



HAL
open science

Embout “ multi-guide ” pour la production de jet photonique appliqué à la détection dans des structures 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.. Embout “ multi-guide ” pour la production de jet photonique appliqué à la détection dans des structures opaques. JCMM2018 - 15ème édition des Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Mar 2018, PARIS, France. hal-01812024

HAL Id: hal-01812024

<https://hal.science/hal-01812024>

Submitted on 11 Jun 2018

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.

Embout « multi-guide » pour la production de jet photonique appliqué à la détection dans des structures 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, ce papier se propose de présenter une nouvelle structure guidée permettant d'obtenir de fortes concentrations énergétiques. Afin d'en préciser l'intérêt, nous nous proposons de relater les résultats actuellement disponibles dans la littérature [1-2]. La modélisation numérique a été réalisée par l'utilisation de plusieurs méthodes numériques, en particulier la Méthode Modale de Fourier (FMM) [3] et la Méthode modale basée sur les polynômes de Gegenbauer (MMGE) [4]. Nous souhaitons après avoir validé les résultats lors d'une confrontation avec un prototype expérimental, utiliser ce modèle dans le cadre d'une détection en champs proches à travers des structures opaques.

I. INTRODUCTION ET MOTIVATIONS

Depuis 2004, il a été montré qu'une sphère diélectrique de quelques longueurs d'onde pouvait concentrer une onde en champ proche en un faisceau ayant une largeur à mi-hauteur d'une demi-longueur d'onde, de forte intensité et très faiblement divergent sur quelques longueurs d'onde de propagation. Ce phénomène a été appelé « Jet photonique ». Depuis 2011, des travaux [1-2], ont montré par modélisation et par expérimentation que ce phénomène pouvait être étendu à toutes les gammes de fréquences en propagation guidée sous la terminologie plus générale de « jet électromagnétique ». Grâce à ces premiers travaux, il a été possible de mettre en évidence tout l'intérêt applicatif de ce phénomène électromagnétique notamment pour la détection (cas d'une tige métallique 1000 fois plus petite que la longueur d'onde - Figure 1). Le travail présenté ici propose de présenter une nouvelle structure qui se distingue par une géométrie simplifiée. Mis à part l'avantage certain en temps de calcul lors du traitement numérique et les facilités d'usinage associées, ce nouveau profil permet d'obtenir des jets photoniques remarquables par leur concentration.

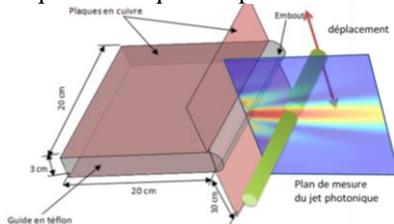


Fig. 1. Structure générant un jet photonique et détectant un objet métallique de faibles dimensions en interaction avec ce dernier [1].

II. POSITION DU PROBLEME ET RESOLUTIONS NUMERIQUES

A. Guide d'onde multi-tronçon 2D

La structure étudiée (Figure 2) est un guide d'onde diélectrique profilé et invariant suivant l'axe Oy. Ce dispositif est constitué d'un matériau diélectrique entouré d'un conducteur, ce qui lui confère l'aptitude à guider des ondes. Le profil de l'embout sortant, quant à lui, reste modulable. Ce degré de liberté nous a permis d'obtenir deux géométries optimales pour la production de jet électromagnétique (tableau I).

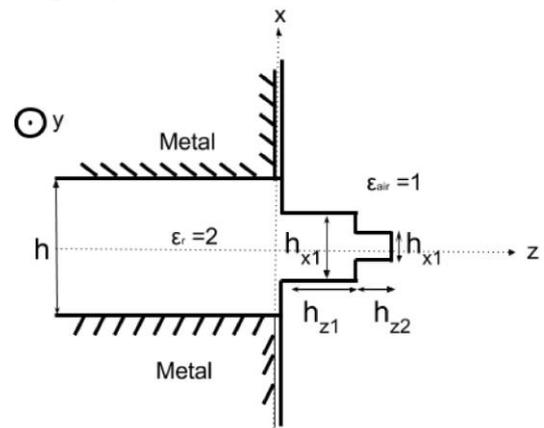


Fig. 2. Schéma du guide bi-plaque avec un embout « multi-guide » à 2 tronçons

B. Généralités sur les méthodes modales employées

La problématique a été abordée à travers deux méthodes modales distinctes. La méthode modale de Fourier (FMM) [3] et la méthode modale basée sur les polynômes de Gegenbauer [4]. Ces méthodes permettent de résoudre des problèmes électromagnétiques de façon rigoureuse. En effet, les solutions sont obtenues à partir de la résolution des équations de Maxwell et ce, sans approximations.

