

## Antenne lentille de type Lüneburg réalisée en LTCC pour 60 GHz

F. Gallée<sup>1</sup>, C. Kärfelt<sup>1</sup>, D. Zelenchuk<sup>2</sup>, I. Munina<sup>3</sup>, M. Sinou<sup>1</sup> et V. Kirillov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IMT Atlantique, Lab-STICC, UMR CNRS 6285, F-29238 Brest

<sup>2</sup>The ECIT Institute, Queen's University Belfast, Belfast, BT3 9DT, United Kingdom

<sup>3</sup>Department of Microelectronics and Radio Engineering, St. Petersburg Electrotechnical University «LETI»,  
St. Petersburg, 197376, Russia  
francois.gallee@imt-atlantique.fr

**Résumé** – Une lentille type Lüneburg conçue à 60 GHz, créée à l'aide de la méthode optique de transformation quasi-conforme, est présentée. La fabrication de l'antenne est faite via la technologie LTCC avec un matériau hôte ayant une permittivité relative de 5.9. Une variation 3D de la permittivité effective est obtenue par la création d'un milieu inhomogène de type métamatériau. Le diamètre de l'antenne est de 19 mm et son épaisseur est inférieure à 2 mm. Le gain maximal mesuré de l'antenne à 60 GHz est de 16 dBi. La capacité de balayage du faisceau est démontrée avec une perte de balayage de 1 dB pour un dépointage du faisceau de  $\pm 25^\circ$ .

### 1. Introduction

Les futurs systèmes de communication sans fil imposent de nouvelles exigences en matière de fiabilité des connexions et de débit de données. L'exploitation de la bande de 60 GHz a un réel intérêt pour obtenir des débits élevés supérieurs au Gigabit grâce à des canaux de l'ordre du GHz, d'établir des liaisons avec des faibles temps de latence et sécurisés du fait de la faible portée. Dans un contexte multi-utilisateur, des systèmes multifaisceaux directs doivent être conçus pour compenser les pertes sur le trajet et/ou les phénomènes de blocage.

La conception de systèmes antennaires avec de la formation faisceau 100% numérique devient très vite complexe à ces fréquences. Ceci s'explique par les contraintes liées à l'atténuation importante au niveau de la connexion entre l'antenne et le module RX/TX nécessitant d'intégrer le frontend RF au plus proche des antennes. C'est pourquoi, on constate à ce jour un regain d'intérêt pour des systèmes intégrant de la formation faisceau analogique combiné avec de la formation faisceau numérique.

Le principe est de pouvoir générer plusieurs faisceaux directs simultanés en utilisant un dispositif focalisant de type lentille ou réflecteur associé à un réseau d'antennes connecter module RX/TX. Chaque antenne unitaire du réseau est alors associée à un faisceau. En termes de performance, la limitation est principalement liée à une dégradation du diagramme de rayonnement lorsque l'angle de dépointage du faisceau augmente.

Parmi les systèmes focalisant candidats, la lentille de Lüneburg permet théoriquement d'obtenir des

performances multifaisceaux avec peu de perte de balayage dans un large champ de vision et elle peut être réalisée sous une forme sphérique pour un scan 3D soit sous une forme cylindrique comprimée pour un scan 2D [1], [2]. Nous présentons dans ce papier cette dernière topologie.

### 2. Lentille Lüneburg comprimée

La lentille de Lüneburg est une lentille à gradient d'indice à symétrie sphérique dont la permittivité relative varie radialement avec  $r$  désignant le rayon et  $R$  le rayon total

$$\epsilon_r(r) = 2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2$$

Afin de réduire son volume et de la rendre plus compatible avec diverses sources primaires, l'utilisation de la méthode de l'optique de transformation (OT) a été proposée. Avec l'OT, la lentille peut être partiellement ou totalement transformée en une forme cylindrique avec une surface plane [1], [2]. La réduction de la structure anisotrope résultante à la distribution isotrope inhomogène ne conduit pas à des divergences significatives dans la mise en œuvre [2].

