

SYNTHESE DE RESEAUX CONFORMES D'ANTENNES IMPRIMEES PAR PROJECTION DU FAISCEAU

Sidi Ahmed Djennas et Fethi Tarik Bendimerad

Laboratoire de Télécommunications, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Abou-Bekr Belkaïd, Tlemcen, B. P. 230, 13000 Tlemcen, Algérie
livarium@yahoo.fr

(Received 11 February 2005 - Accepted 2 September 2006)

RESUME

Cet article traite la synthèse des réseaux conformes d'antennes imprimées. La procédure proposée est basée sur la combinaison de la méthode des projections à une modélisation complexe du rayonnement des réseaux conformes. Le but cherché est la détermination de la loi d'alimentation des sources rayonnantes qui une fois appliquée à ces sources permet d'approcher la consistance d'un diagramme de rayonnement tridimensionnel spécifié par un gabarit à niveaux. La méthode d'optimisation adaptée consiste à projeter le diagramme de rayonnement sur le gabarit désiré. L'application de ce formalisme donne de très bons résultats à l'encontre des difficultés liées à l'aspect conformé des réseaux.

Mots clés : réseau conforme, synthèse, optimisation

ABSTRACT

This paper deals with conformal printed antennas arrays synthesis. Our newest process is based on combination of projections method and the complex modeling of conformal arrays radiated field. The main goal is to extract the feeding law of the sources from a specified pattern with two bounds. The adapted optimization method consists in projecting the predicted radiation pattern on the desired radiation pattern. The results of this formalism are in good agreement with the imposed constraints.

Keywords : antenna array, synthesis, optimization

INTRODUCTION

Les réseaux plans d'antennes imprimées possèdent un rayonnement limité au demi-espace. Cela représente un réel handicap pour des applications nécessitant une couverture omnidirectionnelle. C'est pour cette raison, que la réalisation de logiciels chargés de la synthèse du rayonnement produit par des antennes imprimées disposées sur des structures conformées devient indispensable (Maillout, 1994 ; Pozar & Schaubert, 1995 ; Djennas & Bendimerad, 2005 ; Djennas *et al.*, 2003 ; Girard *et al.*, 2000 ; Mazzarella & Panariello, 1993 ; Tennant, 1995 ; Swart & Oliver, 1998 ; Rostan *et al.*, 1994 ; Jin *et al.*, 1997).

Les télécommunications terrestres ou spatiales et les services mobiles de télécommunication nécessitent une utilisation de réseaux d'antennes imprimées adaptés à la nature de la surface porteuse. Afin de répondre à de telles exigences, il est utile de trouver le type de réseau d'antennes adapté à l'application souhaitée et d'élaborer des outils facilitant la conception et la synthèse de structures conformées susceptibles d'être implantées sur des objets de formes diverses (dièdre, pyramide, cylindre, cône, sphère, ogive, *etc.*). De telles structures présentent un intérêt certain pour leur souplesse d'implantation sur des surfaces de formes quelconques et sont ainsi à l'origine d'applications très diverses (radar, satellite, téléguidage, avionique, *etc.*).

D'emblée, les outils de synthèse développés pour les réseaux plans ne peuvent être modifiés pour s'adapter aux réseaux conformés (Djennas & Bendimerad, 2005 ; Djennas *et al.*, 2003 ; Girard *et al.*, 2000 ; Mazzarella & Panariello, 1993 ; Tennant, 1995). C'est pourquoi, nous proposons dans cet article une nouvelle étude de synthèse de réseaux conformés (conformés) d'antennes imprimées basée sur une méthode d'optimisation à projections.

La transition entre la synthèse de réseaux plans d'antennes imprimées et celle des réseaux conformés nécessite de nouveaux concepts à introduire comme la prise en compte de la contribution et de la visibilité de chaque source rayonnante (Djennas & Bendimerad, 2005 ; Djennas *et al.*, 2003 ; Girard *et al.*, 2000 ; Mazzarella & Panariello, 1993 ; Tennant, 1995).

PROBLEME DE SYNTHESE

L'association en réseau de plusieurs éléments rayonnants imprimés permet la réalisation de fonctions très particulières telles que : le dépointage et le balayage électronique, la production de diagrammes de rayonnement de formes et de directions variables, en agissant sur les paramètres : nombre et position spatiale des sources, amplitude et phase de l'alimentation, caractéristiques de la source élémentaire. Par action sur ces paramètres, le diagramme de rayonnement peut être contraint pour suivre l'allure d'une fonction imposée par l'utilisateur.

La solution la plus commune pour le problème de la synthèse, consiste à agir uniquement sur la pondération complexe de l'alimentation (amplitude et/ou phase).

