



**HAL**  
open science

## Méthode de caractérisation large bande de matériaux diélectriques liquides et multi-couches

P Monferran, Yann Marie-Joseph, Christophe Guiffaut, Alain Reineix

► **To cite this version:**

P Monferran, Yann Marie-Joseph, Christophe Guiffaut, Alain Reineix. Méthode de caractérisation large bande de matériaux diélectriques liquides et multi-couches. 20ème Colloque International sur la Compatibilité Electroamagnétique, Ecole Centrale de Lyon, Apr 2021, Lyon, France. hal-03328228

**HAL Id: hal-03328228**

**<https://hal.science/hal-03328228>**

Submitted on 29 Aug 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## METHODE DE CARACTERISATION LARGE BANDE DE MATERIAUX DIELECTRIQUES LIQUIDES ET MULTI-COUCHES

P. Monferran<sup>1</sup>, Y. Marie-Joseph<sup>1</sup>, C. Guiffaut<sup>1</sup>, A. Reineix<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut XLIM, UMR 7252 CNRS, 123 av. Albert Thomas, 87060 Limoges, paul.monferran@xlim.fr

**Résumé** Cet article propose d'étendre les performances d'une méthode de caractérisation de matériaux diélectriques et ferrites aux matériaux liquides et multi-couches. Après avoir rappelé les principes de cette méthode de caractérisation qui s'appuie sur la mesure des paramètres S d'une cellule quasi-TEM avec et sans échantillon et un algorithme d'optimisation visant à minimiser la différence entre les paramètres S mesurés et ceux calculés en simulation 3D, différentes approches de caractérisation du liquide et du récipient sont proposées. La sensibilité de la méthode à la précision de la modélisation de la structure propagatrice et aux différentes approches de caractérisation est étudiée. Les résultats mettent en exergue les performances remarquables de la caractérisation quelles que soient les modélisations et les approches utilisées.

### I. INTRODUCTION

Dans de nombreux domaines tels que l'électromagnétisme, la médecine, la chimie ou encore la biologie, il est important de connaître avec plus ou moins de précision les caractéristiques électromagnétiques (EM) des matériaux liquides. Plusieurs méthodes de caractérisation ont été développées en ce sens. Cependant, il existe peu de méthodes au dessous du gigahertz. Ceci peut s'expliquer par le fait que la plupart des méthodes de caractérisation se basent sur l'utilisation de guides d'ondes qui nécessitent un dimensionnement peu envisageable à de telles fréquences [1]. On trouve cependant des méthodes en cellules coaxiales qui permettent une caractérisation allant du continu jusqu'à la fréquence de coupure de la cellule [2], [3]. Ces deux types de caractérisation reposent sur la méthode Nicolson-Ross-Weir (NRW) et sur la mesure des paramètres S de la structure propagatrice avec l'échantillon pour déterminer les caractéristiques de celui-ci [4], [5]. Dans le cas des liquides, ces méthodes en structure propagatrices posent un sérieux problème de dimensionnement de l'échantillon. En effet, le liquide est généralement encapsulé dans des cellules spécifiques. D'une part, ces dites cellules doivent être parfaitement dimensionnées à la taille de la structure propagatrice pour éviter un gap d'air qui perturberait l'analyse NRW. D'autre part, le liquide doit remplir la totalité des cellules sans que des bulles d'air ne pénètrent au sein de la cellule ce qui conduirait à d'importantes incertitudes sur les résultats. De plus, les caractéristiques EM de ces cellules doivent être correctement prises en compte ou annulées

par une mesure à vide afin d'appliquer proprement la méthode NRW. La sonde *speag-dak* qui permet d'effectuer la mesure en contact direct du liquide est quant à elle une des méthodes les plus souples en cellule coaxiale [6]. Il existe aussi des méthodes en espace libre permettant la caractérisation des liquides [7], [8]. Bien que ces méthodes aient l'avantage d'être non intrusive et relativement souple notamment sur le dimensionnement de l'échantillon à caractériser, elles restent particulièrement sensibles aux différentes diffractions qui se produisent sur les bords de l'échantillon et aux multiples réflexions entre les antennes. Enfin, on trouve aussi dans la littérature des méthodes de caractérisation par le biais de résonateurs qui proposent certes une caractérisation précise mais bande étroite [9], [10].

