



HAL
open science

Production de jet photonique via une antenne chargée de téflon pour la détection à travers des structures optiquement opaques

Hishem Hyani, B. Sauviac, Kofi Edee, Gérard Granet, Stéphane Robert,
Bernard Bayard

► To cite this version:

Hishem Hyani, B. Sauviac, Kofi Edee, Gérard Granet, Stéphane Robert, et al.. Production de jet photonique via une antenne chargée de téflon pour la détection à travers des structures optiquement opaques. 16èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Mar 2020, Toulouse, France. hal-03472097

HAL Id: hal-03472097

<https://hal.science/hal-03472097>

Submitted on 9 Dec 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.

PRODUCTION DE JET PHOTONIQUE VIA UNE ANTENNE CHARGÉE DE TEFLON POUR LA DÉTECTION A TRAVERS DES STRUCTURES OPTIQUEMENT OPAQUES

H. Hyani^{1,2}, B. Sauviac¹, K. Edee², G. Granet², S. Robert¹ et B. Bayard¹

¹ Université de Lyon, CNRS UMR 5516, Laboratoire Hubert Curien, Université Jean Monnet, 42023 Saint-Étienne.

² Université de Clermont-Ferrand, CNRS UMR 6602, Institut Pascal, 4 Impasse Blaise Pascal, 63178 Aubière.

Hy.hishem@gmail.com

Résumé — Après une présentation sommaire des enjeux et motivations relatifs à la génération de jets photoniques, cet article propose de présenter une nouvelle structure guidée permettant d'obtenir des concentrations énergétiques élevées en champ proche. Nos précédents travaux ont permis, à l'aide de jets photoniques, de détecter des tiges métalliques ayant un diamètre 100 fois inférieur à la longueur d'onde d'étude ($\lambda = 1 \text{ cm}$). Le dispositif, initialement basé sur l'excitation en espace libre d'un guide bi-plaque, présentait des pertes importantes qui limitaient la détection. Pour pallier ces difficultés, nous avons développé un dispositif 3D entièrement guidé. L'étude montre qu'une antenne cornet chargée de Téflon et spécifiée par une extension cylindrique, génère des jets photoniques en champ proche. En augmentant la concentration électromagnétique, ce nouveau dispositif permet d'élargir le champ d'application vers la détection sub-longueur d'onde d'objets non métalliques. Ainsi on montre l'intérêt des jets photonique pour détecter des tiges diélectriques (d'indice faible) dont le diamètre avoisine un dixième de la longueur d'onde.

I. INTRODUCTION ET MOTIVATIONS

En 2004 Chen et al [1] montrent la possibilité de générer une focalisation en champ proche faiblement divergente et caractérisée par une largeur à mi-hauteur inférieure à la longueur d'onde. En dépassant la limite de diffraction, ce phénomène, initialement nommée jet photonique, offre un très grand nombre d'opportunités. Parmi les utilisations évoquées dans la littérature, on peut rappeler la fluorescence par molécule unique [2], la gravure [3], le stockage [4] et la détection [5, 6]. Majoritairement, les jets photoniques sont obtenus lors de l'interaction d'une onde incidente et d'un objet diélectrique. En 2012, Takakura et al [7] montrent numériquement la possibilité de générer de telles focalisations en utilisant un guide métallique planaire chargée de Téflon, terminé par une extension spécifique. L'utilisation d'une structure guidée avec un embout elliptique est expérimentalement validée par Ounnas et al [5] dans le domaine des micro-ondes. L'embout rectangulaire introduit par Hyani et al [6] améliore l'énergie concentrée au niveau du jet. De plus, à la différence du profil elliptique, l'usinage de l'embout est facilité par l'utilisation d'une simple machine-outil et ne nécessite pas de machine à commande numérique. Les caractéristiques du jet restent similaires avec une la largeur à mi-hauteur légèrement moins bonne. La possibilité de détecter des tiges métalliques dont le diamètre est 100 fois plus petit que la longueur d'onde ouvre des perspectives d'applications intéressantes.

Le travail présenté propose une nouvelle structure, entièrement guidée, qui permet d'augmenter la sensibilité de la détection et d'élargir le champ d'application vers des objets non métalliques.

