



**HAL**  
open science

## Améliorée de la bande passante de réseau réflecteur entièrement métallique à base de cellules Phoenix 3D

Zhihang An, Tony Makdissy, María Garcia Vigueras, Sébastien Vaudreuil,  
Raphaël Gillard

► **To cite this version:**

Zhihang An, Tony Makdissy, María Garcia Vigueras, Sébastien Vaudreuil, Raphaël Gillard. Améliorée de la bande passante de réseau réflecteur entièrement métallique à base de cellules Phoenix 3D. XXI-èmes Journées Nationales Microondes (JNM2022), Jun 2022, Limoges, France. pp.311-314. hal-04061086

**HAL Id: hal-04061086**

**<https://hal.science/hal-04061086v1>**

Submitted on 12 Apr 2023

**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.

Copyright

## Améliorée de la bande passante de réseau réflecteur entièrement métallique à base de cellules Phoenix 3D

Zhihang An<sup>1</sup>, Tony Makdissy<sup>2</sup>, Maria Garcia Viguera<sup>1</sup>, Sébastien Vaudreuil<sup>3</sup>, Raphaël Gillard<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Institut d'Electronique et des Technologies du Numérique, INSA, 35708 Rennes, France, Zhihang.An@insa-rennes.fr  
<sup>2</sup>Laboratoire de recherche TICKET, Université Antonine, 40016 Hadat-Baadba, Lebanon  
<sup>3</sup>Centre Euromed de Recherche, Université Euromed de Fès, 51 30 030 Fès, Morocco

**Résumé** – Cet article étudie des réseaux réflecteurs entièrement métalliques à base de cellules Phoenix 3D, pour une réalisation en fabrication additive. La possibilité de faire varier la géométrie de la cellule dans les trois dimensions offre un avantage pour accroître la bande passante. Ici, l'effet de la hauteur des cellules est mis à profit pour atteindre une bande passante (-1dB sur le gain) de 18% à 20GHz.

### 1. Introduction

Les antennes à réseau réflecteur (RR) constituent une solution intermédiaire entre les réseaux planaires et les réflecteurs métalliques avec les avantages d'un gain élevé, d'un encombrement réduit, d'un faible coût et d'une fabrication facile. Le plus souvent, les RR sont réalisés en technologie imprimée. Récemment, une cellule Phoenix 3D a été conçue et fabriquée par impression 3D SLM [1]. Entièrement métallique, elle évite d'utiliser des matériaux diélectriques avec leurs inconvénients bien connus (perte, coût, éventuel dégazage sous vide). Dans [2], la cellule a été utilisée pour concevoir un réseau réflecteur complet. La variation de phase est obtenue en modifiant un seul paramètre géométrique, à savoir la section transversale du guide d'onde métallique interne de la cellule (élément vert sur la Figure 1a). Toutefois, la hauteur de la cellule constitue un autre degré de liberté possible qui peut être exploité pour améliorer les performances.

Cet article propose une analyse détaillée de l'effet de cette hauteur. La partie II rappelle le principe de la cellule et décrit l'approche de conception des RR. Dans la partie III, différents RR sont comparés, dans lesquels le degré de liberté offert par la hauteur est mis à profit. En conséquence, une approche de conception améliorée est proposée puis validée, avant de conclure en partie IV.

### 2. Cellule Phoenix 3D et approche de conception des réseaux réflecteurs

#### 2.a. Cellule Phoenix 3D

Le concept de cellule Phoenix a été initialement présenté dans [3] comme une cellule microruban à double polarisation avec une plage de phase de 360° sur une large plage de fréquences et la propriété unique de revenir à sa géométrie initiale après un cycle de phase complet. Une cellule Phoenix 3D a été proposée dans [1]. La Figure 1 montre la cellule 3D. Elle se compose de deux guides

d'ondes métalliques carrés concentriques et d'un bloc métallique carré au centre. Une présentation plus complète est donnée dans [1]. Les paramètres utilisés dans cet article sont résumés dans le Tableau 1. La fréquence centrale est de  $f_0 = 20$  GHz. Une base de données est établie en faisant varier à la fois la hauteur de la cellule ( $h$ ) et la section du guide d'onde interne ( $L_r$ ). Par rapport à [2],  $h$  est utilisée comme degré de liberté supplémentaire et variée dans une large gamme pour améliorer les performances du RR. La cellule est simulée à l'aide de HFSS® en supposant qu'elle est située dans un environnement périodique infini. Les conducteurs sont supposés parfaits.

