

Surface rayonnante à agilité de faisceaux versus réseaux d'antennes agiles *Beamsteering radiating surface vs phased antenna array*

Bernard Jecko¹, Mohamad Majed¹

¹ XLIM UMR 7252, université de Limoges/CNRS, {bernard.jecko, mohamad.majed}@xlim.fr

Mots clés: Antennes à agilité de faisceaux, Matrice rayonnante pixellisée, Agile beam antennas, agile beam radiating matrix antenna, (ARMA).

Résumé/Abstract

Dans le domaine des télécom (en particulier pour la 5G), des Radars, de la Guerre Electronique, les antennes à agilité de faisceaux sont de plus en plus demandées car elles sont capables d'effectuer la formation de faisceaux ou (et) le balayage électronique. Aujourd'hui, ces fonctions sont essentiellement effectuées par une technique très connue : les Réseaux d'antennes agiles (AESA). Malheureusement cette technique entraîne des limitations intrinsèques que l'on va avoir besoin de dépasser dans un futur proche pour de nouvelles applications. L'objet de cette présentation est d'introduire une nouvelle technique appelée en français MARPEM (Matrice Agile Rayonnante à Pixels Elaborés en Matamatériaux) pour tenter de repousser ces limitations.

In the field of terrestrial or space telecoms, Radars, Electronic Warfare, Beam Agility Antennas are increasingly in demand as they are capable of Beamforming or (and) Beamsteering. Today, these functions are mainly performed by a very well-known technique: phased antenna array (AESA). Unfortunately, this technique leads to intrinsic limitations that we will need to overcome in the near future for new applications. The purpose of this presentation is to introduce a new technique called in English ARMA (Agile Radiating Matrix Antenna) to try to overcome these limitations.

1 Le concept MARPEM

Quelle est la meilleure solution pour obtenir un diagramme de rayonnement agile ou non? Pour répondre à une telle question il faut développer une approche rigoureuse au départ: Equations de Maxwell, Equations de Propagation, Fonction de Green de l'espace libre, Principe d'Equivalence (Huygens), Produit de Convolution Fonction de Green par les champs sur la surface S d'Huygens dite Surface Rayonnante.

Dans le cas particulier des antennes planaires (low profile antennas) la surface rayonnante peut être un parallélépipède extra plat ($\approx \lambda/10$) posé sur un plan de masse et réduite à sa surface supérieure S par ou sort l'essentiel de l'énergie. Une approximation analogue est effectuée dans la théorie des ouvertures résonnante qui conduit à la même expression du champ rayonné :

$$\vec{E}(P) = \frac{jk}{4\pi} \psi(R)(1 + \cos\theta)(\cos\varphi \vec{e}_\theta - \sin\varphi \vec{e}_\varphi) SFT = K \cdot SFT \quad (1)$$

Avec : $SFT = \iint E_s(x, y) e^{j(kx \sin\theta \cos\varphi + ky \sin\theta \sin\varphi)} ds$ et $\psi(R) = \frac{e^{jkR}}{R}$

Cette intégrale montre que le champ rayonné E(P) est pratiquement la transformée de Fourier spatiale du champ sur la surface S notée SFT.

2 Introduction de l'agilité

Pour changer de diagramme, il faut pouvoir générer n'importe quel champ (Es, Hs) sur la surface S ; il faut donc échantillonner cette surface, de cette façon on pourra reconstruire n'importe quel champ mais l'approche rigoureuse s'arrête là. La plus simple des techniques d'échantillonnage est l'échantillonnage par Peigne de Dirac 2 D: le plus simple mais le moins précis. L'équation (1) devient :

$$E(P) = K \sum_i \sum_j E_s(x_i, y_j) e^{j(kx \sin\theta \cos\varphi + ky \sin\theta \sin\varphi)} dx dy$$

Le champ $E(P)$ est la somme des champs générés par $N \times M$ sources ponctuelles localisées en i, j ; c'est la Théorie des Réseaux d'Antennes.

L'approche originale proposée consiste à appliquer un échantillonnage par une fonction porte en x et une en y formant un carré.

