



**HAL**  
open science

# Caractérisation locale de matériaux en espace libre à l'aide du phénomène de jet électromagnétique

Ali Ghaddar, Mathis Granger, Bernard Bayard, Bruno Sauviac

► **To cite this version:**

Ali Ghaddar, Mathis Granger, Bernard Bayard, Bruno Sauviac. Caractérisation locale de matériaux en espace libre à l'aide du phénomène de jet électromagnétique. XXIIIèmes Journées Nationales Microondes, Jun 2024, Antibes Juan-Les-Pins, France. hal-04603027

**HAL Id: hal-04603027**

**<https://hal.science/hal-04603027v1>**

Submitted on 6 Jun 2024

**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 locale de matériaux en espace libre à l'aide du phénomène de jet électromagnétique

A. Ghaddar<sup>1</sup>, M. Granger<sup>1</sup>, B. Bayard<sup>1</sup> et B. Sauviac<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Jean Monnet Saint-Etienne, CNRS, Institut d'Optique Graduate School, Laboratoire Hubert Curien UMR 5516, F-42023, SAINT-ETIENNE, France

[ali.ghaddar@univ-st-etienne.fr](mailto:ali.ghaddar@univ-st-etienne.fr)  
[mathis.granger@univ-st-etienne.fr](mailto:mathis.granger@univ-st-etienne.fr)

**Résumé** – Dans cet article, nous présentons une étude portant sur l'exploitation du jet électromagnétique (EM) fonctionnant à 30 GHz afin de caractériser localement les matériaux. Nous exposons dans un premier temps les caractéristiques du jet EM, notamment l'intensité élevée générée au point focal (en champ proche) et la très faible largeur à mi-hauteur du faisceau ainsi que la quasi-planéité des fronts d'ondes. Une mesure du coefficient de réflexion via le jet EM a été réalisée sur un substrat FR4 Epoxy contenant des parties nues et métallisées de largeur 1, 2 et 3 cm. Les résultats expérimentaux obtenus sont favorablement comparés à ce qui avait été calculé analytiquement. Cela révèle une capacité du jet à mesurer la réponse électromagnétique locale de matériaux, dans le contexte de l'approximation de l'onde plane, sur une surface de 1 cm<sup>2</sup>. Enfin, une expérience a été menée afin de calculer la permittivité, révélant un écart de 5% par rapport à la valeur exacte.

## 1. Introduction

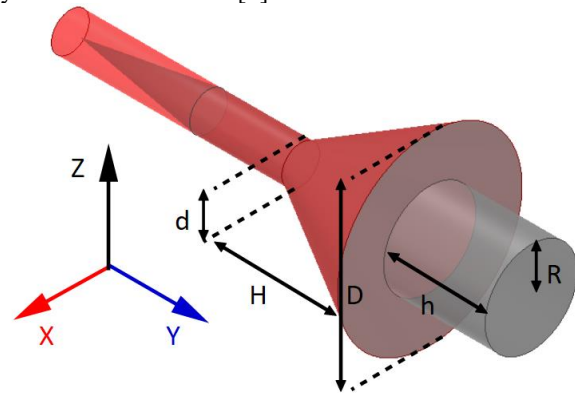
Le jet photonique a été initialement imaginé en optique lorsqu'un faisceau laser interagit avec des nanoparticules diélectriques [1]. Dans des conditions physiques et géométriques spécifiques des nanoparticules et du milieu environnant, le faisceau lumineux généré après interaction avec ces nanoparticules présente des propriétés étonnantes, telles qu'une intensité élevée et une largeur à mi-hauteur extrêmement faible (FWHM). Ces caractéristiques du jet photonique aboutissent à une amélioration de la rétrodiffusion des objets ayant des tailles faibles devant la longueur d'onde. cela en fait par conséquent un bon outil pour des applications tournées vers la détection et l'imagerie.