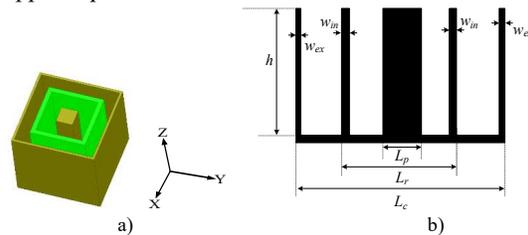


Figure 1. La cellule 3D : a) vue 3D ; b) vue en coupe.

Paramètre	$L_c$	$L_r$	$L_p$	$h$	$w_{in}$	$w_{ex}$
Valeur (mm)	7.5	1-7.5 (pas=0.1)	1	4-10 (pas=0.1)	0.2	0.2

Tableau 1. Les paramètres géométriques

#### 2.b. Approche de conception initiale

Cet article vise à étudier la capacité de la hauteur de la cellule 3D à offrir un degré de liberté supplémentaire pour améliorer la bande passante du RR. Celui-ci est constitué par un panneau de  $13\lambda_0 \times 13\lambda_0$  ( $\lambda_0$  étant la longueur d'onde dans le vide à  $f_0$ ) avec un pas inter-élément de  $0.5\lambda_0$ . Le RR est éclairé par un cornet pyramidal placé 25° en offset (Figure 2). Le rapport  $f/D$  est de 1.183. Le RR est optimisé pour produire un faisceau directif dans la direction opposée au cornet. Chaque RR conçu est simulé sous HFSS® avec son cornet d'illumination. La conception repose sur une approche de synthèse *Phase Only* [4] qui minimise l'erreur de phase à deux fréquences choisies autour de  $f_0$ . L'erreur de phase sur l'ensemble des  $N \times N$  cellules aux deux fréquences est calculée par l'équation ci-dessous :

$$Er_{cum} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N [I_{mn\_up} \times Er_{mn\_up} + I_{mn\_low} \times Er_{mn\_low}] \quad (1)$$

où  $I_{mn\_up}$  et  $I_{mn\_low}$  représentent l'illumination normalisée du  $m^{i\text{ème}}$  élément à la fréquence supérieure et inférieure respectivement.  $Er_{mn\_low}$  et  $Er_{mn\_up}$  sont les erreurs de phase de cet élément aux deux fréquences. L'illumination à la fréquence supérieure est normalisée sur la base de l'équation :

$$I_{mn\_up} = \frac{I'_{mn\_up}}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I'_{mn\_up}} \quad (2)$$

où  $I'_{mn\_up}$  représentent l'illumination réel à la fréquence supérieure du  $m^{i\text{ème}}$  élément. L'illumination à basse fréquence est normalisé de la même manière. L'erreur de phase d'un élément est donnée par :

$$Er = \min(|\varphi_r - \varphi_a|, (360 - |\varphi_r - \varphi_a|)) \quad (3)$$

où  $\varphi_a$  et  $\varphi_r$  représentent respectivement la phase réalisée et la phase requise. L'illumination est donnée par l'amplitude du champ électrique complexe sur chaque cellule, obtenue directement à partir d'une simulation électromagnétique du cornet. Le cornet conçu permet une apodisation de -10 dB sur les bords à 20 GHz. Ici,  $f_{low}$  et  $f_{up}$  sont respectivement réglées à 19,5 GHz et 20,5 GHz afin d'élargir la bande passante autour de  $f_0=20\text{GHz}$ .