Cet échantillonnage plus précis conduit à l'expression du champ $E(P)$:

$$\vec{E}(P) = K \sum_i \sum_j A_{i,j} \iint_{S_{i,j}} e_{i,j}(x,y) e^{j(kx \sin\theta \cos\phi + ky \sin\theta \sin\phi)} dx dy$$

Avec $e_{i,j}(x,y)$: Constante et $A_{i,j}$: poids imposés pour in diagramme donné.

Le champ $E(P)$ est la somme des champs créés par $N \times M$ éléments de surface S_{ij} uniformes jointifs dits «Pixels»[1][2][3].

Pour une antenne plane de surface S , la solution revient à considérer la surface comme une matrice de $N \times M$ pixels, chacun affecté d'un poids particulier (figure 1).

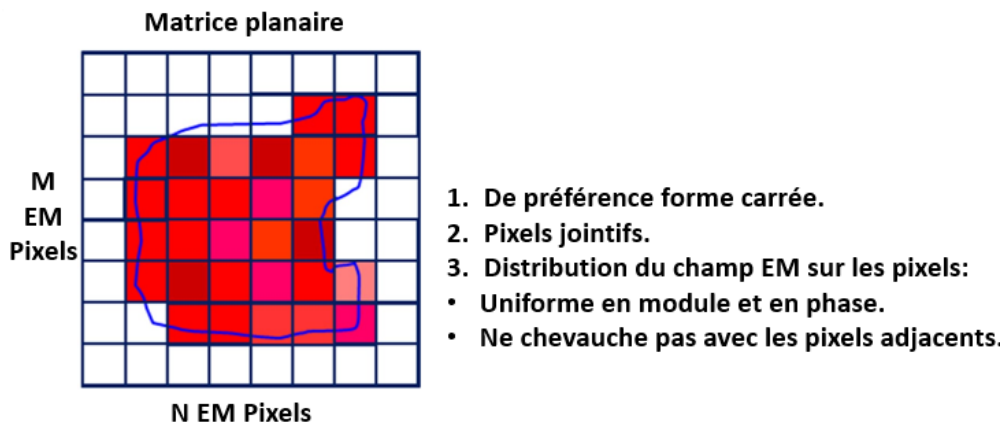


Figure 1 Surface rayonnante échantillonnée par des pixels carrés jointifs.

Il n'y a aucune restriction sur la surface S et les pixels peuvent avoir n'importe quelle forme, mais ils doivent être jointifs. Comme pour les réseaux agiles, les pixels doivent être alimentés par une électronique de commande des faisceaux (BFN: Beam Forming Network) pour appliquer les poids appropriés[2] afin d'obtenir les diagrammes de rayonnement attendus.

Enfin, toute l'antenne est constituée des nombreux pixels formant une matrice qui s'appelle MARPEM (Matrice Agile Rayonnante à Pixels Elaborés en Metamatériaux) (figure 2).

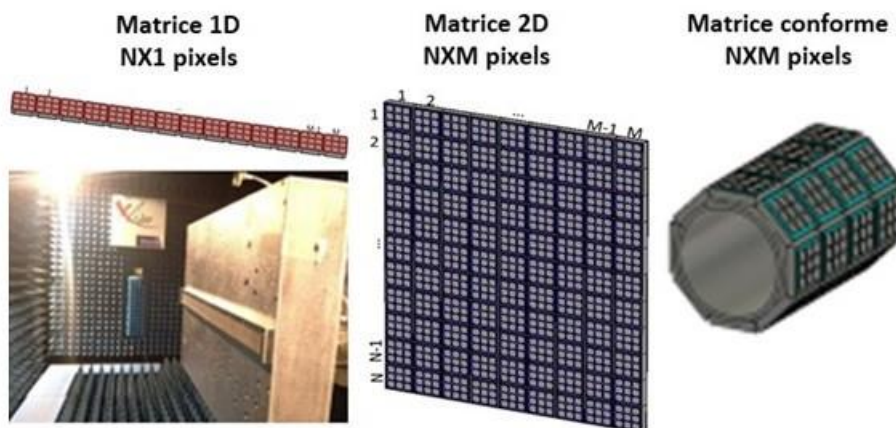


Figure 2 Architectures de MARPEM.

