



HAL
open science

Modélisation et conception d'antennes à faisceaux gaussiens aux ondes millimétriques et submillimétriques, application à la caractérisation de matériaux et l'imagerie en bande J (220-330 GHz)

Daniel Bourreau, Gregory Gaudin, Alain Peden

► **To cite this version:**

Daniel Bourreau, Gregory Gaudin, Alain Peden. Modélisation et conception d'antennes à faisceaux gaussiens aux ondes millimétriques et submillimétriques, application à la caractérisation de matériaux et l'imagerie en bande J (220-330 GHz). Journées Nationales Microondes (JNM), Jun 2022, Limoges, France. hal-03722006

HAL Id: hal-03722006

<https://hal.science/hal-03722006v1>

Submitted on 13 Jul 2022

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.

Modélisation et conception d'antennes à faisceaux gaussiens aux ondes millimétriques et submillimétriques, application à la caractérisation de matériaux et l'imagerie en bande J (220-330 GHz)

Daniel Bourreau¹, Gregory Gaudin¹, Alain Peden¹

¹Lab-STICC, UMR 6285 CNRS, IMT Atlantique, technopôle Brest-Iroise, CS 83818, 29238 Brest Cedex 3
daniel.bourreau@imt-atlantique.fr

Résumé — Les ondes Terahertz permettent de sonder la matière afin d'en extraire des caractéristiques ou analyser une structure. Afin d'optimiser un banc de caractérisation en bande J (220-330 GHz), des outils de simulation adaptés aux grandes tailles des fonctions ainsi qu'à la fréquence de travail sont développés. Les outils numériques permettent de simuler un cornet seul ou couplé avec une lentille à forme complexe.

1. Introduction

Un banc de caractérisation opérant en bandes Ka, W et J permet de réaliser des caractérisations de matériaux solides et non solides[1]. Un dispositif expérimental ainsi qu'un logiciel de traitement de données permettent d'extraire précisément la permittivité du matériau à l'étude[2]. Les caractérisations actuelles se font sur un unique pixel. Afin d'augmenter la résolution, il est envisagé de réaliser un imageur sub-THz en transmission, utilisable avec le banc de caractérisation. Une étude électromagnétique des constituants quasi-optiques (cornets, lentilles, miroirs) est actuellement menée. Les logiciels commerciaux tels que HFSS, CST ou encore FEKO ne sont pas adaptés à la grande taille des fonctions pour ces bandes de fréquences, induisant un temps de simulation trop conséquent pour réaliser des études de conception.

L'étude suivante se focalise sur la caractérisation d'antennes à faisceau gaussien (GOLA : Gaussian Optic Lens Antenna), hautement directives. Le rayonnement de ces antennes peut être approché en utilisant le formalisme des faisceaux gaussiens[3], généralement utilisé en optique laser. Il est également possible d'utiliser ce formalisme pour décomposer un champ électromagnétique arbitraire en faisceaux gaussiens élémentaires[4] et réaliser un lancé de faisceaux permettant de décrire la propagation et l'interaction du champ électromagnétique à travers le système quasi-optique[5].

Les méthodes et modèles permettant de simuler une GOLA seront tout d'abord présentés. Les résultats des simulations seront ensuite discutés, pour enfin être comparés avec des premières mesures réalisées en bande J. Des mesures mono-pixel réalisées avec le banc de caractérisation en bande J sont finalement rappelées.

2. Modélisation d'une GOLA

2.a. Application des faisceaux gaussiens

Le formalisme des faisceaux gaussiens permet d'exprimer analytiquement le rayonnement d'un cornet conique (corrugué ou non) ou diagonal [6]. Seul le lobe principal est cependant modélisé. Dans l'optique de concevoir un système optimisé, il est nécessaire de tenir compte des différents phénomènes pouvant altérer les résultats (ondes stationnaires, effets de bords, lentilles non-idéales, ...).

Les faisceaux gaussiens peuvent également être employés pour décomposer un champ incident — connu — sur une surface de décomposition [4]. Chaque faisceau est ensuite suivi à travers le système et leur combinaison permet d'exprimer la propagation du champ en chaque point de l'espace. L'interaction avec des objets complexes, comme des lentilles à profil arbitraire, peut ainsi être simulé en un temps raisonnable.

La modélisation électromagnétique de la GOLA est séparées en plusieurs étapes, explicitées ci-après.