La caractérisation des cellules est réalisée pour une incidence de  $25^\circ$ , correspondant à l'éclairement des cellules du centre du réseau, les plus influentes. La phase simulée du coefficient de réflexion pour la polarisation TE est donnée sur la Figure 3 à 19,5 GHz et 20,5 GHz, en fonction de  $h$  et  $L_r$ . Grâce à cette base de données, il est possible de choisir les cellules à utiliser pour s'approcher au mieux des phases requises. On peut noter que l'utilisation de deux paramètres géométriques ( $h$  et  $L_r$ ) offre de nombreuses possibilités différentes pour réaliser une même phase.

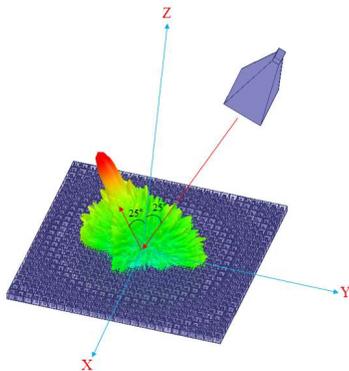


Figure 2. Une vue 3D du RR et du cornet avec le champ rayonné.

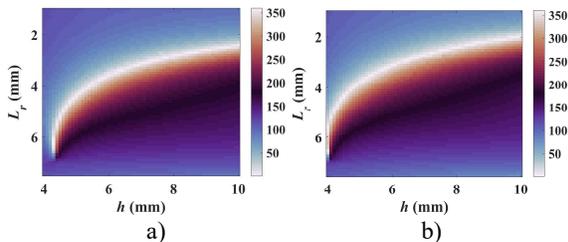


Figure 3. La phase du coefficient de réflexion (degrés) de la cellule éclairée avec  $25^\circ$  d'incidence : a) 19.5 GHz ; b) 20.5 GHz.

### 3. Résultats de Simulation et Analyse

#### 3.a. Résultats initiaux

Dans cette section, quatre RRs différents sont conçus. Les trois premiers ont des hauteurs fixes ( $h=6$  mm,  $h=7$  mm et  $h=8$  mm respectivement) tandis que le quatrième autorise l'utilisation de cellules avec des hauteurs variables ( $h \in [4-10]$  mm). Lors de la sélection, la diversité des solutions possibles pour réaliser une phase permet notamment de rejeter toutes les cellules avec des pertes supérieures à 1 dB.

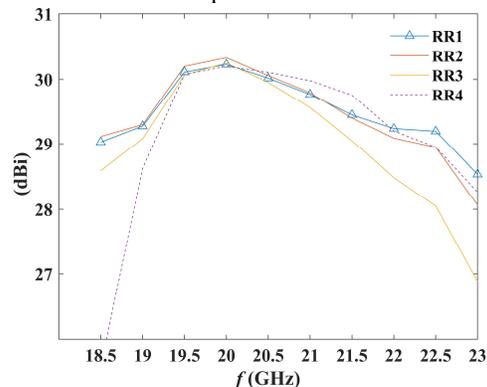
L'erreur de phase des quatre RRs est tabulée dans le Tableau 2. On peut voir que l'erreur de phase cumulée aux deux fréquences varie légèrement avec  $h$ .

	$h$ (mm)	Erreur de phase cumulée ( $^\circ$ )		
		19,5 GHz	20,5 GHz	19,5GHz+20,5GHz
RR1	6	6,96	8,30	15,26
RR2	7	7,79	7,98	15,78
RR3	8	8,94	8,16	17,09
RR4	4-10	4,14	3,91	8,05

Tableau 2. Les erreurs de phase des RR 1 à 4.

Surtout, le Tableau 2 montre que l'erreur de phase du RR4 est beaucoup plus petite que celle des autres, aux deux fréquences, ce qui démontre la capacité de mieux contrôler la phase grâce à ce second degré de liberté.