3 Design du pixel

Le pixel [2] doit être capable de générer un surface rayonnante uniforme (champs constants sur toute la surface). Sa forme est déduite de celle d'une antenne BIE (à Bande Interdite Electromagnétique) de grande taille (figure 3a) caractérisée par un plan de masse, une cavité à air et une surface semi-réfléchissante (PRS) qui est généralement une surface sélective en fréquence (FSS)[4][5][6][7]. Des murs métalliques (figure 3b) sont introduites autour de la sonde d'alimentation (généralement un patch) de l'antenne BIE [1]. La structure finale est représentée sur les figures 4a et 4b. En raison de l'évanescence radiale du mode dans l'antenne BIE, le champ électromagnétique est presque constant au sommet du pixel figure 4c, générant un diagramme de rayonnement directif [1].

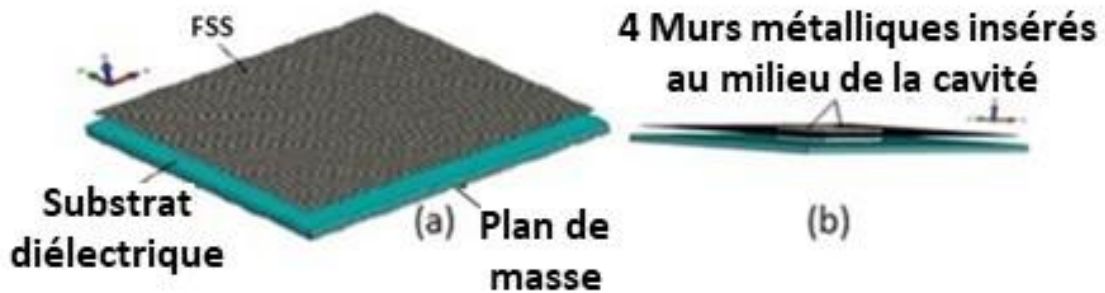


Figure 3 (a) Antenne BIE à grand gain (b) Murs métalliques à l'intérieur de l'antenne BIE.

Les murs électriques peuvent être remplacés par des murs magnétiques ce qui revient à isoler un morceau de l'antenne BIE.

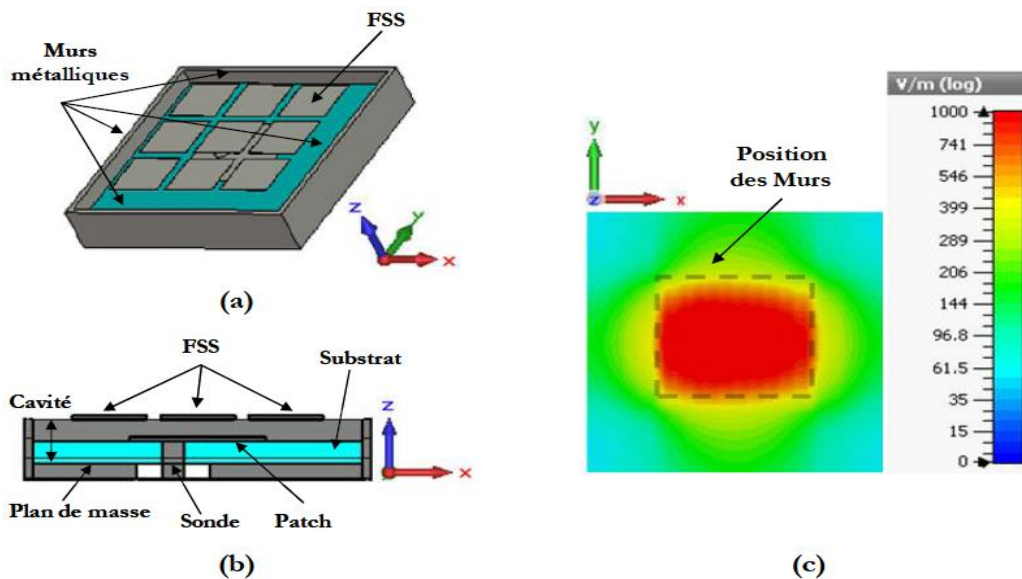


Figure 4 Pixel alimenté par un patch: (a) vue en perspective, (b) vue en coupe selon x,