II. ETUDE NUMERIQUE ET VALIDATION EXPERIMENTALE

Afin de réduire les pertes inhérentes des dispositifs existants [5] on se propose d'utiliser des structures tridimensionnelles entièrement guidées. Parmi les différentes possibilités, nous avons choisi d'utiliser une antenne cornet chargée de Téflon dont l'extrémité est associée à une extension de Téflon également. Les performances de l'embout rectangulaire développé pour le dispositif 2D nous amène donc à considérer comme géométrie une extension cylindrique (Fig. 1).

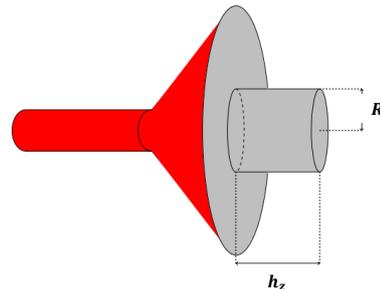


Fig. 1. Structure tridimensionnelle guidée permettant la génération du jet photonique

Les caractéristiques de la focalisation sont fortement dépendantes de la géométrie de l'extension. Nous sommes donc amenés à optimiser le profil de l'extension cylindrique. Pour cela, la structure a été modélisée à l'aide d'un logiciel commercial basé sur les éléments finis.

A. Étude numérique de la structure

La modélisation de cette structure à 30 GHz, permet de déterminer les performances du jet en fonction de la géométrie de l'extension cylindrique. L'investigation est réalisée en deux étapes dont la première consiste à déterminer certaines caractéristiques du jet en fonction des dimensions du cylindre (h_z, R). Parmi les caractéristiques du jet, nous nous sommes intéressés au facteur d'amélioration F_a , définie comme le rapport entre l'intensité maximale du champ électrique avec et sans l'extension cylindrique. La géométrie optimale est déterminée en maximisant la fonction coût (notée C) dont

l'expression tient compte du facteur d'amélioration (F_a) et de la position du maximum d'intensité (Z_{\max}) tel que :

$$C(h_z, R) = \bar{F}_a + (1 - \bar{Z}_{\max})$$

Où les valeurs normalisées sont définies par $\bar{X} = \frac{x}{\max(x)}$. Afin d'exclure les configurations pour lesquelles la focalisation se trouve dans la structure, on impose manuellement la nullité de la fonction lorsque $Z_{\max} \leq 0$. Les résultats obtenus à partir de cette fonction sont présentés sur la Fig. 2.

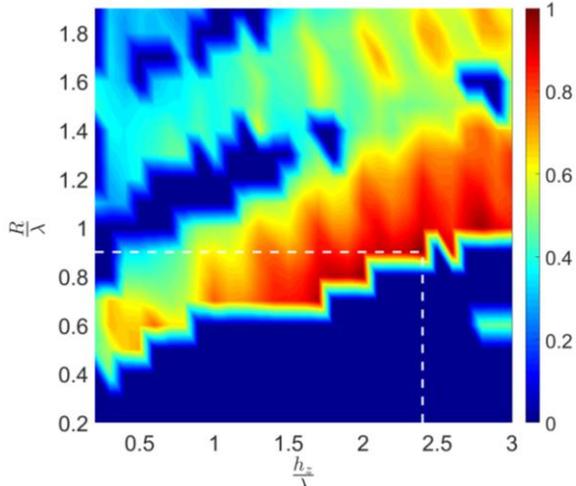


Fig. 2. Répartition de l'amplitude de la fonction coût normalisée \bar{C} associée aux performances du jet suivant différentes géométries de l'extension cylindrique : R est le rayon du cylindre, h_z la longueur de cylindre dépassant du cornet. [$f = 30 \text{ GHz}$, $\lambda = 1 \text{ cm}$, polarisation verticale].

Comme illustrée à la figure 2, la fonction est maximisée lorsque les dimensions de l'extension cylindrique sont données par ($h_z = 2.4\lambda$, $R = 0,9\lambda$). Dans la suite du papier on souhaite utiliser ce dispositif en détection à travers des matériaux optiquement opaques. Il est par conséquent nécessaire d'obtenir une focalisation suffisamment éloignée de l'embout. Ainsi, au voisinage de l'optimum précédent, on sélectionne une hauteur $h_z = 2.2 \lambda$ et un rayon $R = \lambda$ de sorte de focaliser le champ électrique à $Z_{\max} = 0.5\lambda$ (Fig. 3).

