



**HAL**  
open science

# Caractérisation électromagnétique des matériaux absorbants sur une large bande de fréquence et de température par une structure coplanaire

Alexis Chevalier, Edouard Flavin, Philippe Talbot, Patrick Queffelec

► **To cite this version:**

Alexis Chevalier, Edouard Flavin, Philippe Talbot, Patrick Queffelec. Caractérisation électromagnétique des matériaux absorbants sur une large bande de fréquence et de température par une structure coplanaire. JCMM2018, 15èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Mar 2018, Paris, France. hal-02009731

**HAL Id: hal-02009731**

**<https://hal.science/hal-02009731>**

Submitted on 6 Feb 2019

**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.

# Caractérisation électromagnétique de matériaux diélectriques sur une large bande de fréquence et de température par une structure coplanaire

Alexis Chevalier<sup>(1)</sup>, Edouard Flavin<sup>(2)</sup>, Philippe Talbot<sup>(1)</sup>, Patrick Quéffélec<sup>(1)</sup>

<sup>1</sup> Lab-STICC – Université de Bretagne Occidentale, 6 avenue le Gorgeu, 29238 Brest Cedex 3

<sup>2</sup> MBDA – 1 Avenue Réaumur, 92350 Le Plessis Robinson  
alexis.chevalier@univ-brest.fr

**Résumé** — Une méthode de caractérisation électromagnétique des matériaux sur une large bande de fréquences (1–10 GHz) et de température (Ta – 500°C) est présentée. Cette méthode utilisant une ligne coplanaire déposée sur un substrat d'Alumine adapté à la montée en température est basée sur une mesure différentielle (mesures avec et sans échantillon) et nécessite un étalonnage adapté. L'exploitation des paramètres mesurés prend en compte la présence d'une lame d'air entre la ligne et l'échantillon à étudier (plaquette).

## I. INTRODUCTION

La mesure de la permittivité et de la perméabilité hyperfréquences des matériaux diélectriques et des matériaux magnétiques massifs isotropes et homogènes est actuellement bien maîtrisée, grâce à une grande diversité de techniques basées sur l'utilisation conjointe des analyseurs de réseaux et des structures résonantes (cavités) ou de propagation (ligne, guide d'ondes). Par contre, l'étude de l'influence de certaines contraintes extérieures, par exemple mécaniques, électriques, magnétiques ou thermiques, pose des problèmes de caractérisation électromagnétique (EM) mal maîtrisés, voire non encore résolus.

Nous présentons dans cette communication une méthode de mesure permettant la détermination de l'évolution de la permittivité des matériaux diélectriques en fonction de la température.

La difficulté majeure liée à la caractérisation EM des matériaux en température réside dans la prise en compte des déformations des différents éléments du dispositif expérimental, dont le matériau sous test et le porte échantillon, qui présentent, en général, des coefficients de dilatation thermique différents. La technique expérimentale qui consiste à mesurer en espace libre [1] les coefficients de réflexion et de transmission relatifs à la perturbation de la propagation de l'onde EM engendrée par la présence de l'échantillon sur son trajet paraît la mieux adaptée à des mesures en température. En effet, même si la température de l'échantillon est modifiée, celle des cornets émetteur et récepteur reste inchangée. Cela rend moins complexe, que dans le cas des techniques basées sur l'utilisation de structures de propagation guidée [2], la procédure d'étalonnage de l'analyseur de réseau vectoriel. Il convient cependant de préciser que la méthode en espace libre est adaptée au domaine des ondes millimétriques, car à plus basses fréquences elle requiert des échantillons de très grandes tailles et l'expérimentateur ne dispose pas assez de

quantité de matière pour les préparer. Dans ce contexte, puisque notre objectif est de mesurer la permittivité de diélectriques, et *in fine* d'absorbants, dans le domaine des ondes centimétriques, notre idée a été d'adapter au problème de la caractérisation EM des matériaux en température, une méthode de mesure en réflexion-transmission (R/T) basée sur l'utilisation d'une structure de propagation semi-ouverte. Nous avons retenu la technologie coplanaire [3].