(c) Cartographie du champ E sur la surface rayonnante du pixel

4 Comparaison MARPEM-Réseaux Agiles

4.1 Avantages de la structure

- Les dimensions des pixels dans l'antenne MARPEM peuvent facilement atteindre $1,2\lambda \times 1,2\lambda$. Pour une surface d'antenne donnée, le nombre d'éléments (pixels) peut être bien limité, ce qui réduit fortement le coût du BFN. Un réseau avec la même surface a généralement besoin d'environ 4 fois plus d'éléments rayonnants (patches) car la périodicité est limitée à $0,8\lambda$ pour éviter les lobes de réseau [1].

- Bande de fréquence: en raison des propriétés de l'antenne BIE « low profil » d'origine, la bande passante des pixels peut facilement atteindre 40% [8] et les effets de couplage entre 2 ports sont généralement limités sous -20 dB [9] en polarisation TE. Par conséquent, une antenne MARPEM avec 14 x 14 pixels a approximativement la même bande passante que le pixel seul (figure 5) pour les 196 pixels.

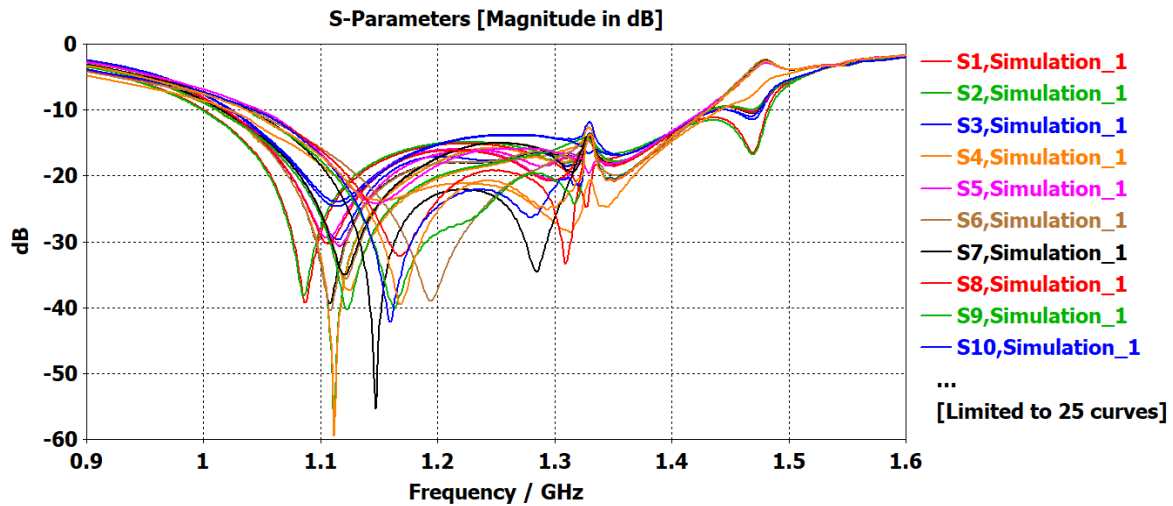


Figure 5 Evolution des paramètres actifs S_{ii} en fonction de la fréquence pour un ARMA 14 x 14 pixels.

- Dans les fréquences millimétriques (Ku ou Ka), la solution MARPEM peut également être conçue [10] avec les mêmes performances, notamment le même ordre de grandeur de bande passante. Par exemple, un pixel construit avec une PRS (Partially Reflective Surface) très simple constituée d'une plaque de zircone homogène et alimenté par un dipôle large bande (figure 6) donne une bande passante de 47,8%.