Le phénomène du jet photonique a également été étudié et mis en évidence vers des fréquences où il va prendre le nom "jet électromagnétique", telles que le térahertz [2], [3] et les micro-ondes [4], [5] en considérant des embouts diélectriques de différentes formes géométriques (elliptique, cylindrique,...) à la sortie d'un guide d'onde ou d'une antenne. En termes d'application, le jet électromagnétique reste encore peu utilisé dans des applications de type détection ou imagerie, alors que ces deux fonctions peuvent facilement être réalisées en analysant directement l'évolution du coefficient de réflexion.

Dans ce travail, nous démontrerons que l'utilisation du jet EM peut également être étendue aux applications de caractérisation des matériaux. En particulier, pour effectuer des mesures locales en profitant de la faible valeur de FWHM du jet.

## 2. Jet électromagnétique

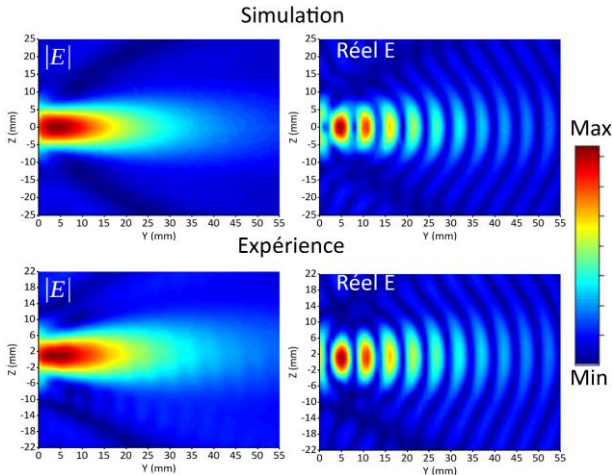
Le jet électromagnétique présenté dans cette étude est généré par une antenne cornet chargée de Téflon prolongée par un cylindre (voir Figure 1). La charge en Téflon est constituée d'une partie transitoire à l'entrée de l'antenne, permettant de minimiser les réflexions dues au changement de milieu (Air/Téflon), et d'un embout cylindrique de hauteur  $h=2,2$  cm et de rayon  $R=1$  cm à la sortie de l'antenne. On note que la forme cylindrique de l'embout permettant d'avoir une répartition du champ en symétrie de révolution [5].



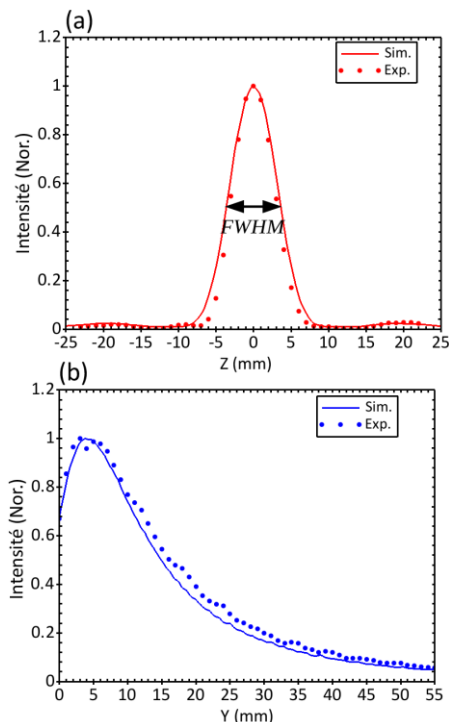
**Figure 1.** Représentation de l'antenne cornet de dimensions  $d=0,82$  cm,  $H=2,8$  cm et  $D=4$  cm chargée de Téflon prolongée en espace libre par un embout cylindrique de dimensions  $h=2,2$  cm et  $R=1$  cm.