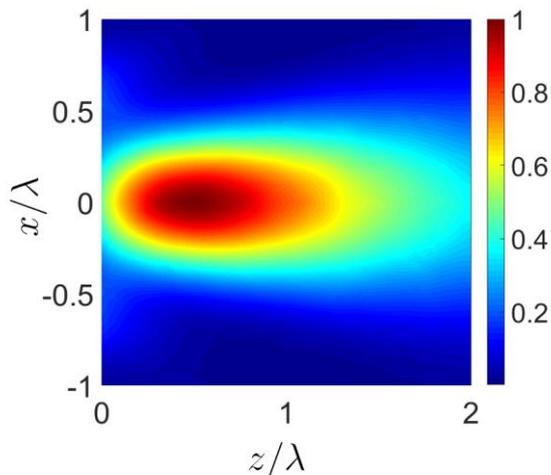


Fig 3. Cartographie de l'intensité normalisée du champ électrique transverse dans le plan défini par la direction de propagation (z) et la polarisation verticale de l'excitation (x).

B. Confrontation expérimentale

La répartition du champ électrique est expérimentalement obtenue via le déplacement automatisé d'une sonde WR28 [8]. En reliant la source et la sonde à un analyseur vectoriel de réseaux, il nous est possible de mesurer les paramètres S. Les mesures étant réalisées en espace libre la calibration est réalisée selon les standards TRM [8].

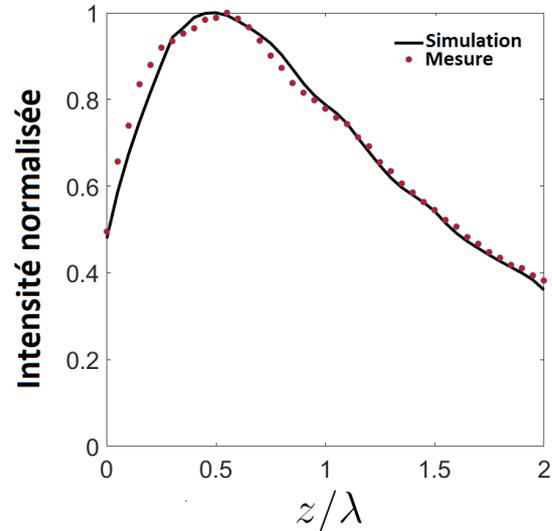


Fig 4. Coupe longitudinale de l'intensité normalisée du champ électrique vertical défini par la polarisation de l'excitation. Comparaison simulation/mesure

En superposant les coupes longitudinale (Fig. 4) et transversales (Fig. 5) il est possible de mettre en évidence une très bonne corrélation entre la simulation et la cartographie expérimentale.

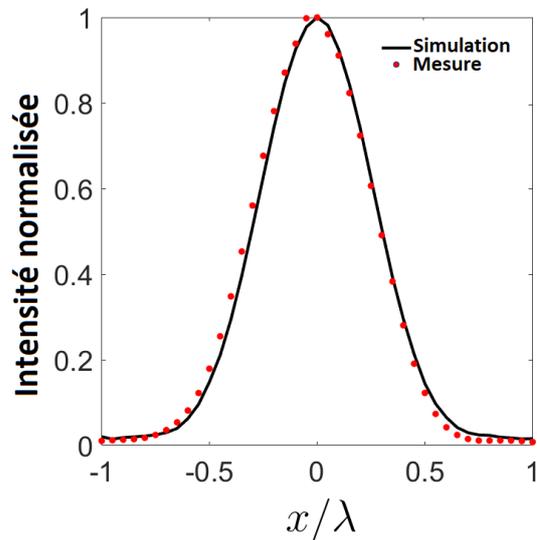


Fig 5. Coupe transverse de l'intensité normalisée du champ électrique vertical défini par la polarisation de l'excitation. Comparaison simulation/mesure

III. APPLICATION A LA DETECTION

Nous venons de valider expérimentalement la possibilité de générer un jet photonique via une antenne cornet chargée de Téflon présentant une « excroissance » à géométrie spécifique. Désormais, on souhaite utiliser ce

prototype pour détecter à travers des surfaces optiquement opaques des objets dont la taille est inférieure à la longueur d'onde. Pour cela on réalise le montage illustré sur la figure. Le principe consiste à mesurer le coefficient de réflexion en fonction de la position de l'objet à détecter dont le déplacement est automatisé. L'objet est un cylindre diélectrique de hauteur 3 cm et de diamètre 1 mm.