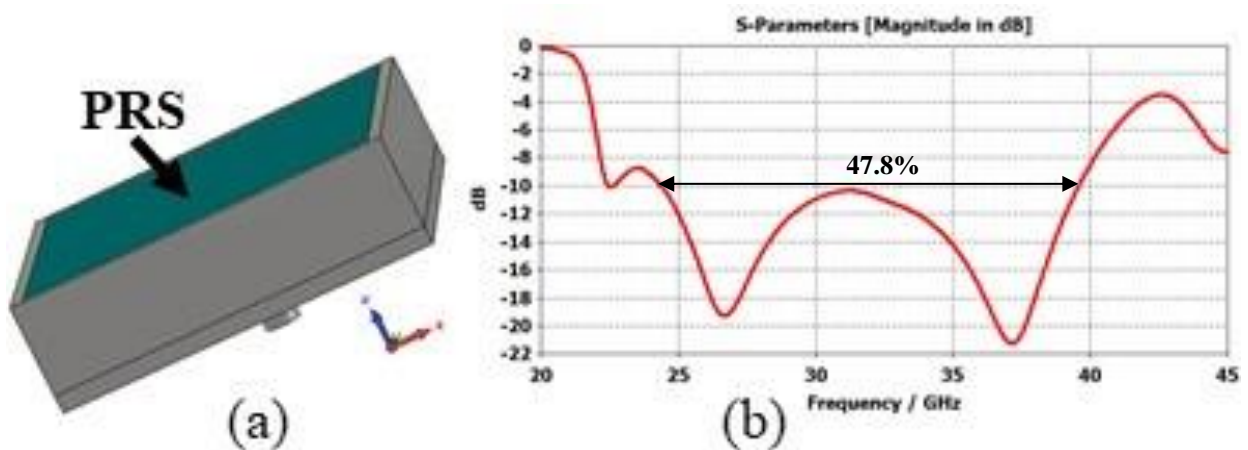


Figure 6 (a) Antenne pixel avec une PRS homogène. (b) Paramètre S_{11} en fonction de la fréquence.

- La surface MARPEM: Il n'y a pas de restrictions strictes sur la forme des pixels, qui peut être plane ou conformée [11], avec n'importe quelle forme de surface: carrée, rectangulaire, triangulaire, circulaire et trapézoïdale... Par exemple, des pixels circulaires et trapézoïdaux sont combinés (figure 7) pour conserver une bonne symétrie circulaire dans un diagramme de rayonnement isoflux autour de 8,2 GHz.

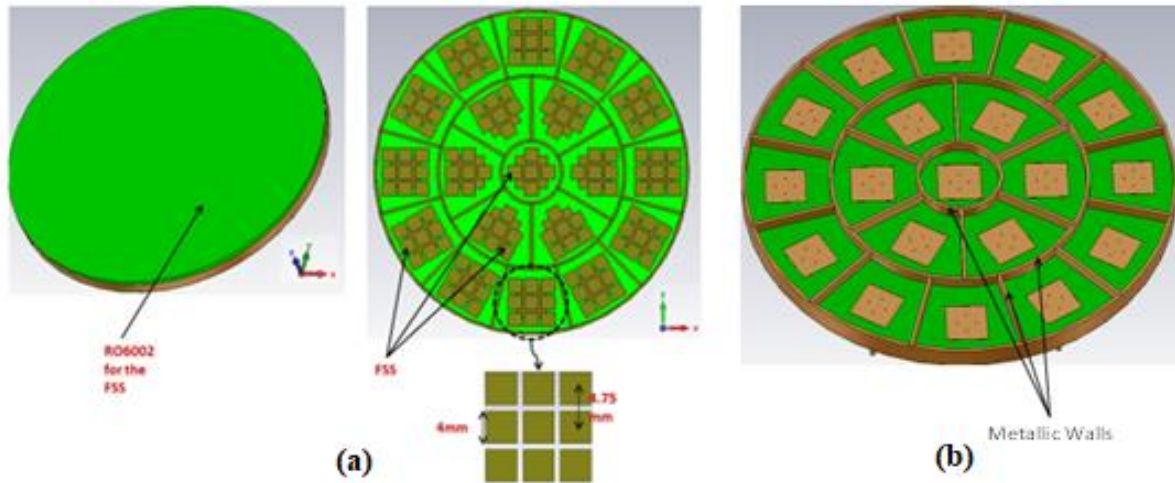


Figure 7 Antenne « low profil » à symétrie de révolution avec pixels alimentés par des patches à quatre ports (polarisation circulaire): (a) Vues globales avec et sans radôme, (b) sans FSS.