Ce papier reprend une méthode de caractérisation large bande (1 MHz - 1 GHz) qui s'appuie sur la modélisation FDTD d'une cellule quasi-TEM et une procédure d'optimisation pour remonter aux caractéristiques du matériaux [11]. Cette méthode nécessite la mesure des paramètres S de la cellule quasi-TEM avec et sans échantillon. L'idée est de représenter tous les effets EM de la structure propagatrice en simulation 3D et d'optimiser les caractéristiques de l'échantillon à l'aide d'un algorithme d'optimisation à convergence rapide. Cette méthode, particulièrement souple, permet de caractériser des échantillons diélectriques et ferromagnétiques très peu conducteurs avec une tolérance de 5%. En effet en utilisant cette méthode, le dimensionnement des échantillons n'importe que peu tant que ce dernier est bien représenté en simulation. L'utilisation du maillage cartésien couramment utilisé en FDTD nécessite tout de même d'avoir des échantillons parallélépipédiques. Le développement de maillage conforme pour la méthode FDTD permet cependant de s'affranchir de cette contrainte [12], [13]. Il s'agit ici d'étendre la méthode à la caractérisation de matériaux liquides se trouvant dans un récipient diélectrique afin d'apporter une preuve de faisabilité de la caractérisation pour les matériaux liquides et multi-couches. La caractérisation de cet ensemble est effectuée avec différentes modélisations de la cellule quasi-TEM (maillage cartésien ou conforme) et différentes approches. La section II rappelle le principe de la méthode de caractérisation avant de décrire les différentes approches envisagées pour la caractérisation de matériaux multi-couches et les différentes modélisations de la cellule

quasi-TEM proposées. La section III est consacrée à la présentation des différents résultats en fonction des différentes approches et modélisations.

## II. PRINCIPE DE LA METHODE

### II.1. Présentation de la méthode

On rappelle ici que la méthode publiée en [11] consiste à minimiser l'écart entre les paramètres  $S$  simulés et les paramètres  $S$  mesurés de la cellule quasi-TEM illustrée en Fig. 1. Afin de ne prendre en compte que l'effet de l'échantillon (DUT) à caractériser, la procédure nécessite de faire une mesure et une simulation à vide (sans DUT). On définit alors les deux métriques suivantes :

$$\Delta S_{11}(f) = \left( S_{11}^{\text{sim, avec DUT}} - S_{11}^{\text{sim, sans DUT}} \right) - \left( S_{11}^{\text{mes, avec DUT}} - S_{11}^{\text{mes, sans DUT}} \right), \quad (1)$$

$$\Delta S_{21}(f) = \left( S_{21}^{\text{sim, avec DUT}} - S_{21}^{\text{sim, sans DUT}} \right) - \left( S_{21}^{\text{mes, avec DUT}} - S_{21}^{\text{mes, sans DUT}} \right), \quad (2)$$

et on propose trois fonctions dites fonctions coûts à minimiser :

$$FC_{11} = \frac{1}{2} \sum_f |\Delta S_{11}|^2, \quad (3)$$

$$FC_{21} = \frac{1}{2} \sum_f |\Delta S_{21}|^2, \quad (4)$$

$$FC_{11,21} = \frac{1}{2} \sum_f |\Delta S_{11}|^2 + |\Delta S_{21}|^2. \quad (5)$$

On va alors chercher à minimiser une des fonctions coûts en ajustant les caractéristiques EM du DUT en simulation. La procédure d'optimisation choisie s'appuie sur une technique de minimisation par moindre carré d'une fonction coût non linéaire avec une méthode de descente de type Newton s'appuyant sur un calcul de gradient et une approximation de la matrice Hessienne [14], [15]. Les paramètres de l'algorithme d'optimisation et ses performances sont détaillés en [11].