Ces méthodes sont couramment appliquées à l'étude de réseaux périodiques. En appliquant cette approche à notre structure, on obtient une configuration analogue en dupliquant virtuellement le guide suivant l'axe x.

La structure étant alors périodique, il devient possible d'exprimer l'ensemble des grandeurs périodiques par un développement en série sur la base spécifiée par la méthode choisie. De plus, la direction de propagation étant un axe

d'invariance, le champ varie exponentiellement suivant cet axe (Oz). Ceci nous permet d'exprimer les champs électriques, magnétiques et la permittivité relative comme suit :

$$E_y(x, z) = \sum_m E_m P_m(x) e^{-i\gamma z} \quad (1)$$

$$H_x(x, z) = \sum_m H_m P_m(x) e^{-i\gamma z} \quad (2)$$

$$\epsilon_r(x) = \sum_m \epsilon_m P_m(x) \quad (3)$$

La base de fonctions $P_m(x)$ correspond à

- $e^{-i\alpha_m x}$ pour la méthode FMM
- aux polynômes de Gegenbauer pour la méthode MMGE. Dans ce cas l'étude est réalisée par sous domaines raccordés via des contraintes spécifiques.

Où $\alpha_m = \frac{2\pi m}{d}$, d est la période et γ la constante de propagation.

Combinée aux équations de Maxwell, cette écriture permet de générer un problème aux valeurs propres. Les champs s'expriment par la combinaison linéaire de vecteurs propres projetés sur la base propre à la méthode.

En faisant intervenir les conditions aux limites, le formalisme des matrices S [5] détermine les coefficients associés aux combinaisons linéaires propres à chaque milieu. Lors de l'étude avec plusieurs tronçons, on écrit les conditions aux limites pour chaque sous-interface d'équation $z=\text{constante}$ que l'on relie deux à deux.

C. Perfectly matched layer (PML)

Du fait de la périodisation, il est nécessaire de s'affranchir des phénomènes d'interférences issus des différents guides « images ». L'ajout de couches parfaitement absorbantes (PML) sur la frontière du domaine d'étude (dont l'effet est illustré sur la figure 3), s'effectue par un changement de coordonnées suivant l'axe de périodisation.

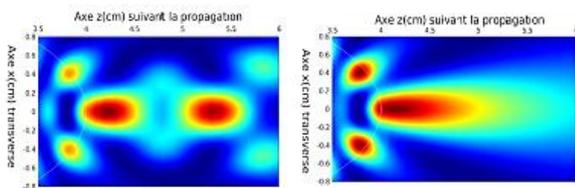


Fig. 3. $|E_y|^2$ sans PML (gauche) et avec PML (droite) pour le profil elliptique avec $h=3\text{cm}$ de grand axe $b=4\text{cm}$.

III. MULTI-GUIDE : DE LA SIMULATION A L'EXPERIENCE.

A. Etude comparative en vue d'établir, par simulation, les intérêts d'une structure multi-guide.

Les méthodes numériques utilisées ont dans un premier temps été appliquées à un profil elliptique. La comparaison avec plusieurs méthodes ainsi qu'avec des données expérimentales ont permis de valider le code numérique réalisé. L'exploitation du code de calcul a permis de trouver une nouvelle structure produisant un jet photonique

(figure 4). La comparaison avec un profil elliptique optimisé (Tableau I) permet d'apprécier l'avantage de la nouvelle structure que l'on nommera « multi-guide ».

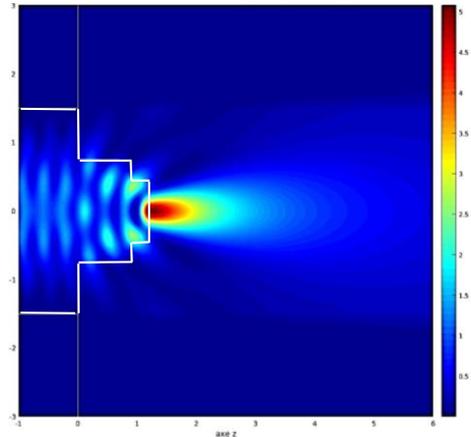


Fig. 4. Structure tri-guides générant un jet photonique pour

<u>Embout</u>	<u>Temps (s)</u>	<u>Valeur Max pour une incidence normalisée</u>	<u>Largeur à Mi-hauteur (cm)</u>
Ellipse 4cm	10,3	4,23	0,28
Bi-guide	1,07	4,52	0,4
Tri-guide	1,1	4,95	0,36

$h=3\text{cm}$; $h_{x1}=0.5h$; $h_{x2}=0.3h$; $h_{z1}=0.3h$ et $h_{z2}=0.1h$.