Les cartographies à 30 GHz du champ électrique  $E$  (amplitude et partie réelle) simulées et mesurées à la sortie de l'embout dans le plan ( $yz$ ) sont présentées Figure 2. La carte expérimentale de champ électrique a été mesurée en utilisant une sonde WR-28 maintenue sur un bras robotisé. L'évolution de l'intensité suivant l'axe de propagation  $y$  et suivant l'axe vertical  $z$  au point focal sont illustrées Figure 3. Selon les résultats obtenus, on constate qu'il y a une cohérence parfaite entre la simulation et l'expérience. Le jet produit par l'embout cylindrique est caractérisé par un point focal situé à une distance de 5 mm après la

terminaison de l'embout (distance entre le point central de la tâche la plus intense du champ et la terminaison de l'embout). On observe également qu'au point focal, les fronts d'ondes présentent une forme quasi plane, et la largeur à mi-hauteur du faisceau est très faible avec une valeur d'environ 6 mm. Ces dernières caractéristiques permettent d'envisager une caractérisation locale en espace libre dans une zone de quelques longueurs d'onde après la sortie de l'onde.



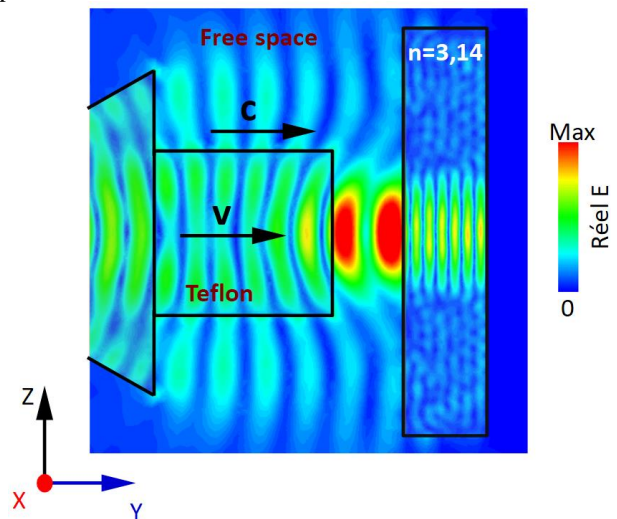
**Figure 2. Cartographie du module (à gauche) et de la partie réelle (à droite) du champ électrique E obtenue à 30 GHz en simulation (en haut) et par expérimentation (en bas) après la terminaison de l'embout dans le plan yz.**



**Figure 3. Evolution de l'intensité normalisée par rapport à l'intensité maximale, suivant l'axe z au point focal (a) et suivant l'axe de propagation y (b). Les résultats de mesure (Exp.) sont comparés aux simulations (Sim.).**

Pour comprendre de manière approfondie le principe de fonctionnement du jet électromagnétique, nous avons simulé la carte du champ électrique à l'intérieur et à

l'extérieur de l'embout en présence d'un matériau placé au point focal. Comme montre Figure 4, l'onde électromagnétique rencontre deux milieux différents à la sortie de l'antenne cornet, le Téflon de l'embout cylindrique au centre et l'air autour de ce dernier. La partie de l'onde dans l'air présente une vitesse de propagation plus rapide que la partie de l'onde se propageant dans le Téflon. Le front d'onde à la sortie de l'antenne cornet a une forme concave et l'onde devient convexe à l'extrémité de l'embout après l'avoir traversé. Ensuite, la réfraction de l'onde vers l'air permet d'amplifier la convexité de l'onde en nous donnant à la fin une tâche plus intense à 5 mm de la terminaison de l'embout. Ainsi, la différence de vitesse de propagation entre l'air et le Téflon est à l'origine de phénomène de focalisation de notre jet électromagnétique. Pour observer ce qui se passe sur plusieurs longueurs d'onde au-delà de l'embout, nous avons placé au point focal un matériau sans pertes et plus réfringent (indice  $n=3,15$ ). À l'intérieur du matériau l'onde électromagnétique a une longueur d'onde plus petite (correspondant à l'indice de la couche) et présente des fronts d'onde qui remplissent parfaitement la condition d'onde plane, mais localement. Ceci nous permet d'avoir des résultats interprétables localement par les équations de Maxwell avec le formalisme de l'onde plane.