2.a.a. Modélisation du cornet

La modélisation du cornet est réalisée via la méthode de raccordement modal[7] ("Modes Matching" ou MM). Pour le cornet diagonal, la section diagonale, supposée excitée par deux modes orthogonaux TE₁₀ et TE₀₁, est décomposée en une série de guides et de discontinuités. Une matrice de répartition généralisée $[S_{GSM}]$ raccorde les modes d'entrée et ceux présents à l'ouverture, permettant d'obtenir les champs \vec{E}_{ap} et \vec{H}_{ap} . Cette matrice est partitionnée en sous-matrices S_{11} , S_{12} , S_{21} et S_{22} .

Pour la section diagonale, les coefficients des modes de sortie sont calculés avec l'Équation 1

$$[t] = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} [S_{GSM,21}] \quad (1)$$

Le champ électrique à l'ouverture correspond à la somme des modes \vec{e}_n propagatifs (Équation 2). Un principe similaire s'applique pour le champ magnétique.

$$\vec{E}_{ap} = \sum_{n=1}^N t_n \cdot \vec{e}_n \quad (2)$$

Le calcul montre que les deux premiers modes TE transportent la quasi-totalité de la puissance rayonnée et partagent les mêmes constantes de normalisation, coefficients t_n et impédances transverses Z_{tn} . Les champs électromagnétiques transverses à l'ouverture peuvent ainsi être simplifiés.

2.a.b. Calcul des champs proches et lointains

Les champs proches et lointains sont déduits des champs à l'ouverture via les formules de Stratton-Shu (Équation 3 [8]) simplifiées et appliquées pour une demi-sphère centrée sur l'ouverture.

Afin d'avoir des bornes d'intégration simples, on se place dans le repère $(x'y'z)$. Si \vec{r}_a est le vecteur indiquant un point sur l'ouverture, \vec{r} un point situé sur la demi-sphère, on pose $\vec{\xi} = \vec{r}_a - \vec{r}$, $\xi = \|\vec{\xi}\|$ et $\hat{\xi} = \frac{\vec{\xi}}{\xi}$. On a donc :

$$\begin{aligned} \vec{E}_{sph}(\vec{r}) &= \frac{jk}{4\pi} \iint_{ap} \left\{ Z\hat{\xi} \wedge \hat{\xi} \wedge \vec{J}(\vec{r}_a) + \hat{\xi} \wedge \vec{M}(\vec{r}_a) \right\} \\ &\quad \times \frac{e^{-jk\xi}}{\xi} dx' dy' \\ \vec{H}_{sph}(\vec{r}) &= jk4\pi \iint_{ap} \left\{ \frac{1}{Z}\hat{\xi} \wedge \hat{\xi} \wedge \vec{M}(\vec{r}_a) - \hat{\xi} \wedge \vec{J}(\vec{r}_a) \right\} \\ &\quad \times \frac{e^{-jk\xi}}{\xi} dx' dy' \end{aligned} \quad (3)$$

Où Z est l'impédance de l'onde en espace libre, et $\vec{J}(\vec{r}_a)$ et $\vec{M}(\vec{r}_a)$ sont les courants électriques et magnétiques sur la surface de l'ouverture résultants respectivement des champs magnétiques et électriques. Le vecteur normal à la surface étant suivant \hat{z} , seuls les champs transverses sont nécessaires au calcul.

2.a.c. Propagation et interaction avec la lentille

Le champ électromagnétique \vec{E}_{sph} appliqué sur la demi-sphère virtuelle, de rayon 15λ , est discrétisé et décomposé en multiples faisceaux gaussiens dont les coefficients sont calculés via une méthode dite de collocation[4][5]. Chaque faisceau gaussien est dirigé suivant le vecteur de Poynting local au point de position $\vec{r}_p \in$ (sphère) considéré. Ceci permet de prendre en compte les propriétés physiques du champ en moins de faisceaux qu'une décomposition de Gabor[4][5].

Chaque point sur la sphère possède son repère propre. Afin de traiter efficacement les nombreux changements de repère nécessaires pour les calculs, l'utilisation des quaternions est privilégiée aux matrices de transformation ou de rotation. L'utilisation de la mémoire et du calcul vectoriel par MATLAB s'en trouve ainsi optimisée.

La surface de la lentille est décomposée en surface élémentaires canoniques, permettant s'obtenir des expressions analytiques et ainsi optimiser le temps de calcul. L'interaction de chaque faisceau gaussien avec la lentille est ensuite considérée. Plusieurs options sont à l'étude :

- Il est possible de décomposer le faisceau gaussien en une somme d'ondes plane et de déterminer les

coefficients de transmission et de réflexion pour chacune d'elles, pour ensuite recomposer des faisceaux gaussiens.