La lentille réalisée est basée sur le matériau LTCC A6M-

E de Ferro ( $\epsilon_r=5.9$ ,  $\tan\delta=0.002$ ) avec une épaisseur de couche de 96  $\mu\text{m}$ . Afin d'obtenir la variation de permittivité montrée dans la

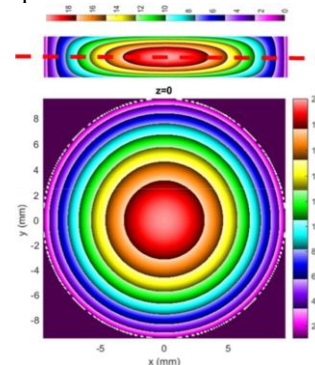
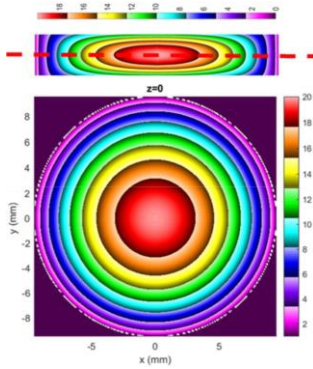
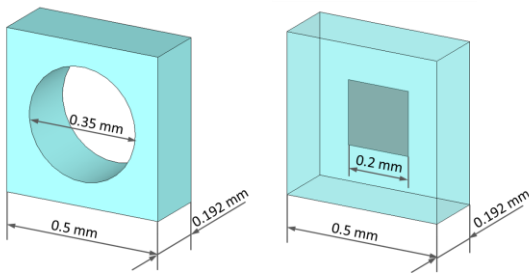


Figure 1, deux types de cellules unitaires avec une période de 0.5 mm sont implémentées : avec un patch et avec un trou, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**



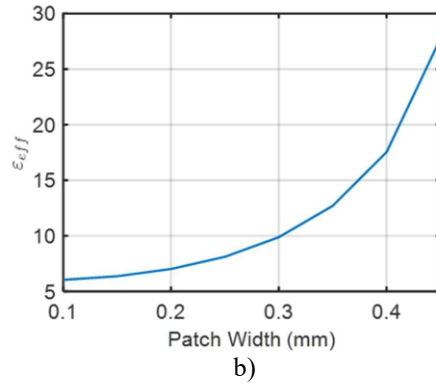
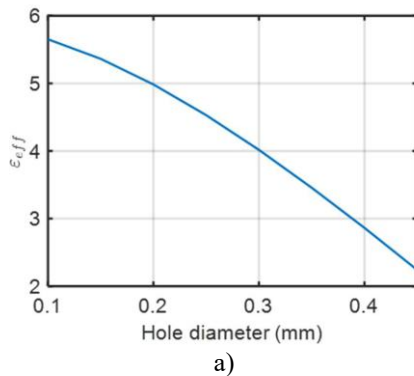
**Figure 1. Distribution de la permittivité pour la lentille de Luneburg comprimée.**

Afin de modifier localement la permittivité relative du milieu, deux techniques sont employées. Pour obtenir une permittivité effective inférieure à 6, le matériau est percé. Pour obtenir une permittivité effective supérieure à 6, des patches sont sérigraphiés sur les différentes couches du LTCC (figure 2). La variation du diamètre du trou et de la côte du patch allant de 0.1 à 0.45 mm permet de contrôler la variation de la permittivité relative du milieu de 2 à 27, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**



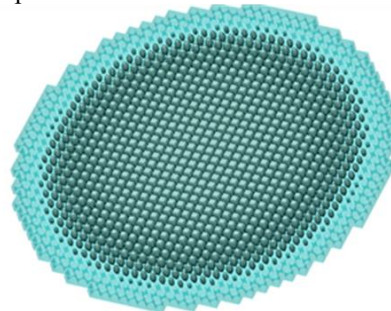
**Figure 2. Cellule unitaire**

Les **Erreur ! Source du renvoi introuvable..a** et **Erreur ! Source du renvoi introuvable..b** présentent respectivement la variation de la permittivité relative en fonction du diamètre des trous et de la largeur du patch.



