bout. Cette technique est celle que l'on retrouve classiquement dans la caractérisation électromagnétique de liquides.

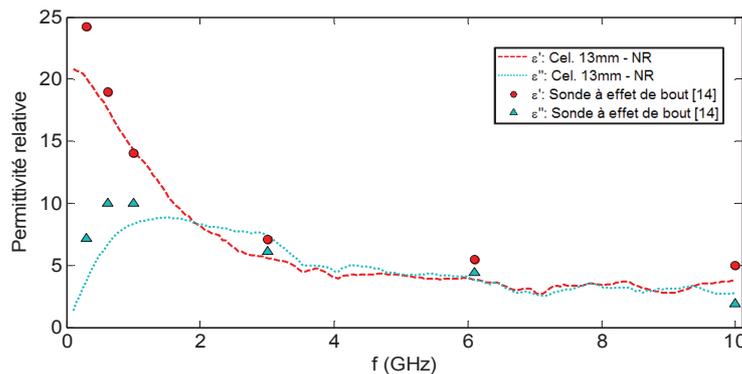


Figure 8 : Matériau liquide : Ethanol

Conclusion et perspectives

La technique utilisant une cellule coaxiale munie d'un Porte Echantillon ouvre des perspectives extrêmement vastes. En effet, dans ces conditions la nature physique même des matériaux à caractériser électromagnétiquement n'est plus un obstacle ou une limitation. Ainsi, un seul outil pourra répondre à toutes les interrogations qui pourront se poser quant à la solution à choisir pour un type de matériaux donné.

En outre, le fait d'utiliser un Porte Echantillon indépendant de la cellule et interchangeable, permet de préparer un échantillon d'une manière indépendante de la mesure micro-onde. C'est important si le lieu de préparation de l'échantillon à tester est différent de celui de la mesure micro-onde même. A titre d'exemple, le matériau à tester est un liquide biologique nécessitant un environnement stérile. Dans ces conditions, on peut d'une part stériliser un Porte

Echantillon et d'autre part, positionner l'échantillon dans le Porte Echantillon dans une enceinte stérile. Reste ensuite à le positionner dans la cellule de mesure qui n'est pas obligatoirement dans un environnement stérile. Ainsi la personne qui prépare l'échantillon n'est pas forcément la même personne qui procède à la mesure micro-onde.

Ce nouveau système a donc été validé sur différentes natures de matériaux tout en les recoupant soit avec d'autres résultats expérimentaux ou de la littérature soit avec des applications sensibles aux résultats obtenus.

Par rapport aux perspectives, il est difficile, aujourd'hui, de faire une liste exhaustive des perspectives qui sont envisageables. Nous citerons à titre d'exemples, l'adaptation du protocole et du porte échantillon de mesures à l'étude de l'influence de la compacité et de l'humidité des sols remaniés suivant leurs constitutions. En outre, en instrumentalisant le Porte Echantillon, nous allons procéder à des études de la variation des caractéristiques électromagnétiques en fonction de mélanges de liquides en flux dynamiques. Il sera alors intéressant d'appliquer cette technique à la détection de produits différents du liquide principal (exemple mélange éthanol / eau).

Remerciements

Nous remercions Thomas Lepetit pour sa collaboration dans la réalisation de l'algorithme de calcul des moindres carrés.

Nous tenons à remercier également Christelle Eyraud et Jean-Michel Geffrin qui nous effectués les campagnes de mesures dans la chambre anéchoïque du CCRM de Marseille sur la sphère de PMMA remplie de sable et qui ont procédé aux dépouillements des mesures pour nous fournir au final les valeurs de permittivités à partir de mesures en espace libre.

Références bibliographiques

- [1] A. VON HIPPEL, Dielectric Materials and Applications, ARTECH.
- [2] www.epsimu.fr, Insitut Fresnel, 2008-2013
- [3] P. BOSCHI et P. SABOUROUX, «EpsiMu: A New Microwave Materials Measurement Kit.,» chez *European Test And Telemetry Conference*, Toulouse, France, 2005.
- [4] P. SABOUROUX et D. BA, «EpsiMu, a tool for dielectric properties measurement of porous media : application in wet granular materials characterization,» *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 29, pp. 191-207, 2011.
- [5] A. NICOLSON et G. ROSS, «Measurement of the intrinsic materials by time domain techniques,» *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 19, n°14, pp. 377-382, 1970.
- [6] W. WEIR, «Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies,» *Proceedings of IEEE*, vol. 62, pp. 33-36, 1974.
- [7] Agilent, *Application note n°1364-1 : De-embedding and embedding S-parameter network using a Vector Network Analyzer.*
- [8] R. G. P. D. J. BAKER-JARVIS, «A nonlinear least-squares solution with causality constraints applied to transmission line permittivity and permeability determination,» *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 41, n°15, pp. 646-652, 1992.
- [9] R. CLARKE, A. GREGORY, A. CANNELL, D. PATRICK, M. WYLIE, I. YOUNGS et G. HILL, «A guide to the characterisation of dielectric materials at RF and microwave frequencies,» Institute of Measurement and Control / National Physical Laboratory, 2003.
- [10] J. BAKER-JARVIS, M. JANEZIC, B. RIDDLE, R. JOHNK, P. KABOS, C. HOLLOWAY, R. GEYER et C. CROSVENOR, *Measuring the Permittivity and Permeability of lossy Materials : Solid, Liquids, Metals, Building Materials and Negative-Index Materials.*, 2004.
- [11] D. BA, «Optimisation d'une procédure de caractérisation électromagnétique de matériaux dans le domaine des micro-ondes. Application aux milieux granulaires secs et humides,» Marseille, France, 2010.
- [12] H. TORTEL, «Localization and derivation of an optimal sphere for 3d perfectly conducting objects,» *J. Electromagn. Waves Applications*, vol. 16, pp. 771-791, 2002.
- [13] P. PETONG, R. POTTEL et U. KAATZE, «Water-Ethanol Mixtures at Different Compositions and Temperatures. A Dielectric Relaxation Study,» *The Journal of Physical Chemistry A*, vol. 104, n° 132, pp. 7420-7428, 2009.
- [14] H. MARTENS, J. REEDIJK et H. BROM, «Measurement of the complex dielectric constant down to helium temperatures. I. Reflection method from 1 MHz to 20 GHz using an open ended coaxial line,» *REview of Scientific Instrument*, vol. 71, n° 12, pp. 473-477, 2000.