## II. DESCRIPTION DE LA METHODE

La méthode proposée utilise une structure coplanaire (Fig. 1) déposée sur un substrat en Alumine adapté aux températures élevées. L'échantillon à mesurer est placé au milieu de la ligne et seule cette partie centrale est chauffée par un four "cloche" amovible (Fig. 3). Les caractéristiques géométriques de la ligne sont une longueur  $L=300$  mm, un ruban central de largeur  $W=1075$   $\mu\text{m}$  et un gap  $S=535$   $\mu\text{m}$ . La ligne est conçue suffisamment longue pour éviter que les connecteurs et les câbles subissent des échauffements trop importants. Elle est insérée dans une monture de test ICM<sup>®</sup> adaptée à la structure coplanaire (Fig. 3) et connectée à un analyseur de réseau.

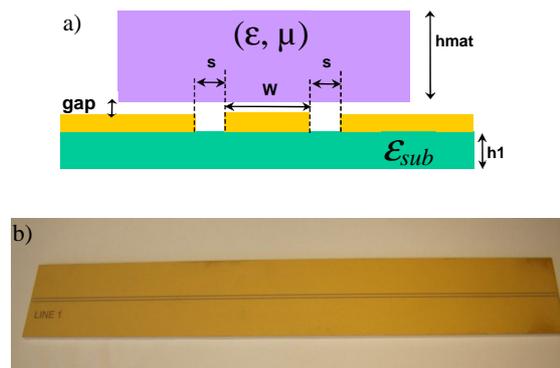


Fig. 1: (a) Dessin de la section transverse de la ligne coplanaire. (b) ligne réalisée 300 x 40 x 5 mm<sup>3</sup>,  $W=1075$   $\mu\text{m}$ ,  $S= 535$   $\mu\text{m}$ .

### A. Extraction des paramètres électromagnétiques

L'exploitation des coefficients de transmission  $S_{21}$  et de réflexion  $S_{11}$  mesurés permet de remonter à la permittivité effective (problème direct) de la structure coplanaire chargée par l'échantillon en utilisant la théorie des lignes de transmission. Pour déterminer la permittivité du matériau (problème inverse) à partir de la permittivité effective mesurée, nous utilisons un modèle EM de la ligne chargée qui prend en compte les caractéristiques du

substrat (épaisseur et permittivité), les dimensions géométriques de la ligne (W, S et L) et la présence d'une lame d'air entre la ligne et l'échantillon à étudier. L'analyse EM de la structure est basée sur la méthode de la transformée conforme qui permet d'exprimer de façon analytique les paramètres effectifs de la ligne coplanaire multicouche en fonction des paramètres électromagnétiques des constituants [4].

La cellule de mesure peut être représentée par une structure à trois couches (substrat, air, matériau) dont la permittivité effective s'exprime en fonction des coefficients de remplissage  $q_i$  par :

$$\epsilon_{\text{eff}} = 1 + q_1(\epsilon_{\text{sub}} - 1) + (q_3 - q_2) \cdot (\epsilon_{\text{mat}} - 1) \quad (1)$$

Le substrat n'étant pas magnétique, la perméabilité effective s'obtient en considérant un système à seulement deux couches.

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{\mu_{\text{mat}}}{(1 - q_2) \cdot \mu_{\text{mat}} + q_2} \quad (2)$$

Les coefficients de remplissage  $q_i$  sont liés uniquement aux dimensions géométriques de la ligne [5].

La méthode d'extraction des paramètres EM permet de remonter à la fois à la permittivité et à la perméabilité. Elle nécessite cependant une optimisation numérique réalisée par un code développé au laboratoire sous le logiciel Matlab®. La Fig. 2 présente l'évolution de la permittivité et de la perméabilité effective de la structure en fonction de celles du matériau à mesurer pour la ligne coplanaire développée. Si la permittivité effective dépend fortement de la permittivité du matériau, la perméabilité effective n'augmente que très faiblement en fonction de celle du matériau et tend de façon asymptotique vers la valeur 2. Ce résultat permet de définir la sensibilité de la cellule et montre que la méthode est bien adaptée à la mesure des matériaux diélectriques mais est moins sensible dans le cas des matériaux magnétiques.