En [11], il a été montré l'efficacité de cette méthode pour des modèles de matériaux diélectriques non-dispersifs (6) (avec  $\sigma = 0$ ) mais aussi de Debye (7) :

$$\epsilon_r(f) = \epsilon_r - \frac{j\sigma}{2\pi f\epsilon_0}, \quad (6)$$

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty + \sum_{i=1}^{N_p} \frac{G_i(\epsilon_{\text{stat}} - \epsilon_\infty)}{1 + j\omega\tau_i}, \quad (7)$$

avec  $N_p$  le nombre de pôles,  $G_i$  le coefficient compris entre 0 et 1 appliqué à chaque pôle,  $\tau_i$  le temps de relaxation de chaque pôle,  $\epsilon_{\text{stat}}$  la permittivité statique et  $\epsilon_\infty$  la permittivité à une fréquence "infinie".

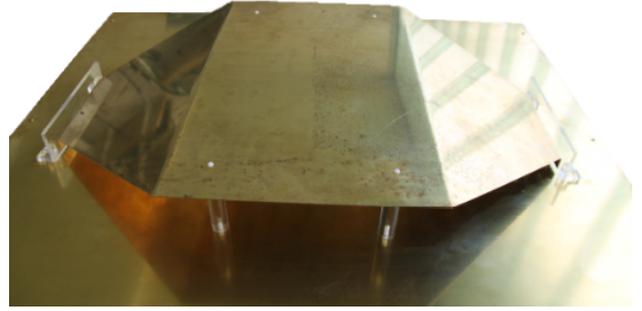
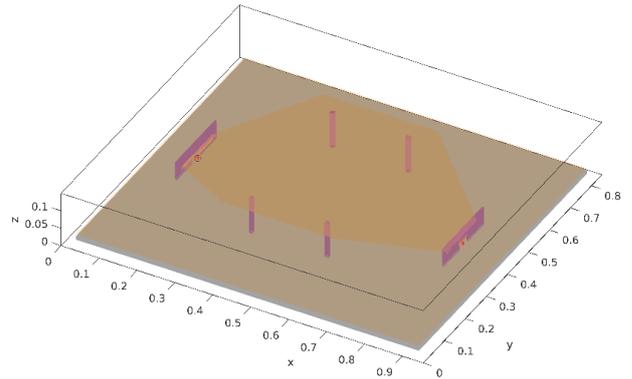
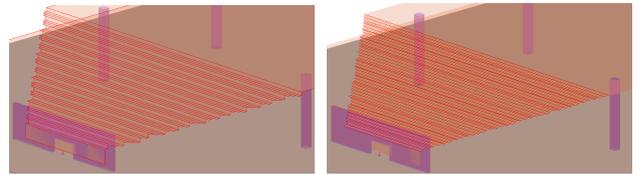


FIGURE 1. Photographie de la cellule.



(a) CAO de la cellule



(b) Maillage cartésien

(c) Maillage conforme

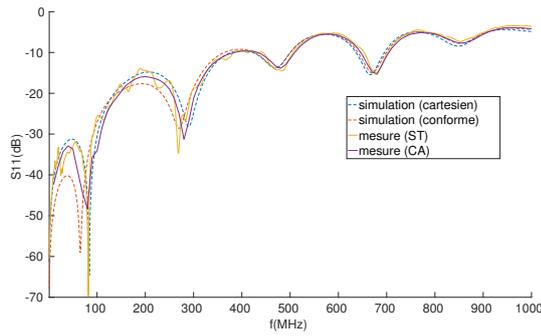
FIGURE 2. Modélisations de la cellule TEM (repère en m) avec un maillage cartésien ou conforme.

### II.2. Différentes modélisations

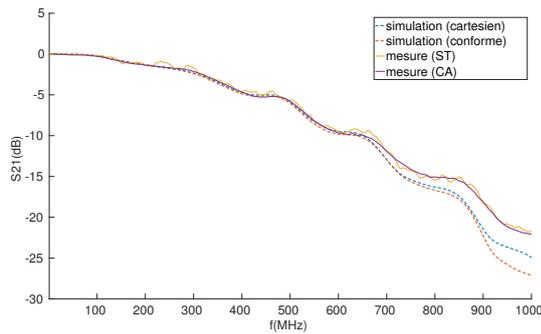
Afin de modéliser la cellule quasi-TEM de la Fig. 1, on s'appuie sur deux types de maillages :

- le maillage cartésien usuellement utilisé en FDTD,
- ou le maillage conforme développé pour la méthode FDTD [12], [13].