- Il est également possible de considérer qu'un faisceau gaussien réfléchi et un faisceau gaussien transmis sont générés au niveau de l'interface. Chaque faisceau est ensuite suivi d'une manière similaire à un rayon de lumière en optique géométrique.

Le champ électromagnétique en chaque point de l'espace s'obtient enfin en sommant l'ensemble des faisceaux gaussiens.

2.b. Comparaison avec HFSS et discussions

La modélisation d'un cornet diagonal (Sections 2.a.a. et 2.a.b.) a été réalisée sur MATLAB. Le cornet est simulé comme une antenne pyramidale tournée de 45 degrés autour de l'axe des z . Deux repères sont ainsi définis : $(x'y'z)$ orienté selon les côtés de l'ouverture et (xyz) orienté suivant les diagonales (plans E et H du cornet). Une comparaison avec une simulation HFSS du cornet en champs proches et lointains est présentée en Figures 1 et 2.

On remarque, sur la Figure 1, que le mode principal du faisceau gaussien calculé à partir des données constructeur (courbe bleue) correspond parfaitement au lobe principal des diagrammes. Le modèle (courbe jaune) possède un très bon degré de correspondance avec la simulation HFSS (courbe rouge). L'intérêt du modèle réside dans sa capacité à rendre compte des lobes secondaires. Le cornet diagonal présente des lobes secondaires très faibles sur les plans E et H, cependant ceux-ci sont plus conséquents sur les plans à 45 degrés. Il conviendra donc de déterminer si la présence de ces lobes affecte le couplage avec une lentille.

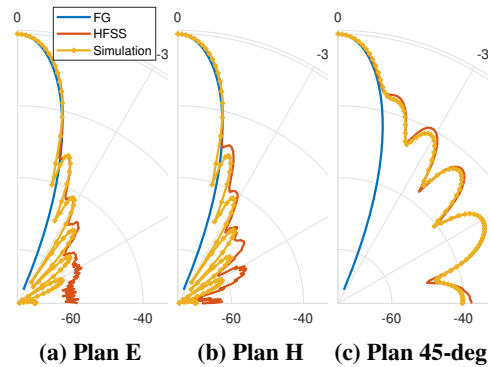


Figure 1. Comparaison des diagrammes en champs lointain modélisés et simulés d'un cornet diagonal à 275 GHz.

La Figure 2 présente le champ électrique, dans le repère $(x'y'z)$, appliqué sur une sphère virtuelle située en zone de Fresnel. On y retrouve la présence de lobes secondaires le long des côtés de l'ouverture (plans 45 degrés du cornet). Le diagramme champ proche simulé est très proche du résultat obtenu par HFSS en un temps de simulation négligeable (quelques minutes contre 1h30). On remarque également que la zone de valeurs supérieures à

$1/e^2$ [3] contient bien le faisceau gaussien calculé à partir des données constructeur.

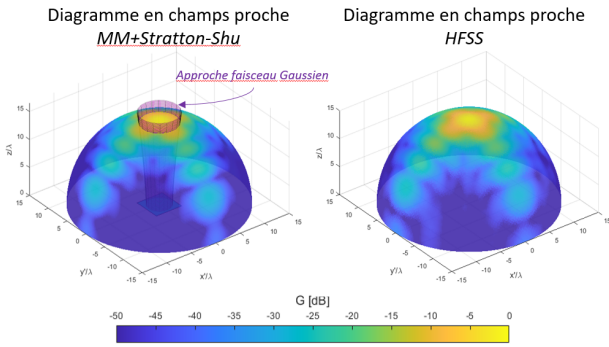


Figure 2. Champ électrique \vec{E}_{sph} appliqué sur une demi-sphère virtuelle de rayon 15λ à 275 GHz.

3. Expérimentations en bande J

3.a. Caractérisation d'un cornet diagonal

Une mesure de gain en champ lointain a été réalisée pour le cornet seul ainsi que associé à une lentille plan-convexe en PTFE. Les adaptations des éléments testés sont inférieures à -23dB après une calibration dite TRL[2].

Un bilan de liaison a été réalisé en utilisant deux cornets diagonaux supposés identiques. Une mesure précise de la distance séparant les antennes permet de récupérer leurs caractéristiques via la formule des télécommunications. Le gain mesuré est comparé au gain calculé en utilisant les champs à l'ouverture du cornet diagonal déterminés via la méthode du raccordement modal (Équation 4).