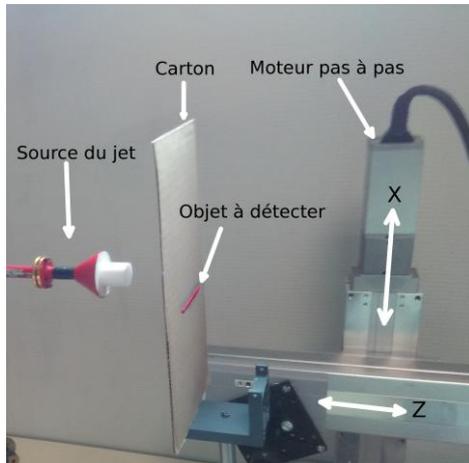


Fig 6. Photo du prototype utilisé pour détecter des objets diélectriques de dimension inférieure à la longueur d'onde. La mesure est réalisée à 30 GHz.

A. Polarisation horizontale

Dans un premier temps nous allons étudier le cas où la direction de polarisation (horizontale) est suivant la longueur de l'objet à détecter (Fig. 6). La figure 7 montre les réponses obtenues lors du balayage de la zone à sonder pour une tige métallique (de diamètre $\lambda/100$) et une tige diélectrique (PVC de diamètre $\lambda/10$). On voit clairement la sensibilité de la réponse, évidemment très forte pour l'objet métallique mais également importante pour la tige de PVC dont l'indice est relativement faible (on note malgré tout 20 dB d'écart entre la présence ou l'absence de l'objet diélectrique). L'information importante que révèle cette figure, concerne la possibilité de détecter facilement des objets non métalliques dont le diamètre est d'environ un dixième de la longueur d'onde.

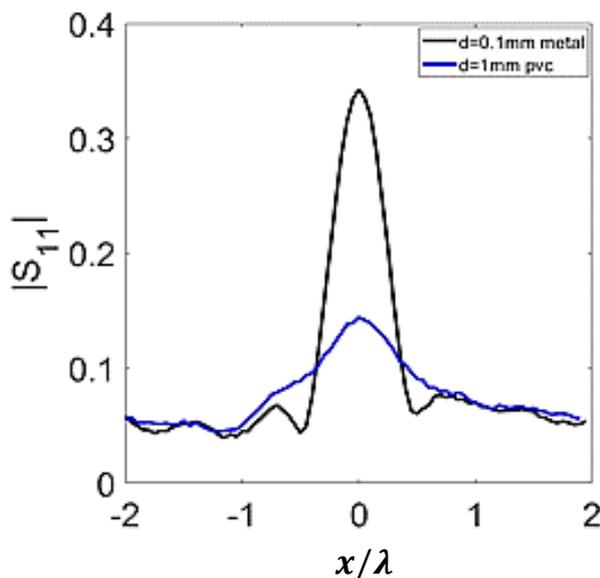


Fig. 7. Évolution de la norme du coefficient de réflexion en fonction de la position verticale de la tige située à $z = 0.5$ cm.

L'étude de l'impact de l'objet diélectrique sur la phase nécessite de retrancher le bruit résultant du milieu opaque (carton). L'évolution ainsi obtenue de la phase associée à l'objet est illustrée sur la figure 8 confirme les précédents résultats.

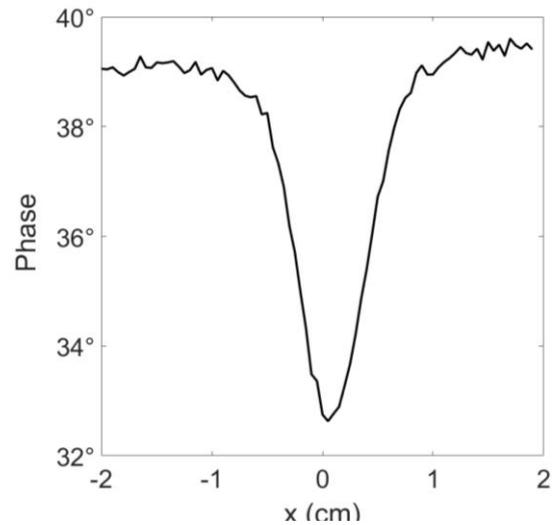


Fig.8. Mesure de la phase du paramètre S_{11} corrigée en fonction de la position verticale de la tige diélectrique pour $z = 0.5$ cm [30 GHz, polarisation horizontale].