La Figure 4 montre le gain simulé en fonction de la fréquence pour les quatre RRs dans la direction du maximum de rayonnement. Malheureusement, les performances du RR4 ne sont pas améliorées, et ce malgré la réduction constatée de l'erreur de phase. Ce dysfonctionnement du processus de conception peut être compris en analysant la variation de la géométrie des cellules. Pour ce faire, la Figure 5a présente les valeurs optimisées de  $L_r$  pour le RR1 (celui qui présente la plus faible erreur pour une hauteur constante) tandis que les Figures 5b et 5c montrent celles de  $L_r$  et  $h$  dans le RR4. Il apparaît que l'introduction d'un nouveau degré de liberté ( $h$ ) a entraîné une distribution plus chaotique des géométries successives. Ceci est particulièrement visible sur la Figure 5c où des cellules isolées avec un grand  $h$  (points jaunes) peuvent être observées dans le panneau. De telles variations brusques de la géométrie entre deux cellules adjacentes dans le RR4 sont susceptibles de perturber le fonctionnement ; en particulier, l'hypothèse d'infinie périodicité utilisée lors de la caractérisation des cellules n'est plus respectée, ce qui peut entraîner des imprécisions dans la prédiction de la phase et, par suite, une réduction de bande passante.



**Figure 4. Gain des réseaux RR1 à RR4 dans la direction 25°.**

3.b. *Approche de conception améliorée*

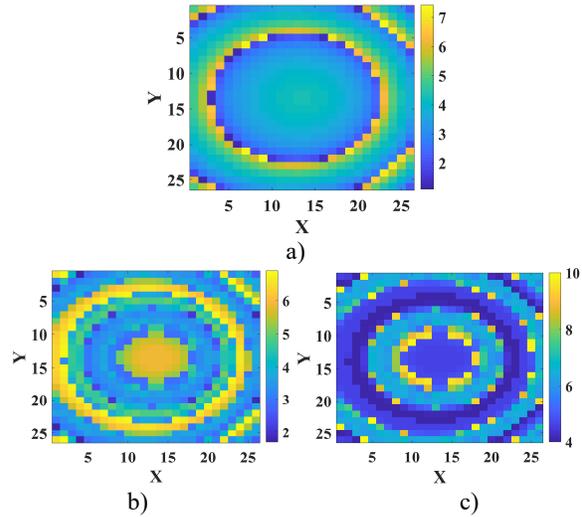
La section précédente montre que la réduction de l'erreur de phase n'est pas suffisante pour améliorer les performances de l'antenne. La préservation d'une régularité géométrique dans le réseau reste donc un facteur impératif. Cette section vise à corriger le processus de conception, afin de profiter pleinement de la capacité d'une cellule à hauteur variable. L'idée consiste à trouver une méthode qui permette de réduire l'erreur de phase cumulée tout en assurant une variation douce de la géométrie des cellules à la surface du réseau.

Afin de réduire la différence de géométrie entre deux cellules adjacentes, une limitation prédéfinie est ainsi ajoutée lors de la conception du RR. Il y a deux variables pour chaque cellule :  $L_r$  et  $h$ . Puisqu'une distribution régulière peut être facilement obtenue pour  $L_r$  (comme le montre la Figure 5a pour le RR1), l'amélioration du processus de conception se concentre sur la hauteur  $h$  des cellules. Plus précisément, il est proposé de limiter la variation de la valeur de  $h$  entre deux cellules adjacentes. La différence maximale entre deux de ces cellules ( $dh$ ) est ajustée pour trouver un meilleur équilibre entre l'erreur de phase cumulée et la régularité des géométries des cellules sur le RR. Dans ce processus,  $L_r$  et  $h$  sont obtenus successivement. De plus, étant donné que les cellules du centre ont une illumination plus élevée, la géométrie de ces cellules est déterminée en premier. Le processus détaillé est décrit ci-après :

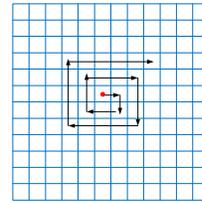
Étape 1 : détermination de  $L_r$  pour chaque cellule. La distribution de  $L_r$  est optimisée pour une hauteur fixe. Ici, la hauteur correspondant à celle du RR1 ( $h=6$  mm) est choisie car les variations associées sont douces et elle donne les meilleures performances initiales.