Tab I : Tableau comparatif pour $h=3\text{cm}$ en polarisation E/

Les résultats numériques obtenus via cette nouvelle structure sont encourageants. L'approche proposée offre au moins deux avantages : un gain en temps de calcul (la forme de l'embout étant plus simple) et une concentration en sortie plus intense qu'un profil elliptique.

Ceci nous encourage donc maintenant à poursuivre vers une mise en œuvre expérimentale.

B. Prototype experimental

L'étude expérimentale a été réalisée à partir du prototype développé lors de la thèse de B. Ounnas [6]. Ainsi, deux plaques de cuivre parallèlement disposées recouvrent un bloc de téflon ($\epsilon_r=2$, $h=3\text{cm}$, $L=l=20\text{cm}$). En vue de se ramener à une étude 2D, les dimensions latérales de la structure sont choisies grandes devant la longueur d'onde (1 cm pour 30GHz).

La structure est excitée par une source générant une onde plane (fig. 6). Quant à la cartographie du jet, elle est réalisée à l'aide d'une sonde (guide d'onde rectangulaire) dont le déplacement spatial est automatisé. L'ensemble source-détecteur est relié au VNA (Vector Network Analyzer). Ceci nous permet de relever le paramètre S21 proportionnel à l'amplitude du champ électrique.

La figure 5 schématise l'agencement du dispositif de mesure.

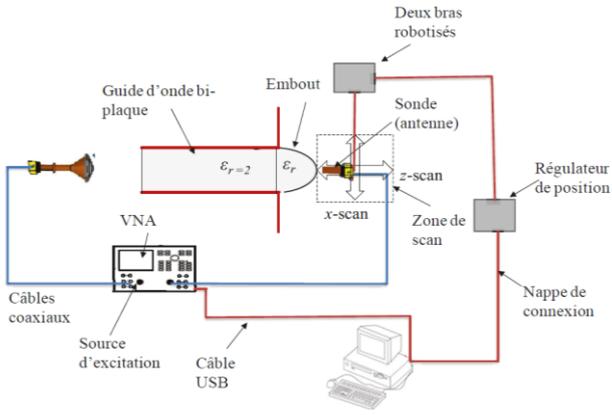


Fig. 5. Schéma du Dispositif expérimental [6]

A titre d'exemple, en considérant uniquement la source et la sonde distant de 30cm, la figure 6 permet de visualiser l'amplitude du champ transmis par la source à 30GHz. Ceci nous permet donc d'établir les caractéristiques de la source et valider le dispositif sonde.

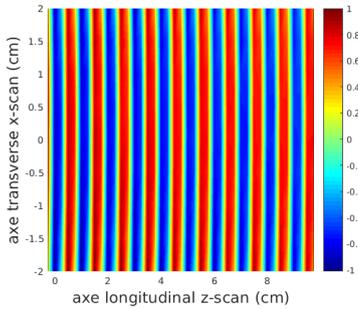


Fig. 6. Cartographie de la partie réelle du paramètre S21 normalisé.

Nous sommes confrontés à plusieurs problèmes, en particulier liés au calibrage du VNA. Ceci a pour effet de minimiser les pertes et les erreurs produites par l'enchaînement d'éléments entre la sortie et l'entrée du VNA. Dans notre cas, l'étude étant réalisée en espace libre, nous avons donc opté pour une correction post-mesure basée sur les standards Thru, (transmission totale), Reflect (une mesure en court-circuit par une plaque métallique), et Match (une mesure en interposant une mousse absorbante) [7]. La difficulté majeure reste bien entendu de définir le standard Thru. Dans cette étude nous l'avons associé à la mesure maximale obtenue suivant l'axe. Les paramètres corrigés sont donc obtenus par [6] par :

$$S_{11_{cor}} = \frac{S_{11_{mesure}} - S_{11_{match}}}{S_{11_{match}} - S_{11_{refl}}}$$

$$S_{21_{cor}} = \frac{S_{21_{mesure}} - S_{21_{refl}}}{S_{21_{true}} - S_{21_{refl}}}$$

C. Comparaison entre la modélisation et l'expérience.

Par souci pratique, l'étude s'est focalisée sur un embout multi-guide composé d'un seul tronçon, dont les dimensions choisies imposent au maximum d'intensité d'être suffisamment loin de l'embout. Les résultats sont présentés sur la figure 7. Malgré la mise en évidence d'une focalisation dont la position est similaire, l'allure générale reste discutable.