B. Polarisation verticale

Lorsque l'on se place en polarisation verticale, la direction du champ électrique est perpendiculaire à la longueur de l'objet. La figure 9 expose l'évolution de la phase du paramètre S_{11} corrigée en fonction du déplacement vertical de l'objet. Bien que la variation de la phase soit amoindrie, il est toujours possible de révéler la présence de l'objet. On note également que la largeur du pic à mi-hauteur est plus faible, ce qui permet, dans ce cas, d'obtenir une précision meilleure sur le positionnement de la tige.

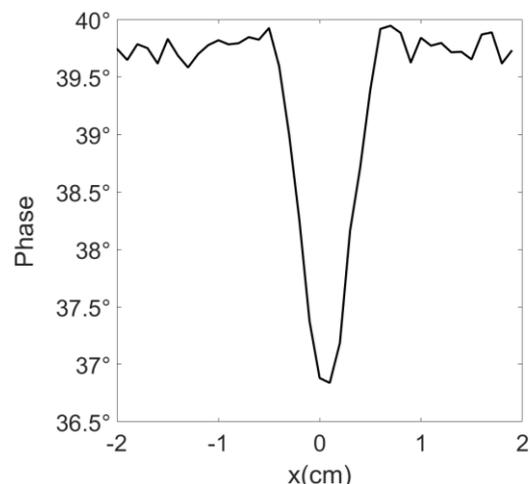


Fig.9. Mesure de la phase du paramètre S_{11} corrigée en fonction de la position verticale de tige diélectrique pour $z = 0.5$ cm [30 GHz, polarisation verticale].

IV. CONCLUSION

Nous venons d'introduire une structure 3D permettant de générer des focalisations sub-longueur d'onde en champ proche. Nous avons pu montrer l'intérêt d'une telle

structure pour détecter des objets de taille inférieure à la longueur d'onde à travers des structures optiquement opaques. À la différence d'autres travaux, il est désormais possible de révéler la présence d'objets diélectriques de dimension bien inférieure à la longueur d'onde malgré un contraste diélectrique faible ($n < 2$). Les sensibilités observées permettent d'envisager des détections encore plus sensibles, si l'on améliore le système en augmentant la focalisation, en adaptant l'embout en fonction du milieu à sonder et enfin en intégrant des outils de post traitement des mesures plus efficaces.

REMERCIEMENT

Nous tenons à remercier la région Auvergne-Rhône-Alpes, ainsi que la communauté de recherche académique ARC6 pour leur soutien financier.

REFERENCES

- [1] Z.Chen et al "Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique." *Opt. Express*, (Vol.12, issue 7,pp.1214–1220), Apr 2004.
- [2] J. Wenger "Disposable microscope objective lenses for fluorescence correlation spectroscopy using latex microspheres." *Anal. Chem.*, (Vol.80, issue 17, pp.6800-6804), Sep 2008.
- [3] A. Abdurrochman et al. "Photonic jet etching: Justifying the shape of optical fiber tip." *AIP Conference Proceedings*, vol 1712, 2016.
- [4] Soon-Cheol Kong, Alan Sahakian, Allen Taflove, and Vadim Backman, "Photonic nanojet-enabled optical data storage," *Opt. Express* **16**, 13713-13719 (2008)
- [5] B. Ounnas, "Single and dual photonic jets and corresponding backscattering enhancement with tipped waveguides: Direct observation at microwave frequencies." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* , (Vol.63, issue 12, pp.5612-5618), Dec 2015.
- [6] H. Hyani et al Numerical study of a photonic jet with aperiodic fourier modal method and experimental validation. *PIERS C*, 88:133–143, 2018
- [7] Y. Takakura "Single and dual photonic jets with tipped waveguides: An integral approach." *IEEE Photonics Technology Letters* , Sept 2012
- [8] H. Hyani "Embout " multi-guide " pour la production de jet photonique appliqué à la détection dans des structures opaques." *JCMM* 2018.