**Figure 4. Carte du champ E (partie réelle) en coupe représentant l'évolution de l'onde à travers l'embout et à l'intérieur du matériau placé à 5 mm de la terminaison de l'embout.**

### 3. Résolution du jet électromagnétique

La résolution du jet a souvent été étudiée pour évaluer sa capacité à détecter spatialement des objets ayant une taille faible comparativement à la longueur d'onde, ou à discriminer deux objets très proches entre eux [2], [3].

Ici, nous étudions la réponse mesurée à l'aide du jet comparée avec la réponse théorique du matériau éclairé par une onde plane. La résolution spatiale et les effets de bord du substrat sont observés. Pour ce faire, des mesures du coefficient de réflexion ont été faites en considérant un substrat de FR4 Epoxy de permittivité  $\epsilon_r = 4,4(1 - j 0,04)$  et d'épaisseur 1,6 mm. Le substrat est constitué de parties nues alternées avec des zones métallisées. Les largeurs des

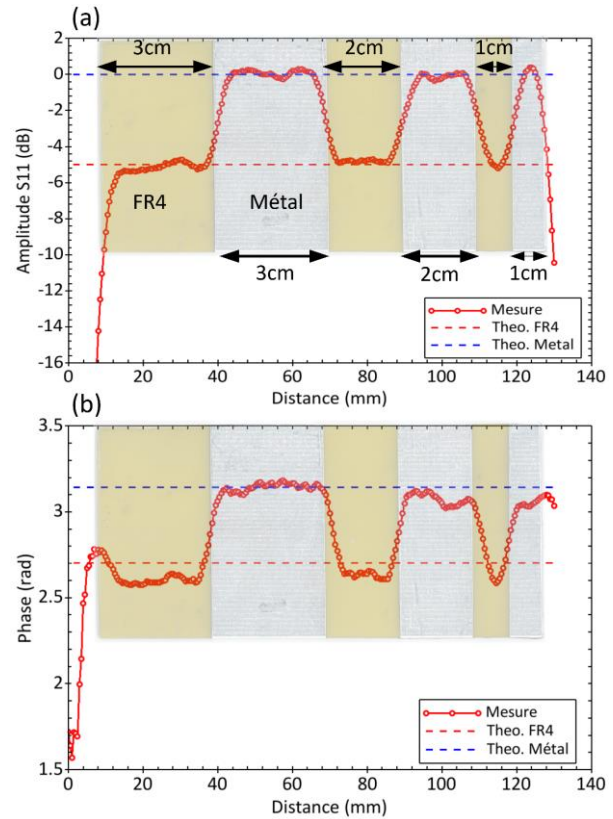
différentes parties sont de plus en plus faibles (largeur 3, 2 et 1 cm – voir Figure 5). Les mesures ont été faites en plaçant l'échantillon au point focal du jet électromagnétique. À l'aide d'un bras robotisé, la caractérisation a été réalisée continûment le long de l'échantillon en le déplaçant pas-à-pas pour couvrir toutes les parties de l'échantillon.



**Figure 5. Banc expérimental de caractérisation d'un échantillon FR4 Epoxy constitué des parties nues et métallisées de largeur 3, 2 et 1 cm.**