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{\left| \iint_{ap} \vec{E}_{ap} dx' dy' \right|^2}{\iint_{ap} |\vec{E}_{ap}|^2 dx' dy'} \quad (4)$$

Il est visible, sur la Figure 3, que la mesure du gain est très proche de celui calculé. Le gain mesuré pour le cornet couplé avec une lentille plan-convexe en PTFE est présenté en Figure 4. La position de la lentille (diamètre 5 cm, focale 100 mm) a été optimisée pour obtenir le meilleur bilan de liaison sur toute la bande ([9]). Le positionnement mécanique est unique pour toutes les fréquences. Les caractéristiques de cette nouvelle antenne sont déduites par substitution, le gain de l'antenne de réception étant inchangé. Le gain du système est augmenté jusqu'à 39 dBi à 280 GHz.

Le banc est actuellement en cours de modification pour être en capacité de réaliser des mesures de diagrammes de champs proches et lointains, ce qui permettra de corroborer les résultats des simulations présentées précédemment.

3.b. Caractérisation de matériaux

Le banc de caractérisation fonctionne comme un imageur THz mono-pixel en transmission. Des mesures ont été effectuées sur la bande J[1] suivant un protocole expérimental similaire aux bandes Ka et W.

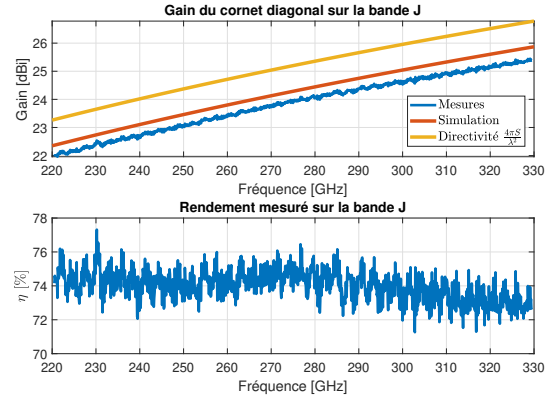


Figure 3. Comparisons entre le gain calculé et le gain mesuré sur la bande J

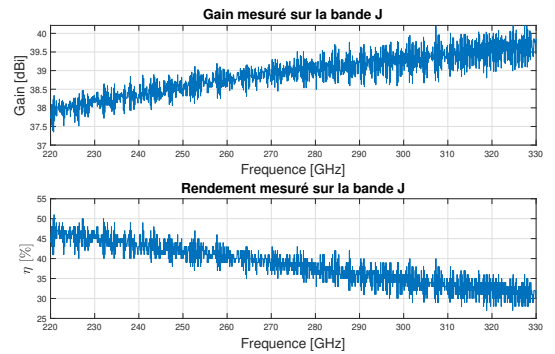


Figure 4. Mesure du gain de la GOLA sur la bande J.

3.b.a. Extraction de la permittivité

En plaçant une lame diélectrique à faces parallèles en incidence normale au niveau de la ceinture [2][10][11], il est possible de déterminer la matrice S en espace libre. La permittivité du matériau (Figure 5) est déterminée en comparant la matrice S au modèle analytique de la lame, supposant une onde plane comme excitation ([2][10][11]). Cette condition est localement remplie si l'échantillon est placé au niveau de la ceinture d'un faisceau gaussien. La partie réelle de la permittivité peut être modélisée par sa valeur moyenne, tandis qu'une régression linéaire doit être privilégiée pour la partie imaginaire.

3.b.b. Ajustement du modèle du matériau

La valeur moyenne de la permittivité ainsi extraite est utilisée, avec les paramètres S_{11} et S_{21} mesurés, pour raffiner la largeur estimée de la lame. Cette estimation est ensuite utilisée pour simuler les coefficients de transmission et de réflexion. La Figure 6 illustre la bonne correspondance entre la simulation et la mesure, même si une régression linéaire permet d'ajuster finement les coefficients de transmission.

4. Conclusion

Les cornets diagonaux présentent un réel intérêt, présentant des champs électromagnétiques proches du cornet circulaire corrugué et donc proche d'un faisceau gaussien. Le banc de caractérisation quasi-optique permet des