**Figure 3. a) Variation de la permittivité relative en fonction du diamètre des trous, b) largeur des patches pour le métamatériau**

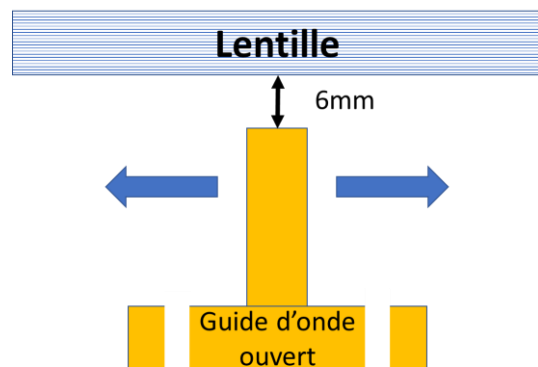
La lentille est conçue avec 20 couches LTCC et illustrée sur la Figure 4. Elle a un diamètre de 19 mm et une hauteur de 1,92 mm. On peut voir que la majorité de la structure est composée de cellules unitaires de type patch, les cellules unitaires de type trou occupent une petite zone proche de l'extérieur de la lentille.



**Figure 4. Lentille de Luneburg en métamatériau LTCC**

### 3. Résultats théoriques

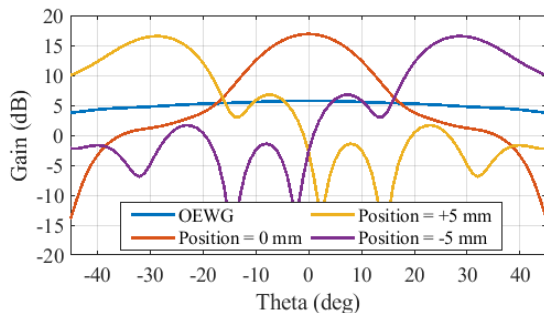
La lentille est illuminée par un guide ouvert en bande V. La distribution de la phase a été optimisée pour une distance focale de 6 mm entre l'ouverture du guide ouvert et la lentille. Le dépointage du faisceau sera obtenu par un déplacement latéral du guide ouvert, Figure 5.



**Figure 5. Lentille illuminée par un guide d'onde ouvert en bande V**

La Figure 6 présente le diagramme en rayonnement dans le plan E du guide ouvert seul et associé à la lentille

à trois positions différentes : au centre et décalé de plus et moins 5 mm. Le gain du guide d'onde ouvert est de 5dBi. La lentille permet d'augmenter la directivité et d'atteindre un gain de 17 dBi dans l'axe.

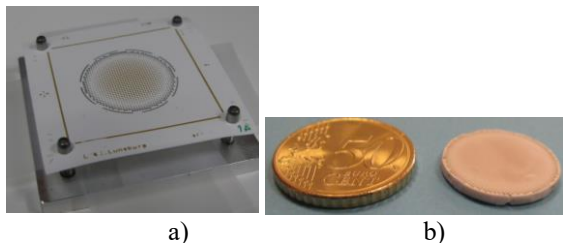


**Figure 6. Diagramme de rayonnement simulé dans le plan E à 60 GHz pour trois positions du guide ouvert (0 mm et ± 5 mm)**

#### 4. Fabrication

La fabrication est réalisée au sein du laboratoire Lab-STICC. 20 couches de LTCC A6M-E-5mil sont découpées par laser puis sérigraphiées avec une encre d'or (Ferro FX30-025H). Les couches sont empilées avec l'aide d'un support d'alignement, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**6a. Pour chaque couche, les trous de métamatériau sont remplis avec du HEC 2wt% (hydroxy-éthyle-cellulose) qui agit comme un matériau fugitif. Son rôle est de remplir les trous pour les protéger de l'écrasement lors du laminage puis de disparaître lors de la cuisson. Ce procédé a été spécifiquement développé afin de réaliser cette lentille Lüneburg, [3]. La lentille finale est présentée sur la

b)