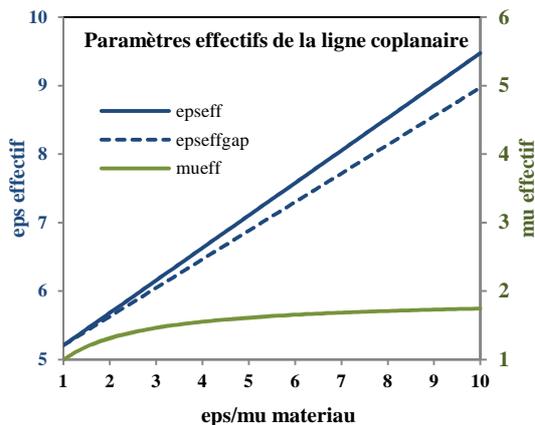


Fig. 2: Evolution des paramètres effectifs de la cellule de mesure en fonction de la permittivité et de la perméabilité du matériau.  $h_{\text{mat}}=2\text{mm}$  ;  $h_{\text{sub}}=3.2\text{mm}$  ;  $\epsilon_{\text{sub}}=9.6$  ;  $\text{gap}=50\mu\text{m}$

La lame d'air définie dans le modèle permet de prendre en compte de façon théorique les imperfections de planéité des lignes et du matériau. La figure 2 montre l'évolution de la permittivité effective dans le cas d'un gap d'air de  $50\mu\text{m}$

(ligne pointillée). L'influence du gap d'air devient vite importante et conduit à diminuer la sensibilité de la cellule. Le contrôle de cette lame d'air et son évaluation sont des points sensibles de la méthode proposée et nécessite un étalonnage spécifique ainsi que des précautions sur l'état de surface des échantillons. Pour déterminer sa valeur nous avons mesuré un échantillon parfaitement connu et estimé, de façon empirique, le gap nécessaire pour retrouver la valeur attendue.

### B. Procédure expérimentale

Dans le cas de la mesure de permittivité de matériaux non magnétiques, seul le paramètre de transmission  $S_{21}$  est exploité. Cela rend ainsi la méthode avantageusement insensible aux résonances de dimensions liées à la longueur de l'échantillon dans la direction de propagation.

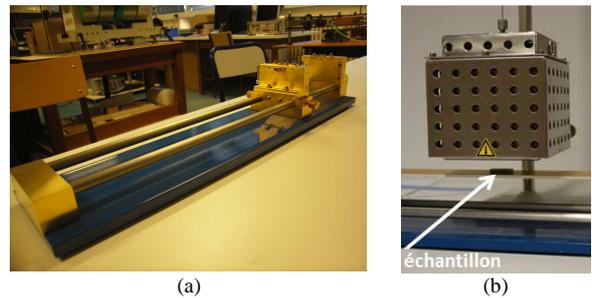


Fig. 3: (a) Montage de test pour ligne coplanaire (300 mm). (b) Ligne coplanaire et son four "cloche"

La technique d'extraction des propriétés EM de l'échantillon se déroule en trois étapes. La première étape consiste à étalonner l'ensemble « analyseur, câble, montage de test ». Il peut être réalisé soit un étalonnage de type SOLT en bout de câble soit un étalonnage de type TRL à l'aide d'un kit de lignes de longueurs différentes. La deuxième étape consiste à mesurer la permittivité effective de la structure. Elle utilise une méthode différentielle où la ligne est mesurée à la température souhaitée dans un premier temps sans l'échantillon (mesure à vide) puis avec l'échantillon (mesure en charge). Cette méthode différentielle permet de relier les paramètres S mesurés aux constantes de propagation, indépendamment des plans de référence [6] et donc de la position l'échantillon. Elle permet également, d'étalonner le système en tenant compte des effets liés à la température comme la dilatation thermique de la ligne ou la variation éventuelle des propriétés du substrat.