L'évolution de la mesure du module et de la phase du coefficient de réflexion le long de l'échantillon à la fréquence 30 GHz est présentée Figure 6, sont également représentées les valeurs théoriques du module et de la phase calculées à 30 GHz pour le substrat FR4 et la partie métallique. On remarque que le module du coefficient de réflexion mesuré correspond aux mêmes valeurs théoriques de -5 dB et 0 dB lorsque le faisceau traverse, respectivement, la partie non métallisée et la partie métallisée. On peut également noter que la phase mesurée présente des valeurs proches des valeurs théoriques du substrat non métallisé et métallisé, qui sont respectivement de 2,7 et 3,14 rad. Dans la section du substrat FR4, on observe une différence maximale d'environ 0,12 rad par rapport à la théorie. Cette variation demeure acceptable et peut être attribuée à la condition de calibrage court-circuit qui a été appliquée sur la partie métallisée, présentant une légère surépaisseur par rapport à la surface nue. On remarque que lors du passage du jet entre la partie nue et métallisée, il en résulte un gap de transition séparant deux états stables du coefficient de réflexion. Cette zone transitoire peut être expliquée par le fait que la largeur du faisceau du champ électromagnétique généré par le jet est en interaction pour une part avec la partie nue et pour le reste avec la partie métallisée. Ce gap peut être réduit en réduisant la largeur à mi-hauteur du jet (FWHM). Quoiqu'il en soit, le jet donne des résultats comparables avec ceux de la théorie

lorsqu'il pénètre au centre de chaque partie, y compris pour la plus petite partie présentant une largeur de 1 cm.



**Figure 6. Module (a) et la phase (b) du coefficient de réflexion  $S_{11}$ . La courbe avec cercle rouge représente le résultat expérimental (Mesure). Les courbes en traits pointillés représentent les valeurs théoriques à 30 GHz (Théo.) pour l'epoxy et le métal.**

#### 4. Exploitation du jet électromagnétique pour la détermination de la permittivité de l'échantillon

Nous essayons dans ce paragraphe d'utiliser les mesures du paramètre  $S_{11}$  effectuées sur l'échantillon de FR4 Epoxy dans le but de retrouver la valeur de sa permittivité via le jet électromagnétique. De ce fait, une méthode de l'extraction de la permittivité basée sur le paramètre  $S_{11}$  a été appliquée [6], [7]. Cette méthode repose sur deux mesures réalisées à la fois sur le substrat avec plan de masse et sur le substrat sans plan de masse. La permittivité est calculée à partir de l'impédance du matériau  $Z_{sans}$  seul et du matériau avec plan de masse  $Z_{avec}$  selon l'expression suivante :

$$\varepsilon = \frac{Z_0^2}{Z^2} + \sin^2 \theta \quad (1)$$

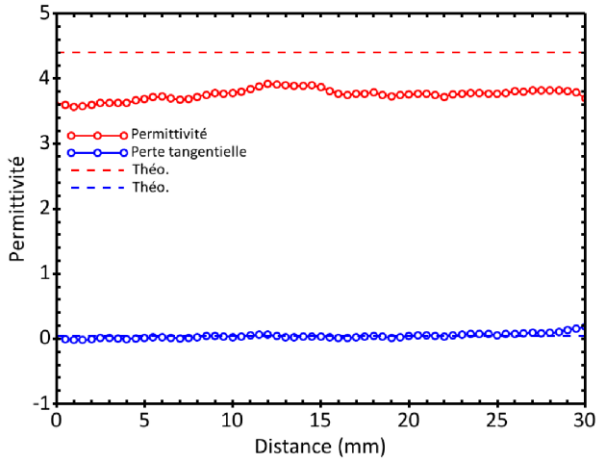
$$Z^2 = \frac{Z_0 Z_{avec} Z_{sans}}{Z_0 + Z_{avec} - Z_{sans}} \quad (2)$$

$$Z_{avec/sans} = Z_0 \frac{1 + S_{11\ avec/sans}}{1 - S_{11\ avec/sans}} \quad (3)$$

avec  $\theta$ , l'angle d'incidence de l'onde électromagnétique. Dans notre cas, nous considérons que le jet génère les

ondes électromagnétiques en incidence normale ( $\theta=0$ ).  $Z_0$  est l'impédance d'onde dans l'air.