**Figure 7. a) Empilage de la toute première couche sur support d'alignement, b) La lentille finalisée.**

#### 5. Résultats expérimentaux

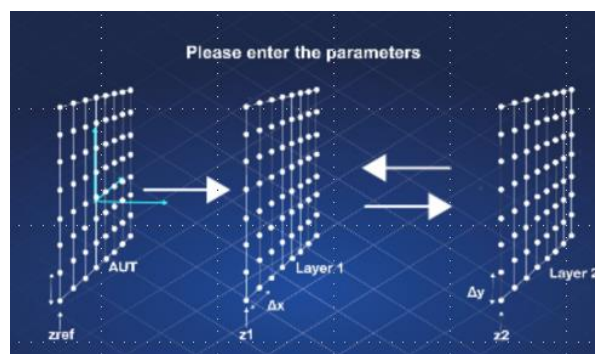
Afin de caractériser en rayonnement le dispositif, un banc de mesure équipé d'un robot 6 axes, Figure 8, a été utilisé. Le dispositif sous test est posé sur une table en composite non métallique et reste immobile. Ce qui a un réel intérêt du point de vue mécanique et fixation du dispositif. La sonde de mesure est installée sur le bras du robot et fait un scan autour du dispositif en suivant un parcours spécifié qui peut être planaire ou sphérique.



**Figure 8. Banc de mesure robotisé**

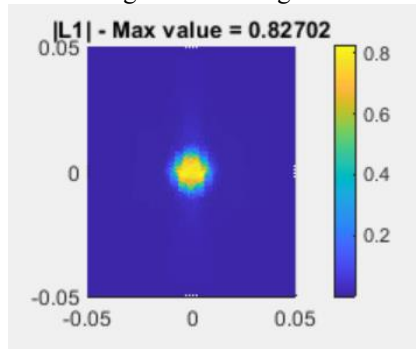
Le signal à 60 GHz est généré à partir d'un multiplieur X6 (R&S®SMZ75) connecté à un générateur de signaux RF (R&S®SMA100B). Le guide d'onde ouvert, qui sera la source primaire de notre lentille, est directement connecté par guide à la sortie du multiplieur. Côté réception, la sonde est une antenne de type cornet connectée à un mélangeur harmonique externe (R&S®FS-Z75) et connecté lui-même à un analyseur de spectre (R&S®FSV).

Selon la directivité de l'antenne, la sonde n'est pas forcément dans la zone de champ lointain. Dans ce cas, il est nécessaire de faire une mesure en champ proche. Pour cela, il faut mesurer l'amplitude et la phase du signal. La mesure de la phase est assez critique à ces fréquences et très sensible à la torsion des câbles. Pour ces raisons, nous faisons des mesures uniquement en amplitude. La distribution de phase dans un plan de mesure est calculée à partir de la mesure de la distribution en amplitude dans deux plans parfaitement contrôlés et en appliquant d'un algorithme itératif basé sur la méthode l'IFT (Inverse Fourier Transformation) dont le principe est présenté sur la Figure 9.

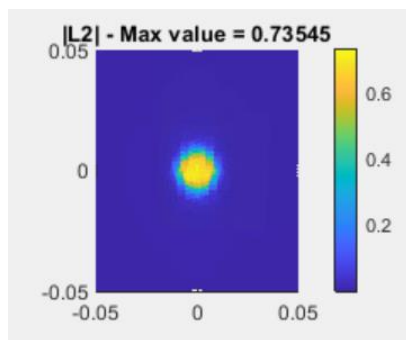


**Figure 9. Principe d'extraction de la distribution de la phase**

Les mesures des amplitudes du champ électrique dans les plans à 10 mm et à 15 mm sont respectivement présentées sur les Figure 10.a et Figure 10.b.



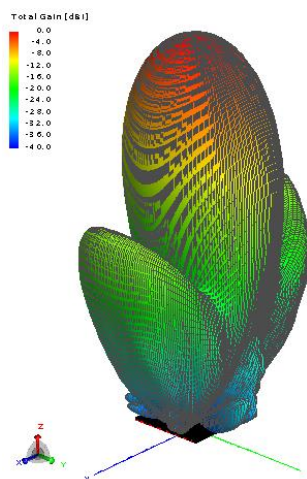
a)



b)