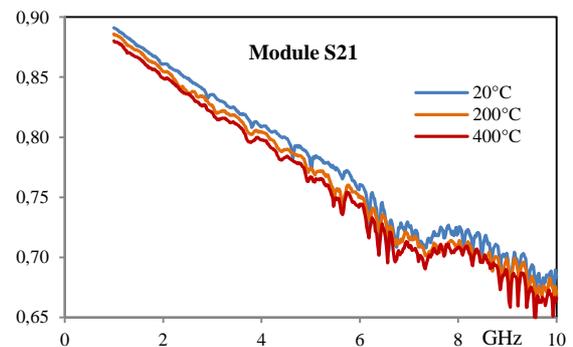


Fig. 4: Variation du module du coefficient de transmission de la ligne sans échantillon en fonction de la température.

La Fig. 4 montre l'évolution du module du coefficient de transmission  $S_{21}$  de la cellule à vide pour plusieurs températures. Le module décroît légèrement lorsque la température augmente, la phase est également affectée.

La différence de phase entre la mesure à la température ambiante et celle à la température d'étude évolue en fonction de la fréquence. Cette variation est d'autant plus marquée que la température est élevée (Fig. 5).

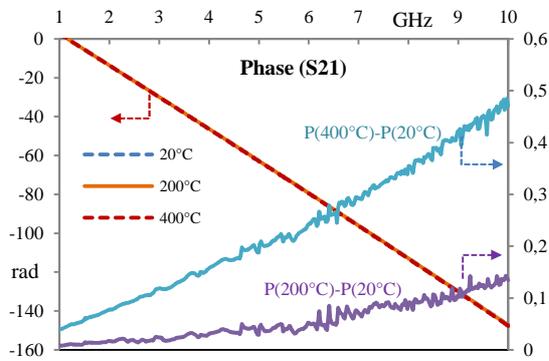


Fig. 5: Variation de la phase du coefficient de transmission de la ligne sans échantillon en fonction de la température.

Cette évolution de la phase montre la nécessité de prendre en compte la mesure de la ligne vide à la température souhaitée pour corriger les paramètres S des effets thermiques. Enfin la troisième étape consiste à calculer, à l'aide de la relation (1), la permittivité du matériau en fonction de la permittivité effective mesurée.

Concernant les incertitudes, comme le montrent la relation (1) et la figure 2, plus le contraste est élevé entre la valeur de la permittivité du matériau à mesurer et celle du substrat, meilleure est la précision de la méthode. Il est ainsi plus intéressant d'utiliser une ligne déposée sur un substrat de faible permittivité. Cependant les propriétés de dilatation thermique et les contraintes technologiques de réalisation nous ont amené à utiliser un substrat épais d'Alumine. Pour la ligne développée, l'incertitude relative de la mesure peut dépasser les 15% pour des échantillons à faible permittivité (<4). Elle devrait rester inférieure à 5% pour des échantillons de permittivité supérieure à 7 avec de bons états de surface.

### III. RESULTATS EXPERIMENTAUX

#### A. Validation à température ambiante

Dans un premier temps, le principe de la méthode et le programme de dépouillement associé ont été validés à température ambiante par des comparaisons avec des mesures réalisées en guide rectangulaire en bandes C et X.



Les résultats des mesures en ligne coplanaire sur des échantillons céramiques isotropes de quartz et de nitrure de Silicium sont en très bon accord avec les mesures en guide rectangulaire. Ces échantillons céramiques sont lisses et présentent de très bons états de surfaces.

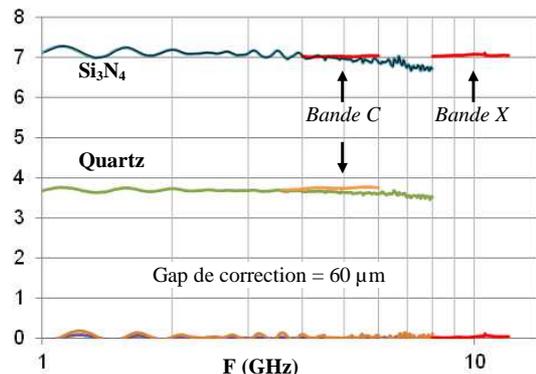


Fig. 6: Comparaison des permittivités mesurées en guide rectangulaire et en ligne coplanaire à température ambiante de matériaux céramiques.