Ces deux types de modélisation sont représentés en Fig. 2. Le maillage conforme proposé en Fig. 2c permet d'éviter les "marches d'escaliers" du maillage cartésien de la Fig. 2b et ainsi d'obtenir une géométrie plus conforme à celle de la CAO de la cellule quasi-TEM. On notera tout de même que le maillage conforme produit des discontinuités sur les bords ouverts comme les bords des plaques. On rappelle aussi que le maillage conforme s'appuie sur le maillage cartésien initial pour définir de nouvelles cellules appelées "cellules conformes". Le pas de maillage est fixé à 5 mm pour les deux modélisations. Par ailleurs, il est important de préciser que le maillage conforme n'est utilisé que sur les transitions obliques



(a)  $|S_{11}|$  à vide



(b)  $|S_{21}|$  à vide

FIGURE 3. Paramètres  $|S_{11}(f)|$  et  $|S_{21}(f)|$  de la cellule à vide pour différentes modélisations et mesures.

de la cellule appelées *tapers*. Par conséquent, le schéma FDTD conforme ne s'applique que sur les mailles impliquant les *tapers*. Pour toutes les autres mailles, le schéma FDTD classique est utilisé.

Hormis les maillages qui diffèrent entre les deux modélisations, les autres paramètres de simulation sont strictement identiques. Le plan de masse est défini comme une plaque parfaitement conductrice de dimensions finies (90 cm x 80 cm) tout comme la structure propagatrice. Les supports en polycarbonate représentés en violet sur la Fig. 2 sont modélisés par un matériau diélectrique de permittivité égale à deux. La planche de bois qui supporte la cellule est aussi modélisée comme un diélectrique de permittivité égale à 3. Des couches absorbantes (PML) sont alors disposées à toutes les frontières [16], [17].

Les paramètres  $|S_{11}|$  et  $|S_{21}|$  de la cellule à vide des deux modélisations sont comparés en Fig. 3 à ceux mesurés sur table (ST) et en chambre anéchoïque (CA). On remarque que la mesure en CA bien qu'ayant moins de points ( $\Delta f = 10$  MHz) lisse bien la mesure ST ( $\Delta f = 1$  MHz). La modélisation conforme prédit moins efficacement le comportement aux basses fréquences du paramètre  $|S_{11}|$  (jusqu'à 100 MHz) par rapport à la modélisation cartésienne mais est plus précise sur le reste de la bande, en particulier sur les résonances d'ordres supérieurs. Par ailleurs, on observe un décrochage des paramètres  $|S_{21}|$  simulés à partir de 700 MHz par rapport à la mesure

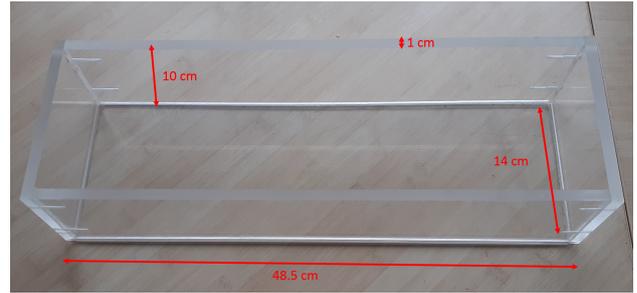


FIGURE 4. Photographie du contenant

contrairement à la modélisation simplifiée proposée en [11].

Dans la suite de l'article, on comparera la sensibilité de la méthode de caractérisation aux deux types de modélisation cartésienne et conforme.

### II.3. Méthodes utilisées pour les matériaux multi-couches

On se propose de caractériser dans cet article de l'eau dé-ionisée placée dans un récipient en polycarbonate illustré en Fig. 4. Les dimensions de ce récipient sont ajustées à celles de la cellule quasi-TEM, de telle manière qu'une fois inséré, le récipient "remplisse" entièrement la section transversale de la cellule.

On décide d'utiliser trois méthodes différentes pour caractériser l'eau dé-ionisée et/ou le récipient :

- méthode 1 : on effectue la mesure et la simulation à vide avec le récipient afin de retirer l'effet du récipient,
- méthode 2 : on caractérise le récipient vide, puis on modélise le récipient avec la valeur de permittivité caractérisée et enfin on caractérise l'eau,
- méthode 3 : on caractérise les deux milieux (eau et récipient) simultanément.