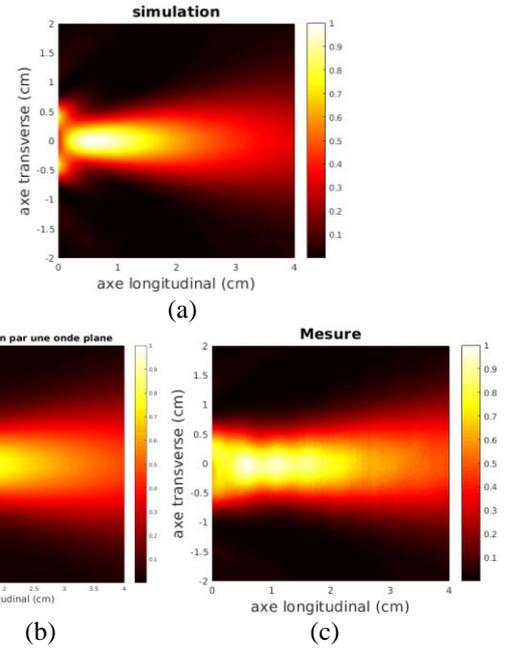


Fig. 7. Intensité du champ E_y normalisé en sortie de guide avec embout $1.5 \times 0.75 \text{ cm}^2$. (a) simulation avec une excitation monomode. (b) simulation avec 1 mode d'ordre supérieur. (c) Mesure de la structure excitée par une onde plane.

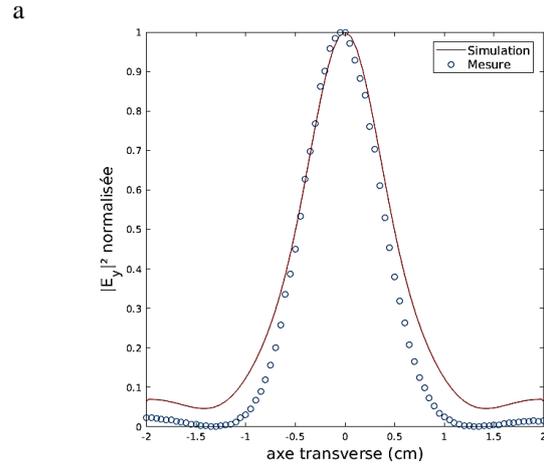


Fig. 9. Coupe transverse au maximum d'intensité.

I. JET PHOTONIQUE ET DETECTION (SIMULATION).

Dans cette partie nous souhaitons aborder une application particulière du jet électromagnétique : la détection. Nous nous proposons de détecter une tige de section carrée dont les dimensions restent inférieures à la longueur d'onde. L'étude est réalisée à l'aide de l'outil de modélisation que nous avons développé.

La comparaison sera faite entre trois configurations, les deux profils précédents (guide sans embout (plat) et multi guide $1.5 \times 0.75 \text{ cm}^2$) et un multi-guide composé d'un tronçon dont la géométrie est $1 \times 0.75 \text{ cm}^2$ ($h_{x1} \times h_{z1} \text{ cm}^2$). Les coupes transverses au maximum d'intensité (centre du jet) sont reproduites à la figure 9 ; on peut en particulier remarquer l'évolution de la largeur à mi-hauteur.

II. CONCLUSION.

Malgré les difficultés rencontrées pour la partie expérimentale, les premiers résultats restent encourageants. Cette étude, a permis de mettre en évidence le bien-fondé de cette nouvelle structure, qui rappelons-le offre un triple avantage, notamment par rapport aux travaux précédents :

- Une simplicité géométrique (qui facilite l'usinage de l'embout),
- Une amélioration du temps de calcul numérique
- De meilleures concentrations.

Nous avons de plus montré, qu'une telle structure peut détecter des objets métalliques de taille 1000 fois inférieure à la longueur d'onde.

Les deux prochains objectifs sont liés à la partie expérimentale. Comme évoqué à plusieurs reprises, le premier concerne la maîtrise de l'excitation via une onde plane. Quant au second objectif, ce sera la réalisation d'une structure entièrement guidée, en vue de réduire les pertes d'insertion en entrée, et ainsi mieux maîtriser l'excitation et la réception en vue d'utiliser plus efficacement le jet dans le cadre d'une détection à travers des surfaces opaques.