Pour des échantillons composites, la mesure en ligne coplanaire conduit cependant à des valeurs différentes de celles mesurées en guide rectangulaire. La Fig. 7 présente une comparaison sur un échantillon composite texturé.

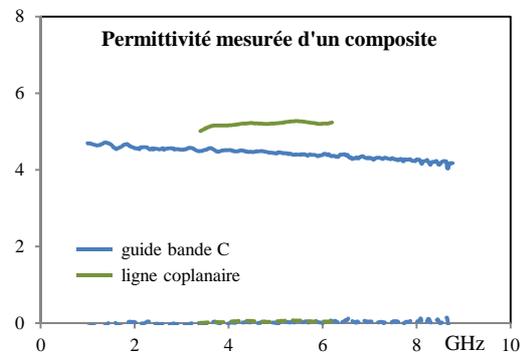


Fig. 7: Comparaison des permittivités mesurées en guide rectangulaire et en ligne coplanaire à température ambiante pour un matériau composite.

Les résultats sur des matériaux composites montrent que l'interaction onde/échantillon reste très superficielle et que l'onde pénètre peu dans le matériau à caractériser. L'effet de la rugosité de surface devient alors très important et conduit à des valeurs mesurées inférieures à celles mesurées en guide pour lesquelles l'onde EM traverse le matériau dans toute son épaisseur. Les matériaux composites étant structurés, l'anisotropie de la permittivité peut également entraîner une différence dans les valeurs mesurées. Certaines courbes sont présentées sans échelle en ordonnée pour des raisons de confidentialité.

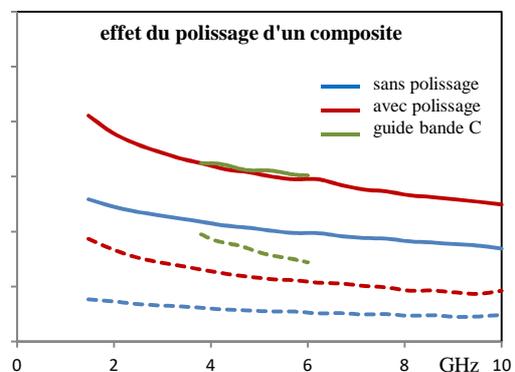


Fig. 8. Comparaison de la permittivité mesurée d'un même échantillon sur ligne coplanaire et en guide d'onde rectangulaire bande C. Influence de l'état de surface des échantillons.

Ainsi, si la technique développée n'est pas contraignante sur la géométrie externe des échantillons, la rugosité de la surface constitue en revanche un paramètre important. La Fig. 8 présente une comparaison des résultats de mesures d'un composite brut, puis après polissage de la surface, en référence à la mesure en guide rectangulaire. La rectification de la surface permet de retrouver la valeur mesurée en guide. Il faut donc apporter une attention particulière à l'état de surface des échantillons.

### B. Résultats en température

Pour les caractérisations en température, le protocole consiste à mesurer dans un premier temps la ligne vide à la température souhaitée. Puis dans un deuxième temps, la ligne chargée avec l'échantillon est mesurée à la température de consigne en prenant soin de placer le four dans la même position que précédemment pour tenir compte des éventuelles perturbations apportées par sa présence. La Fig. 9 présente les résultats de mesures en température pour l'échantillon de quartz. Comme attendu, le matériau est peu sensible à la température et les courbes de permittivité mesurée de 20°C à 420°C se superposent.

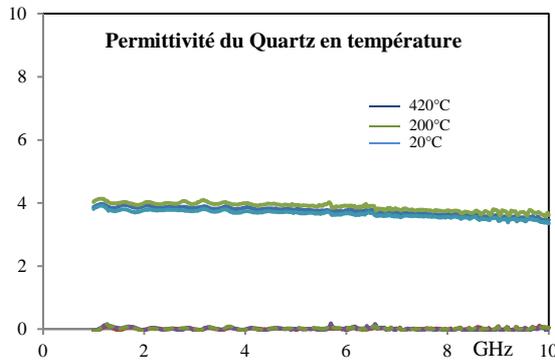


Fig. 9: Comparaison de la permittivité mesurée d'un échantillon de Quartz pour des températures de 20°C, 200°C et 420°C.