## III. RESULTATS

### III.1. Caractérisation du récipient

On présente ici les résultats de la caractérisation du récipient en polycarbonate en fonction des deux modélisations. Ces résultats sont résumés en Table 1.

Comme attendu, la variation entre les fonctions coûts est extrêmement faible (<5%). Les deux types de modélisation proposent des résultats en accord avec la référence à une tolérance maximale de 4%. Par la suite, pour la

TABLE 1. Permittivités du récipient caractérisées.

	$FC_{11}$	$FC_{11,21}$	$FC_{21}$
Référence	2.7 (datasheet fabricant)		
Cartésien	2.60	2.60	2.59
Conforme	2.77	2.68	2.64

TABLE 2. Permittivités de l'eau dé-ionisée caractérisées avec la méthode 1 pour différents volumes de liquide.

	$FC_{11}$	$FC_{11,21}$	$FC_{21}$
Référence	78-79 ( [20], [21] )		
$V_{\text{eau dé-ionisée}} = 1953 \text{ cm}^3$	72.94	72.86	72.84
$V_{\text{eau dé-ionisée}} = 3906 \text{ cm}^3$	77.70	78.13	78.36

méthode 2, la valeur de 2.6 sera utilisée quel que soit le type de modélisation pour la permittivité du récipient.

### III.2. Pour des différents volumes de liquide

Avant tout, il est important de rappeler que les caractéristiques EM des liquides sont très dépendantes de la température [18], [19]. Pour l'ensemble de nos mesures, l'eau dé-ionisée était à une température de 23 °C.

On décide de regarder la sensibilité de la méthode 1 pour différents volumes de liquide ( $V_{\text{eau dé-ionisée}} = 14 \times 46.5 \times h_{\text{eau dé-ionisée}} \text{ cm}^3$  correspondant respectivement à une hauteur  $h_{\text{eau dé-ionisée}}$  de 3 et 6 cm dans le récipient. Les résultats sont présentés dans la Table 2. Les résultats obtenus pour une hauteur de liquide de 6 cm sont particulièrement satisfaisants contrairement à ceux correspondant à une hauteur de 3 cm. La sensibilité importante des résultats au volume de liquide que l'on peut observer peut s'expliquer notamment par le fait que le volume de liquide ait été calculé en mesurant la hauteur du liquide à l'aide d'une règle graduée. Il aurait fallu déterminer le volume à l'aide d'appareils volumiques (pipette graduée, béccher gradué...). En effet, une petite erreur de volume induit une erreur importante sur les valeurs des caractéristiques EM [11]. L'erreur de mesure du volume aura des conséquences d'autant plus importantes que le volume est petit, puisque, proportionnellement, elle conduira à une erreur plus importante.

Par ailleurs, on notera que, tout comme pour le récipient, la variation des résultats pour les différentes fonctions coûts est particulièrement faible ( $< 0.1\%$ ). On considérera alors dans la suite uniquement la fonction coût  $FC_{11,21}$  pour la caractérisation de l'eau dé-ionisée à  $h_{\text{eau dé-ionisée}} = 6 \text{ cm}$ .

### III.3. Pour les différentes méthodes proposées

On se propose ici de comparer l'efficacité des méthodes de caractérisation proposées en section II. La Table 3. présente les résultats en fonction des différentes méthodes utilisées pour des modèles de matériaux diélectriques correspondant à l'équation (6). Ce type de modèle se justifie du fait qu'aux fréquences étudiées les matériaux caractérisés sont très peu dispersifs (de conductivités très faibles). L'estimation des caractéristiques EM des deux matériaux s'avère très performante par rapport à celle de la littérature. De plus, les résultats montrent une excellente stabilité de la méthode quelles que soient les méthodes et les modélisations utilisées. La variation

TABLE 3. Permittivités caractérisées en fonction des différentes méthodes.