**Figure 10. Distribution du champ électrique mesuré à 10 mm (a) et 15 mm (b)**

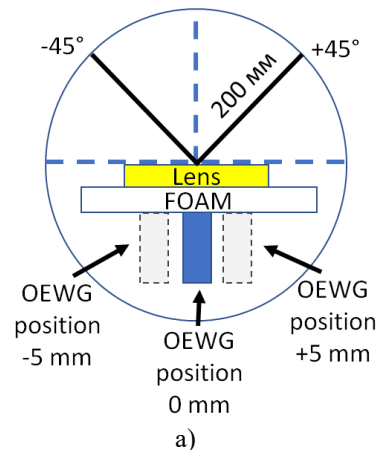
Une fois, la distribution de la phase extraite, le diagramme de rayonnement est calculé et présenté sur la Figure 11 en appliquant une transformation classique champ proche-champ lointain. Pour cela, nous utilisons directement cette fonctionnalité dans le logiciel Altair FEKO®.



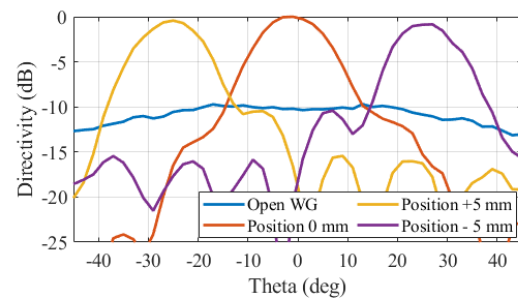
**Figure 11. Diagramme de rayonnement 3D mesuré**

Afin de caractériser les performances de la lentille dans le cas du dépointage du faisceau, une mesure 2D circulaire avec un rayon de 200 mm entre  $-45^\circ$  et  $+45^\circ$  a été effectuée. Le guide d'onde ouvert est placé au centre et décalé de 5 mm des deux côtés. La Figure 12 présente

respectivement le principe de mesure et les diagrammes de rayonnement obtenu pour les trois positionnements.



a)



b)

**Figure 12. a) principe de mesure b) diagramme de rayonnement à  $-5$  mm,  $0$  mm et  $5$  mm**

La lentille a un gain de 16 dBi soit 10 dB de plus que l'OWG. Le niveau des lobes secondaires dans l'axe est à 13 dB. En déplaçant latéralement l'OWG de plus et moins 5 mm par rapport au centre, on réalise un dépointage du faisceau à  $\pm 25^\circ$  avec une perte de balayage de 1 dB.

## 6. Conclusion

Une lentille Luneburg compacte fonctionnelle à 60 GHz a été réalisée en LTCC. Des mesures prouvent son fonctionnement avec un gain de 16 dBi et une capacité d'orientation du faisceau de  $\pm 25^\circ$  avec une perte de balayage de 1 dB.

## 7. Remerciements

Cette recherche a été financée par la Royal Society, IES\R1\191236. L'Union Européenne à travers le fond européen de développement économique et régional (FEDER), le Ministère de l'éducation, de l'enseignement supérieur et de la recherche, La région Bretagne et Brest Métropole à travers le projet CPER « SOPHIE / STIC & Ondes » et Fonds de Concours à la Recherche (FCR2019) ainsi que le Conseil départemental de Finistère par le dispositif Aide aux programmes de recherche émergents (AAPRE) et les fonds Carnot ont contribué au financement des équipements utilisés.

## Références

- [1] C. Mateo-Segura, A. Dyke, H. Dyke, S. Haq, et Y. Hao, « Flat Luneburg Lens via Transformation Optics for Directive Antenna Applications », *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, n° 4, p. 1945-1953, avr. 2014.
- [2] Y. Su et Z. N. Chen, « A Radial Transformation-Optics Mapping for Flat Ultra-Wide-Angle Dual-Polarized Stacked GRIN MTM Luneburg Lens Antenna », *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, n° 5, p. 2961-2970, mai 2019.
- [3] C. Kärnfelt, D. Zelenchuk, M. Sinou, F. Gallée, et P. Douglas, « Sacrificial Volume Materials for Small Hole Generation in Low-Temperature Cofired Ceramics », *Electronics*, vol. 9, n° 12, p. 2168, déc. 2020.