Pour illustrer ce comportement, le diagramme de rayonnement polarisé circulairement obtenu à partir de l'antenne MARPEM à symétrie de révolution (figure 7) est présenté sur la figure 8 et comparé à celui obtenu à partir d'une solution MARPEM carrée [12]. L'antenne MARPEM low profil de forme carrée avec 5X5 pixels [12] montre sur la figure 8a une forte non uniformité du gain d'environ 2,75 dBi, par contre l'antenne MARPEM à symétrie de révolution présente un diagramme (Figure 8b) avec une bonne uniformité (0,7 dBi). Une comparaison avec un réseau de mêmes dimensions n'a pas été réalisée car dans le cas du réseau, il était impossible d'obtenir un maximum de gain proche de $\theta = 60^\circ$ avec une matrice 5x5 éléments.

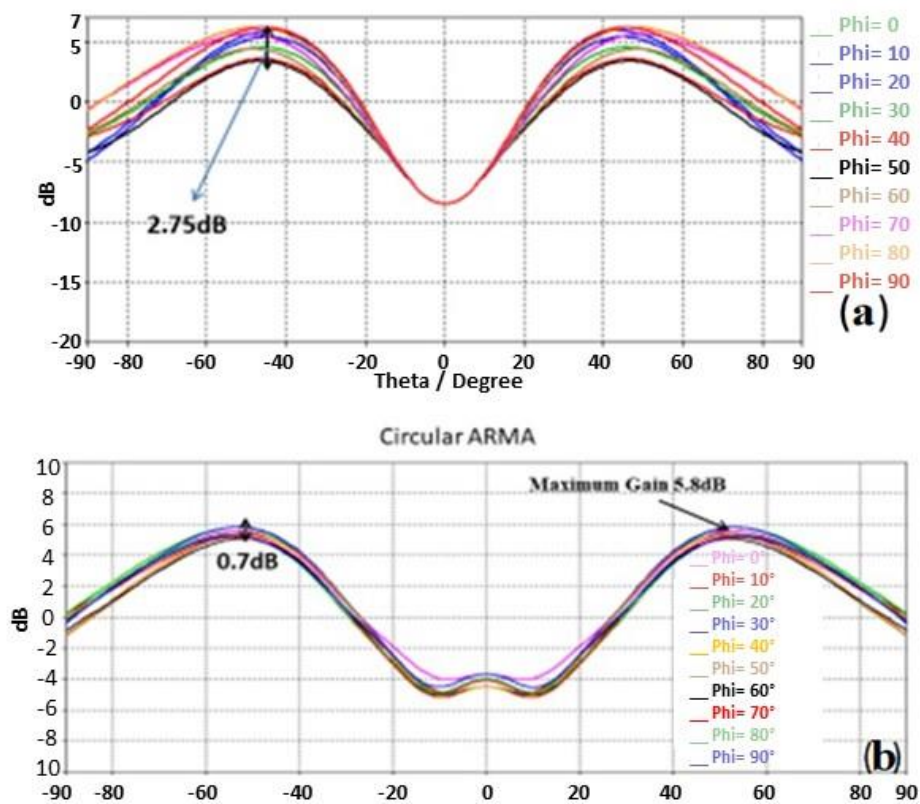


Figure 8 (a) Diagramme de rayonnement obtenu avec un MARPEM carré de 5 x 5 pixels (b) Diagramme de rayonnement isoflux obtenu avec l'antenne MARPEM à symétrie de révolution.

4.2 Performances du balayage électronique

Une comparaison [1] a été réalisée entre deux (1D) antennes à faisceaux agiles avec la même surface et la même périodicité: un réseaux d'antenne patches et une antenne MARPEM comme le montre la figure 9.