Étape 2 : détermination de  $h$  pour chaque cellule. Une fois  $L_r$  définie,  $h$  est ré-optimisée pour chaque cellule individuellement. La Figure 6 montre l'ordre appliqué pour ce processus de ré-optimisation. Il parcourt un chemin en spirale allant du centre vers l'extérieur du réseau. Cet ordre donne la priorité à l'optimisation des cellules avec une plus grande illumination. Pour chaque cellule, la plage autorisée de  $h$  est d'abord déterminée, puis  $h$  est optimisée dans cette plage. La hauteur de la première cellule (celle du centre) est fixée à  $h_1 = 6\text{mm}$ , suite à l'étape 1. Ensuite, la plage de  $h$  pour la deuxième cellule est définie sur  $h_2 = h_1 \pm dh$ . La hauteur de cette deuxième cellule est choisie dans la plage donnée pour minimiser son erreur de phase. Et le processus continue. Il convient de souligner qu'au début, la plage autorisée de  $h$  pour une cellule est complètement déterminée par la hauteur de la précédente. Dans les étapes ultérieures, cette plage prend en compte la hauteur de toutes les cellules environnantes qui ont déjà été conçues. Par conséquent, la plage de  $h$  pour la  $p^{\text{ième}}$  cellule est définie sur  $[h_{\text{max},p} - dh, h_{\text{min},p} + dh]$ , où  $h_{\text{max},p}$  et  $h_{\text{min},p}$  sont les hauteurs maximale et minimale des cellules environnantes. Notez que seules les cellules partageant une paroi commune sont considérées comme des cellules adjacentes ici. Lors de la synthèse, la plage autorisée de  $h$  pour chaque cellule est déterminée par au plus deux cellules qui ont déjà été

conçues. En conséquence, pour deux cellules adjacentes quelconques, la différence de  $h$  n'est pas supérieure au  $dh$  prédéfini.



**Figure 5. Evolution de la géométrie des cellules dans le réseau (mm): a)  $L_r$  pour RR1 ; b)  $L_r$  pour RR4, c)  $h$  pour RR4.**



**Figure 6. L'ordre de la sélection.**

3.c. *Résultats de la conception améliorée*

Afin de vérifier le processus d'optimisation proposé, trois RRs différents (RR5, RR6, RR7) sont conçus. Ils diffèrent par la valeur utilisée de  $dh$  (respectivement 0.5, 1 et 1.5 mm). Ils sont également comparés au RR1. Les paramètres détaillés sont résumés dans le Tableau 3. Le Tableau 3 montre que l'erreur de phase cumulée diminue avec l'augmentation de  $dh$ , ce qui est cohérent avec le fait que les variations libres de  $h$  fournissent plus de marge pour réduire l'erreur. La Figure 7 montre l'évolution de la géométrie du RR7. La distribution géométrique du RR7 est devenue plus régulière par rapport au RR4 (Figure 5c). La Figure 8 montre la vue 3D du RR7.

	$dh$ (mm)	Erreur de phase cumulée (°)		
		19,5 GHz	20,5 GHz	19,5GHz+20,5GHz
RR1	---	6,96	8,30	15,26
RR5	0,5	7,10	7,50	14,60
RR6	1	7,50	7,09	14,59
RR7	1.5	7,91	6,64	14,55

**Tableau 3. Les paramètres détaillés de RR1, RR5, RR6 et RR7.**

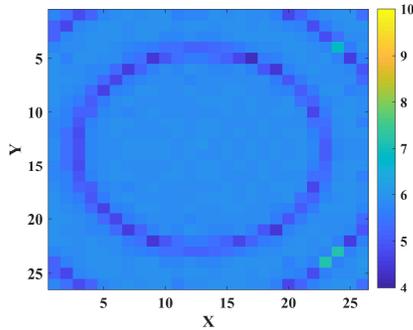


Figure 7. Evolution de la géométrie des cellules dans le réseau (mm):  $h$  pour RR7.