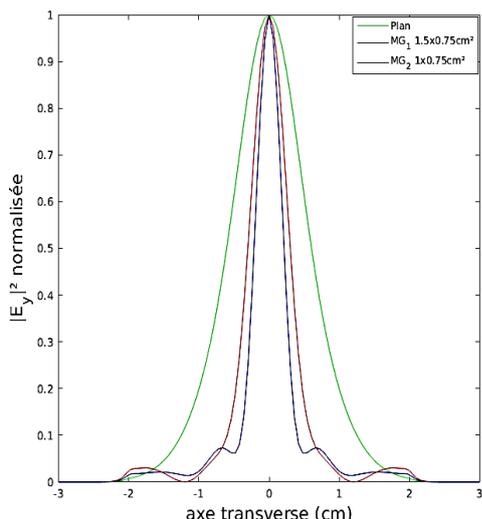


Fig. 9. Coupe transverse au niveau du centre du jet, pour les différentes structures.

L'étude du coefficient de réflexion (fig. 10) en fonction de la dimension d'une tige métallique de section carrée, placée au centre de l'intensité maximal (cf fig. 9) permet d'apprécier le lien entre la largeur à mi-hauteur du jet et la sensibilité de détection de la tige.

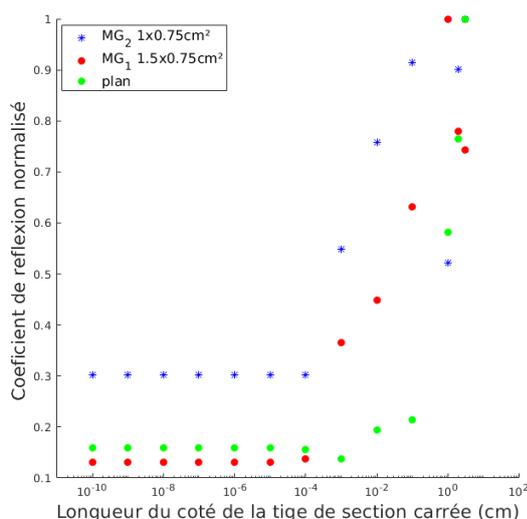


Fig. 10 Evolution du coefficient de réflexion normalisé, en fonction de la longueur du côté d'une tige métallique de section rectangulaire.

Bien que la maîtrise de l'excitation du guide soit encore à améliorer, cette première étape nous a permis de valider en partie, la possibilité de générer un jet électromagnétique via une structure multi-guide. Nous avons l'espoir de fournir de meilleurs résultats expérimentaux lors de la présentation orale.

Ainsi à la différence d'une émission standard (embout plat), une structure générant un jet permet de détecter des tiges métalliques très inférieures à la longueur d'onde. La prochaine étape, sera la confirmation expérimentale de ces effets, que nous espérons présenter lors de la présentation orale.

Remerciements

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



Références

- [1] Y. Takakura, S. Lecler, B. Ounnas, S. Robert, B. Sauviac. « Boundary Impedance Operator to Study Tipped Parallel Plate Waveguides. », IEEE Trans. on Ant. and Prop. 62 (11), pp. 5599 – 5609, 2014.
- [2] B. Ounnas, et al., « Single and Dual Photonic Jets and Corresponding Backscattering Enhancement With Tipped Waveguides : Direct Observation at Microwave Frequencies », IEEE Trans. on Ant. and Prop, Vol, 63, NO.12, december 2015
- [3] Lifeng Li « Fourier Modal Method » E. Popov, editor (Institut Fresnel, CNRS, AMU, 2014).
- [4] K. Edee "Numerical scheme for the modal method based on subsectionnal Gegenbauer polynomial expansion : Application to biperiodic binary grating" Josa A Vol. 32 Issue 3 pp. 402-410 (2015)
- [5] G. Granet, « Coordinate Transformation Methods » E. Popov, editor (Institut Fresnel, CNRS, AMU, 2012).
- [6] B. Ounnas, « Étude et optimisations de jets photoniques pour des applications non conventionnelles dans les domaines optique et hyperfréquences », Thèse de doctorat, sous la direction de Bruno Sauviac. Soutenue en 2015 à Saint-Etienne.
- [7] Free Space Materials Measurement Seminar, June 2005, Agilent technologie