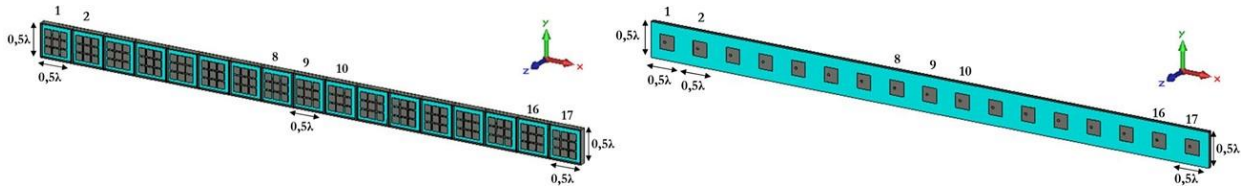


Figure 9 Antennes 1D utilisées pour comparer les performances des réseaux d'antennes et des antennes MARPEM.

Le gain obtenu pour un angle de dépointage $\theta = 70^\circ$ est beaucoup plus élevé pour MARPEM que pour les réseaux d'antennes (fig 10). Il suit la loi $(1 + \cos \theta)$ qui apparaît dans l'équation 2 comme le montre la figure 11.

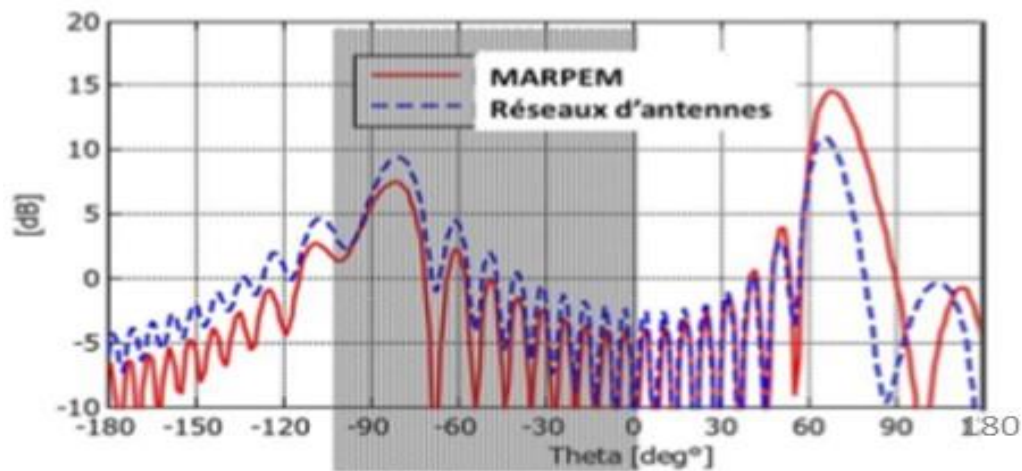


Figure 10 Comparaison des diagrammes de rayonnement des réseaux d'antenne et du MARPEM pour un dépointage $\theta = 70^\circ$.

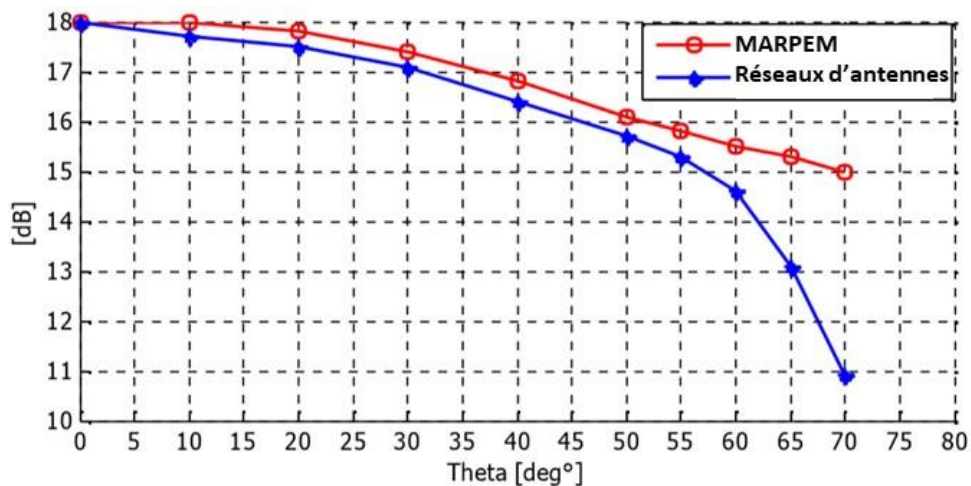


Figure 11 Evolution du gain maximal en fonction de l'angle de pointage

Cet avantage, illustré sur le balayage électronique (Beamsteering), peut être conservé pour la formation du faisceau (Beamforming). Par exemple, une couverture terrestre isoflux en bande X à partir d'un CubeSat situé sur une orbite LEO est possible avec un gain maximum proche de $\theta = 60^\circ$ [12].