Si la permittivité n'évolue que très peu en température pour les céramiques non dispersives, les matériaux dispersifs présentent en général des variations plus importantes. La Fig. 10 montre l'évolution des spectres de permittivité d'un matériau dispersif [référence MBDA 1002]. La partie réelle ainsi que la partie imaginaire augmentent fortement avec la température.

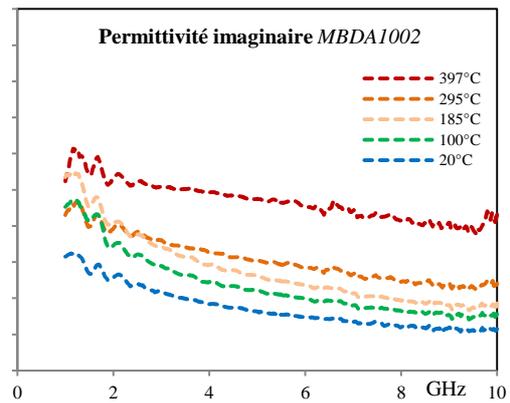
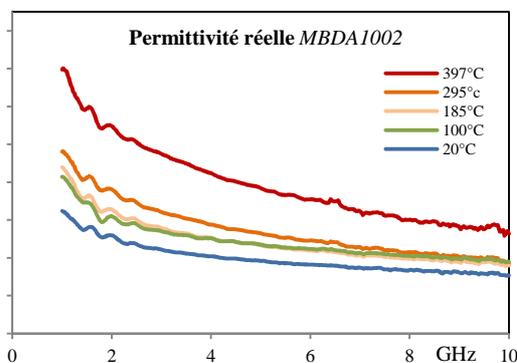


Fig. 10: Evolution de la permittivité réelle et imaginaire d'un matériau dispersif pour des températures de 20°C à 400°C.

L'accroissement atteint 100% pour la partie réelle et 200% pour la partie imaginaire. La méthode proposée montre ainsi sa capacité à caractériser la permittivité de matériaux dispersifs en température sur une large bande de fréquence.

## IV. CONCLUSION

La méthode développée en ligne coplanaire de grande longueur permet de mesurer la permittivité de matériaux diélectriques jusqu'à des températures élevées proches de 500°C et sur une large bande de fréquence. L'intérêt de cette méthode réside dans sa simplicité de réalisation technologique et dans l'utilisation d'échantillon de petites dimensions. Il convient cependant de maîtriser les états de surfaces pour corriger efficacement les effets de lame d'air et assurer une précision suffisante.

## REFERENCES

- [1] V. V. Varadan, R. D. Hollinger, D. K. Ghodgaonkar, and V. K. Varadan, "Free-Space, Broadband Measurements of High-Temperature, Complex Dielectric Properties at Microwave Frequencies," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 40, no. 5, pp. 842–846, 1991.
- [2] A. E. Bogle, M. W. Hyde, M. J. Havrilla, and J. S. Sovern, "High-Temperature RF Material Characterization Using a Dual-Chambered Rectangular Waveguide Fixture," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 9, pp. 2422–2427, Sep. 2017.
- [3] Byoungjoong Kang, Jeiwon Cho, Changyul Cheon, and Youngwoo Kwon, "Nondestructive measurement of complex permittivity and permeability using multilayered coplanar waveguide structures," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 15, no. 5, pp. 381–383, May 2005.
- [4] E. Carlsson and S. Gevorgian, "Conformal mapping of the field and charge distributions in multilayered substrate CPWs," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 47, no. 8, pp. 1544–1552, 1999.
- [5] Erli Chen and S. Chou, "Characteristics of coplanar transmission lines on multilayer substrates: modeling and experiments," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 45, no. 6, pp. 939–945, Jun. 1997.
- [6] J. Baker-Jarvis, E. J. Vanzura, and W. A. Kissick, "Improved Technique for Determining Complex Permittivity with the Transmission / Reflection Method," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 38, no. 8, pp. 1096–1103, 1990.