	Méthode 1	Méthode 2	Méthode 3
Référence	$\epsilon_{\text{rec}} = 2.7$ (datasheet fabricant) $\epsilon_{\text{eau}} = 78 - 79$ ( [20], [21] )		
Cartésien	$\epsilon_{\text{eau}} = 78.13$	$\epsilon_{\text{eau}} = 78.26$	$\epsilon_{\text{rec}} = 2.64$ $\epsilon_{\text{eau}} = 77.87$
Conforme	$\epsilon_{\text{eau}} = 78.58$	$\epsilon_{\text{eau}} = 78.37$	$\epsilon_{\text{rec}} = 2.65$ $\epsilon_{\text{eau}} = 78.10$

maximum des résultats est inférieure à 0.1%. On notera notamment que la caractérisation des deux matériaux simultanément par la méthode 3 produit d'excellent résultats même pour un système a priori multi-solutions. On peut aussi remarquer que le type de modélisation importe peu puisque la méthode de caractérisation est une méthode relative du fait que les effets EM à vide sont retirés. On pourrait alors se limiter à un modèle simplifié de la cellule quasi-TEM comme en [11] qui permet d'avoir une convergence plus rapide de la simulation, et par conséquent, une caractérisation plus rapide.

### III.4. Pour un modèle dispersif de matériau

Le modèle théorique de Debye de l'eau dé-ionisée à été largement étudié [18]. Sur la bande de fréquence étudiée, la partie réelle de la permittivité  $\epsilon_r(\omega)$  de l'équation (7) est constante pour l'eau dé-ionisée contrairement à la partie imaginaire qui présente déjà une légère variation. On se propose alors d'utiliser un modèle de Debye pour estimer la permittivité  $\epsilon_r(\omega)$ . On se limite à une modélisation cartésienne de la cellule quasi-TEM, une optimisation utilisant  $FC_{11,21}$  et la méthode 2 comme approche de caractérisation. La Fig. 5 présente le modèle de Debye obtenu par rapport au modèle théorique proposé en [18]. La concordance excellente des résultats met en avant la capacité de la méthode à caractériser des liquides dispersifs avec une grande précision.

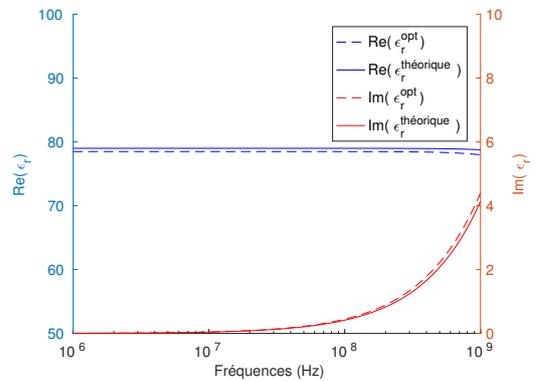


FIGURE 5. Modèle théorique de Debye ( [18] ) de l'eau dé-ionisée à 23 °C et celui estimé par la méthode 2.

#### IV. CONCLUSION

La preuve de concept portant sur de l'applicabilité la méthode proposée en [11] pour caractériser des matériaux liquides et multi-couches a été mise en évidence dans ce papier. Cette méthode de caractérisation s'appuie sur la différence mesurée des paramètres S d'une cellule quasi-TEM avec et sans l'échantillon à caractériser, et une méthode d'optimisation cherchant à minimiser l'écart entre la différence mesurée et la différence issue des simulations 3D. Ainsi, les caractéristiques de l'échantillon sont obtenues uniquement à partir de l'effet de l'échantillon. Différentes modélisations de la cellule quasi-TEM ont été proposées. Il a été montré qu'il n'est pas nécessaire de modéliser très fidèlement la cellule propagatrice puisque la méthode de caractérisation est relative. De plus, trois approches pour caractériser le liquide et son récipient ont été proposées. L'excellente performance de chaque approche a été exposée. On notera en particulier la très bonne caractérisation de l'eau dé-ionisée et du récipient simultanément qui permet d'ouvrir des perspectives très intéressantes pour la caractérisation des matériaux multi-couches. Enfin, la méthode a aussi été validée pour des modèles de liquides dispersifs dans la bande 1 MHz - 1 GHz. De futurs travaux pour caractériser des liquides très dispersifs dans cette bande de fréquence (les alcools notamment) sont alors envisagés.