5 Conclusion

Cet article présente une nouvelle technique d'antenne à faisceau agile appelée MARPEM qui peut remplacer au prix d'une faible augmentation de la complexité de la structure celle basée sur les réseaux (AESA) lorsque des fortes limitations apparaissent.

Les pixels avec des restrictions sur la forme, les dimensions et la bande passante moins importantes que pour les réseaux, augmentent la flexibilité des applications.

L'avantage de MARPEM est particulièrement important pour la formation et le balayage du faisceau dans de nombreux domaines de recherche: communications terrestres et par satellite, guerre électronique, radars, etc.

Références bibliographiques

- [1] B. Jecko, E. Arnaud, H. Abou Taam, A. Sibli, "The ARMA concept: Comparison of AESA and ARMA technologies for agile antenna design," *Fermat Journal* vol 20, 2017.
- [2] H. Abou Taam, G. Zakka El Nashef, E. Arnaud, N. Chevalier, B. Lenoir, B. Jecko, M. Rammal, "Design Development And Experimental Validation Of An EBG Matrix Antenna For Tracking Application," in *International Journal of Microwave and Wireless Technology IJMWT*, page 1 of 9 Cambridge University Press and European Microwave Association 2015.
- [3] Y.-F. Cheng, X. Ding, W. Shao, M.-X. Yu, B.-Z. Wang, "2-D planar wide-angle scanning-phased array based on wide-beam elements," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 876–879, 2017.
- [4] C. MENUDIER, M. THEVENOT, T. MONEDIERE, B. JECKO, "EBG Resonator Antennas," *State of Art and Prospects*. 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques ICATT'07, Sevastopol, the Crimea, Ukraine, September 17-21, 2007.
- [5] R.Chantalat, L.Moustapha, M.Thevenot, T.Monediere and B.Jecko, "Low Profile EBG Resonator Antennas," *International Journal of Antennas and Propagation*. Vol 2009, Article ID 394801, 7Pages.
- [6] S. Palreddy, "WIDEBAND ELECTROMAGNETIC BAND GAP (EBG) STRUCTURES, ANALYSIS AND APPLICATIONS TO ANTENNAS," Dissertation submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy In Electrical Engineering, May 1, 2015.
- [7] M. S. Toubet, M. Hajj, R. Chantalat, E. Arnaud, and B. Jecko, "Wide bandwidth, high-gain, and low-profile EBG prototype for high power applications," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, vol. 10, no. 10, pp. 1362–1365, 2011.
- [8] M. Rammal, M. Majed, E. Arnaud, J. Andrieu, and B. Jecko, "Small-Size Wide-Band Low-Profile "Pixel Antenna": Comparison of Theoretical and Experimental Results in L Band," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2019, Article ID 3653270, 8 pages, 2019.
- [9] H. Abou Taam, M. Salah Toubet, T. Monediere, B. Jecko, M. Rammal and A. Bellion, "Interests of a 1D EBG Matrix Compared to a Patch Array in Terms of Mutual Coupling and Grating Lobes," *IEEE, 7th European Conference on Antennas and Propagation EuCAP, 8-12 April 2013, Sweden*.
- [10] L. Teng, ZN. Chen, "Shared-Surface Dual-Band Antenna for 5G Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (2019).
- [11] B. Jecko, M. Majed, S. Aija, H. Chereim, A. Sibli, H. Abou Taam, J. Andrieu, M. Lalande, E. Martinod, "Agile Beam Radiating Surfaces," *Fermat Journal* vol 30, 2018.
- [12] A. SIBLINI, B. JECKO, E. ARNAUD, "Multimode Reconfigurable Nano-Satellite Antenna for PDTM Application," *EUCAP 2017 Paris*.