Nous avons refait les mesures du coefficient de réflexion sur un échantillon contenant deux parties en présence et en absence du plan de masse arrière. La permittivité expérimentale obtenue en appliquant la technique sur les mesures effectuées par le jet est présentée Figure 7.



**Figure 7. Permittivité et tangente de pertes expérimentales représentées respectivement par des cercles rouges et bleus en comparaison avec les valeurs attendues représentées par les courbes en traits pointillés.**

La valeur expérimentale moyenne de la permittivité complexe présente un écartement de  $0,65(1 + j4.10^3)$  par rapport à la valeur correcte qui vaut  $\epsilon_r = 4,4(1 - j0,04)$ . Cette différence par rapport à la valeur exacte peut être réduite en améliorant notamment les conditions de calibrage. On note que l'échantillon doit être parfaitement positionné devant le jet électromagnétique. Sinon, une faible inclinaison peut entraîner des erreurs sur les mesures car le jet, de par sa concentration, exalte les interactions électromagnétiques, ce qui le rend très sensible à toute erreur de positionnement.

## 5. Conclusion

Nous avons présenté dans cet article le jet électromagnétique généré par une antenne cornet chargée de Téflon avec un embout cylindrique. Nous avons exposé ses caractéristiques, à savoir l'intensité élevée, la largeur à mi-hauteur étroite et des fronts d'onde plane dans la zone proche de l'antenne. Ces propriétés nous ont incités à utiliser le jet pour des mesures locales, tout en restant dans une approche de type ondes planes. Des mesures ont été effectuées sur un substrat constitué de parties métalliques et diélectriques avec des dimensions descendant jusqu'à 1 cm (taille de la longueur d'onde dans le vide). Le coefficient de réflexion détecté par le jet EM présente une similarité par rapport à celui calculé analytiquement, à l'exception des zones transitoires quand le jet passe d'un milieu à un autre. Les résultats ont montré que même sur un matériau de 1 cm de largeur, le coefficient de réflexion reste toujours correct à condition que le jet EM soit au centre du matériau. Nous avons fini l'étude par un essai permettant de déterminer la

permittivité à partir des mesures effectuées en espace libre en utilisant le jet EM.

Le jet EM semble donc une approche prometteuse pour réaliser de la détection et des caractérisations locales.

## Références

- [1] Z. Chen, A. Taflove, et V. Backman, « Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique », *Opt. Express*, vol. 12, n° 7, p. 1214, 2004, doi: 10.1364/OPEX.12.001214.
- [2] S. Hisatake et E. Miyake, « Terahertz scanning microscopy with  $2\lambda$  depth of field based on photonic nanojet generated by a dielectric cuboid probe », *Opt. Express*, vol. 30, n° 25, p. 45303-45311, déc. 2022, doi: 10.1364/OE.472209.
- [3] J. Calvo-Gallego *et al.*, « Enhancing resolution of terahertz imaging systems below the diffraction limit », *Optics & Laser Technology*, vol. 164, p. 109540, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109540>.
- [4] B. Ounnas, B. Sauviac, Y. Takakura, S. Lecler, B. Bayard, et S. Robert, « Single and Dual Photonic Jets and Corresponding Backscattering Enhancement With Tipped Waveguides: Direct Observation at Microwave Frequencies », *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 63, n° 12, p. 5612-5618, déc. 2015, doi: 10.1109/TAP.2015.2491328.
- [5] H. Hyani, « Jet électromagnétique 3D : détection, imagerie et contrôle non destructif dans des structures opaques. », thèse.
- [6] R. A. Fenner, E. J. Rothwell, et L. L. Frasc, « A comprehensive analysis of free-space and guided-wave techniques for extracting the permeability and permittivity of materials using reflection-only measurements », *Radio Science*, vol. 47, n° 01, p. 1-13, 2012, doi: 10.1029/2011RS004755.
- [7] L. Pometcu, « Matériaux et forme innovants pour l'atténuation en hyper fréquences », Université de Rennes 1, Rennes, 2016.