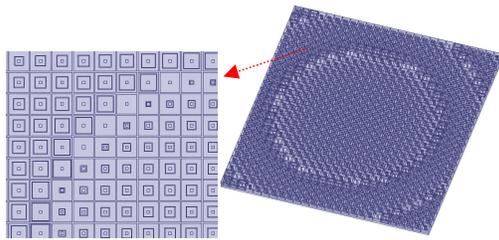


Figure 8. Vue 3D du RR7.

La Figure 9 illustre le gain en fonction de la fréquence pour les quatre RRs, dans la direction du maximum de rayonnement. On peut voir qu'il n'y a pas de changement évident de gain entre RR1 et RR5 (pour lequel  $dh$  est égal à 0.5 mm).

La bande passante à 1-dB est au contraire augmentée de 15% à 18% pour les réseaux RR1 et RR7. Ces résultats permettent de valider le processus d'optimisation proposé et par la suite l'impact de la régularité des géométries des cellules sur le panneau.

Aussi, il est intéressant de noter que la réduction de l'erreur de phase cumulée s'obtient au détriment d'une remontée de l'erreur à la fréquence basse. Les courbes de gain confirment qu'il est plus facile d'améliorer les performances en haut de la bande.

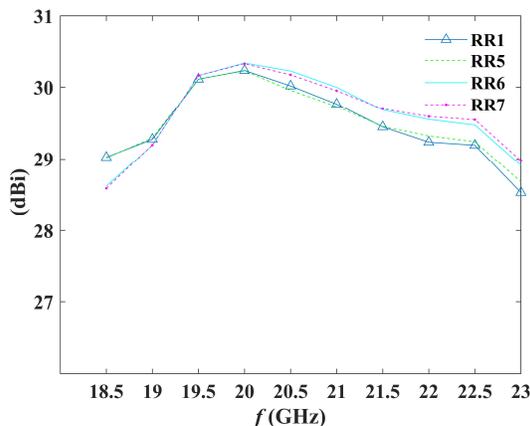


Figure 9. Gain des réseaux RR1 à RR4 dans la direction 25°.

#### 4. Conclusion

Dans ce travail, sept RRs différents sont conçus pour étudier l'effet de la hauteur de la cellule Phoenix 3D sur les performances. Les résultats de la simulation montrent que le gain peut être optimisé en sélectionnant une hauteur appropriée pour chaque cellule, à condition de limiter les variations géométriques entre cellules adjacentes. Une méthodologie de conception est proposée et validée par amélioration de la bande passante de 15 à 18%. Un prototype sera réalisé pour valider ces résultats expérimentalement.

#### 5. Remerciements

Les travaux ont été cofinancés par l'Agence Universitaire de la Francophonie (Moyen-Orient), le Conseil national de la recherche scientifique du Liban (CNRS-L) et le China Scholarship Council (CSC).

#### Références

- [1] Tony Makdissy, Raphaël Gillard, Zhihang An, Sébastien Vaudreuil, "Dual Linearly Polarized 3D Printed Phoenix Cell for Wide Band Metal Only Reflectarrays,". IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 14, no. 12, pp. 1411-1416, June 2020.
- [2] Zhihang An, Tony Makdissy, María Garcia Viguera, Sébastien Vaudreuil, Raphaël Gillard, "A Metal-Only Reflectarray Made of 3D Phoenix Cells,". 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). (submitted)
- [3] Lina Moustafa, Raphael Gillard, Federico Peris, Renaud Loison, Herve Legay, Etienne Girard, "The phoenix cell: A new reflectarray cell with large bandwidth and rebirth capabilities,". IEEE Antennas and wireless propagation letters, vol. 10, pp. 71-74, January 2011.
- [4] Yilin Mao, Shenheng Xu, Fan Yang, Atef Z. Elsherbeni. A novel phase synthesis approach for wideband reflectarray design[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2015, 63(9): 4189-4193.