#### Références

- [1] I. Huynen, C. Steukers, and F. Duhamel, "A wideband line-line dielectrometric method for liquids, soils, and planar substrates," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 50, no. 5, pp. 1343–1348, Oct 2001.
- [2] K. Folgero, "Broad-band dielectric spectroscopy of low-permittivity fluids using one measurement cell," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 47, no. 4, pp. 881–885, Aug 1998.
- [3] T. P. Iglesias and S. M. Pereira, "Distributed parameters for low-frequency dielectric characterization of liquids with open-ended coaxial cell," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 1, pp. 176–179, Feb 2006.
- [4] A. M. Nicolson and G. F. Ross, "Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 19, no. 4, pp. 377–382, Nov 1970.
- [5] W. B. Weir, "Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies," *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 1, pp. 33–36, Jan 1974.
- [6] DAKS-3.5 : DAK System for 200 MHz-14 GHz. [Online]. Available : <http://www.speag.com/products/dak/dak-dielectric-probe-systems/daks-3-5/>
- [7] V. V. Varadan, K. A. Jose, and V. K. Varadan, "In situ microwave characterization of nonplanar dielectric objects," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 48, no. 3, pp. 388–394, March 2000.
- [8] M. A. B. Aris, D. K. Ghodgaonkar, and N. Khadri, "Nondestructive and noncontact dielectric measurement methods for low-loss liquids using free space microwave measurement system in 8 - 12.5 GHz frequency range," in *2004 RF and Microwave Conference (IEEE Cat. No.04EX924)*, Oct 2004, pp. 182–189.
- [9] T. Chretiennot, D. Dubuc, and K. Grenier, "A microwave and microfluidic planar resonator for efficient and accurate complex permittivity characterization of aqueous solutions," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 2, pp. 972–978, Feb 2013.
- [10] C. Liu and Y. Pu, "A microstrip resonator with slotted ground plane for complex permittivity measurements of liquids," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 4, pp. 257–259, April 2008.
- [11] P. Monferran, R. Tumayan, C. Guiffaut, G. Andrieu, A. Reineix, and X. Bunlon, "Wideband optimization process for em characterization of low-losses dielectric and dispersive materials in a quasi-tem cell," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67, no. 4, pp. 866–875, April 2018.
- [12] S. Benkler, N. Chavannes, and N. Kuster, "A new 3-D conformal PEC FDTD scheme with user-defined geometric precision and derived stability criterion," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 6, pp. 1843–1849, June 2006.
- [13] T. Xiao and Q. H. Liu, "A 3-D enlarged cell technique (ect) for the conformal FDTD method," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 3, pp. 765–773, March 2008.
- [14] J. E. Dennis Jr, D. M. Gay, and R. E. Walsh, "An adaptive nonlinear least-squares algorithm," *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, vol. 7, no. 3, pp. 348–368, 1981.
- [15] D. M. Gay, "A trust-region approach to linearly constrained optimization," in *Numerical Analysis*. Springer, 1984, pp. 72–105.
- [16] J. P. Bérenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *Journal of computational physics*, vol. 114, no. 2, pp. 185–200, 1994.
- [17] ———, "Perfectly matched layer (PML) for computational electromagnetics," *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*, vol. 2, no. 1, pp. 1–117, 2007.
- [18] W. Ellison, "Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0–25 THz and the temperature range 0–100 °C," *Journal of physical and chemical reference data*, vol. 36, no. 1, pp. 1–18, 2007.
- [19] A. P. Gregory and R. Clarke, *Tables of the complex permittivity of dielectric reference liquids at frequencies up to 5 GHz*. National Physical Laboratory Teddington, 2001.
- [20] N. Ueda, Y. Kuriyama, A. Nishikata, N. Fukunaga, S. Watanabe, and Y. Yamanaka, "Liquid material's complex permittivity measurement using seamless dielectric tube and rectangular waveguide," in *2004 Asia-Pacific Radio Science Conference, 2004. Proceedings.*, Aug 2004, pp. 537–.
- [21] J. Krupka, K. Derzakowski, M. D. Janezic, and J. Baker-Jarvis, "TE018 dielectric-resonator technique for precise measurements of the complex permittivity of lossy liquids at frequencies below 1 GHz," in *2004 Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, June 2004, pp. 469–470.