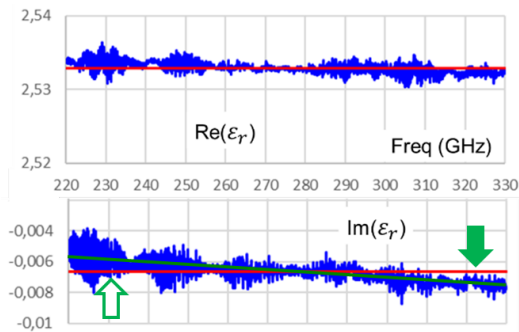


Figure 5. Caractérisation de la Rexolite en bande J

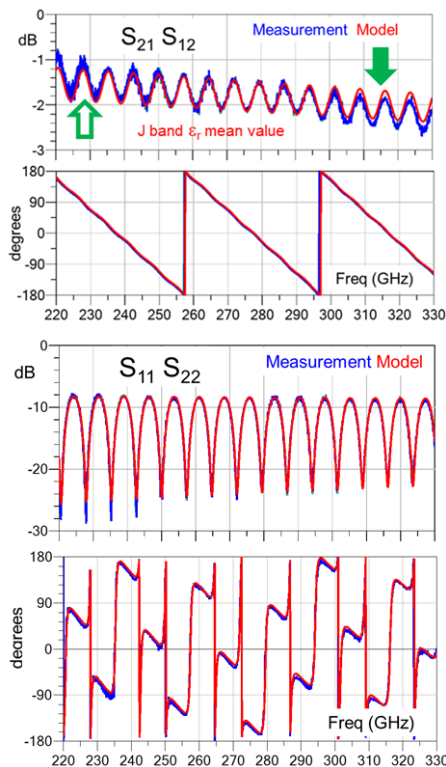


Figure 6. Paramètres S mesurés et modélisés à partir de la permittivité moyenne

mesures fiables des paramètres S en espace libre, notamment en bande J. Les caractérisations actuellement réalisées peuvent être apparentées à une imagerie mono-pixel. L'analyse d'un matériau, par exemple pour réaliser un contrôle qualité non destructif, peut nécessiter d'obtenir une analyse multi-pixel afin d'obtenir une résolution telle que l'on puisse localiser un défaut dans la structure. La description fine des constituants du système permet ainsi de comprendre les phénomènes mis en jeu.

Un ensemble d'outils numériques, adaptés à la grande taille du système devant la longueur d'onde, est ainsi mis en place afin de modéliser le banc, ouvrant la voie à la conception d'un imageur THz en transmission. La modélisation d'un cornet diagonal en bande J a, par exemple, été réalisé et comparé à l'outil commercial HFSS, donnant des résultats similaires avec un gain de temps de calcul consi-

dérable. Il a également été montré qu'un champ électromagnétique peut être décomposé en faisceaux gaussiens, permettant la modélisation de la GOLA ainsi que d'un système quasi-optique complet. Ces études sont partie intégrante d'une thèse de doctorat réalisée en collaboration avec un industriel. Les applications sont multiples au-delà d'un imageur (systèmes de télécommunications 5G, liaisons satellites, ...)

Références

- [1] D. Bourreau and A. Péden, "Solid and Non-Solid Dielectric Material Characterization for Millimeter and Sub-Millimeter Wave Applications," p. 4.
- [2] D. Bourreau *et al.*, "A Quasi-Optical Free-Space Measurement Setup Without Time-Domain Gating for Material Characterization in the $\text{W}\text{W}\text{-Band}$," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 6, pp. 2022–2028, Dec. 2006.
- [3] P. F. Goldsmith, *Quasioptical systems : Gaussian beam quasioptical propagation and applications*, 1998, oCLC : 1141148975.
- [4] A. Chabory *et al.*, "Application of gaussian beam based techniques to the quasi-optical systems of radiofrequency radiometers," Apr. 2010, p. pp 1.
- [5] J. Hillairet, "Applications du formalisme des faisceaux gaussiens à la modélisation de l'interaction d'une onde électromagnétique avec un objet 3D complexe," phdthesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III, Dec. 2007.
- [6] J. Johansson and N. Whyborn, "The diagonal horn as a sub-millimeter wave antenna," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 40, no. 5, pp. 795–800, May 1992.
- [7] J. A. *et al.*, "Computer Aided Design of Waveguide Devices by Mode-Matching Methods," in *Passive Microwave Components and Antennas*, V. Zhurbenko, Ed. InTech, Apr. 2010.
- [8] K. Elis, "Modélisation par faisceaux gaussiens de systèmes quasi-optiques intégrant des surfaces dichroïques pour la radiométrie millimétrique," phd, Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Dec. 2012.
- [9] Y. Qin and Q. Guo, "Quasi-optic lens antenna with corrugated feed horns," *International conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, 1998.
- [10] J. Le Bras *et al.*, "Quasi optical circuit measurements method in W band," *ESA workshop*, 1998.
- [11] M. LeGoff *et al.*, "Ka band quasi optical test bench using focusing horn," *Proc. 29th Eur. Microw. Conf.*, pp. 240–243, Oct. 1999.