Diagramme de rayonnement

Le but visé par cet article est la synthèse du diagramme de rayonnement d'un réseau conformé à N_s éléments imprimés. Cela dit, nous devons veiller à ce que le module de la fonction complexe :

$$f(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^{i=N_s} a_i e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{o}\vec{s}_i \cdot \vec{u})} E_i(\theta, \varphi) \quad (1)$$

qui n'est autre que l'expression du diagramme de rayonnement en zone lointaine, reste piéger entre les maxima (bornes supérieures) et les minima (bornes inférieures) d'un diagramme désiré (Djennas & Bendimerad, 2005 ; Djennas *et al.*, 2003 ; Girard *et al.*, 2000).

Avec :

- a_i : pondération complexe d'alimentation associée à la source d'ordre i ,
- $o\vec{s}_i$: vecteur position source relatif à une origine (O) dans un repère global représenté sur la Figure 1,
- \vec{u} : vecteur direction d'observation défini par les angles θ et φ dans le même repère,
- λ : longueur d'onde,
- $E_i(\theta, \varphi)$: contribution élémentaire de la source i .

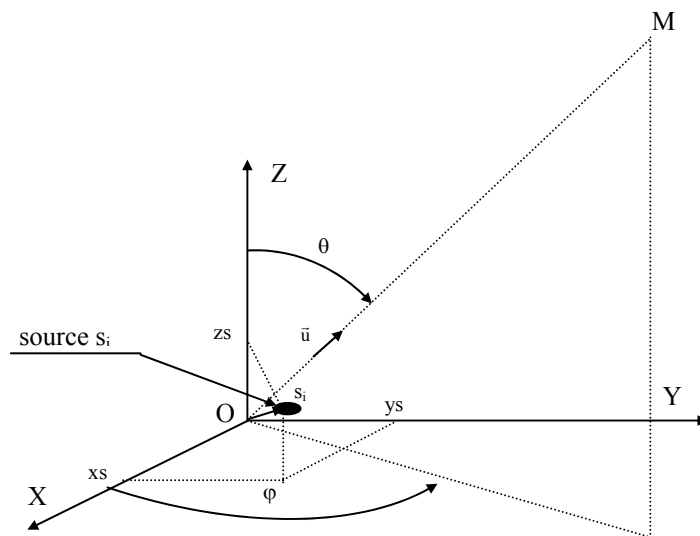


Figure 1. Repère global en coordonnées cartésiennes et angulaires.

$$\vec{u} = \begin{cases} u = \sin \theta \cos \varphi \\ v = \sin \theta \sin \varphi \\ w = \cos \theta \end{cases}$$

M : point d'observation en zone lointaine.

Pour le gabarit désiré, deux vecteurs définis respectivement par une borne inférieure $B_i(\theta, \varphi)$ et une borne supérieure $B_s(\theta, \varphi)$ caractérisent les angles limites de la largeur du lobe principal, l'oscillation maximale permise pour ce lobe (taux d'ondulation) et le seuil maximal fixé pour les lobes secondaires (Djennas & Bendimerad, 2005 ; Djennas *et al.*, 2003 ; Girard *et al.*, 2000 ; Mazzarella & Panariello, 1993).

METHODE DES PROJECTIONS

Avec cette méthode, nous cherchons à minimiser le critère d'erreur défini au sens des moindres carrés. Cela revient à minimiser l'écart entre le diagramme souhaité (gabarit) et le diagramme obtenu par synthèse. Ainsi, nous construisons la matrice :

$$A(i, l) = e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_l \sin \theta_1)} E_i(\theta_l, \varphi_1) \quad (2)$$

i : indice ligne dans la matrice A, variant de 1 à N_s , avec N_s : nombre de sources.

l : indice colonne dans la matrice A, variant de 1 à N_c .

$$\text{Avec : } N_c = N_\theta N_\varphi, \quad N_\theta = \frac{\pi}{\delta\theta} + 1, \quad N_\varphi = \frac{2\pi}{\delta\varphi} + 1.$$

N_c : nombre de mailles de la sphère d'observation échantillonnée.

$\delta\theta$: pas d'échantillonnage en élévation.

$\delta\varphi$: pas d'échantillonnage en azimut.

La combinaison des expressions (1) et (2), donne lieu à un système d'équations non linéaires, défini par :

$$\left| A^T a \right| = |f(a)| \quad (3)$$

où :

a : vecteur d'alimentation,

f : diagramme de rayonnement donné par l'expression (1).

La résolution du système non linéaire donné par l'expression 3, consiste à réduire à chaque itération, l'écart entre le diagramme synthétisé et la zone limitée par les deux bornes du gabarit imposé. L'idée sera donc, la projection du diagramme obtenu sur le gabarit, menant à la solution en cours d'itération telle que :

$$a^{k+1} = \left(A A^T \right)^{-1} A f(a^k) \quad (4)$$

k : ordre d'itération.

Les étapes de la résolution numérique sont récapitulées sur le diagramme synoptique de la Figure 2. Ce diagramme explique le formalisme du processus itératif depuis une loi d'alimentation initiale jusqu'à l'obtention d'une loi finale qui donne satisfaction aux contraintes du gabarit.

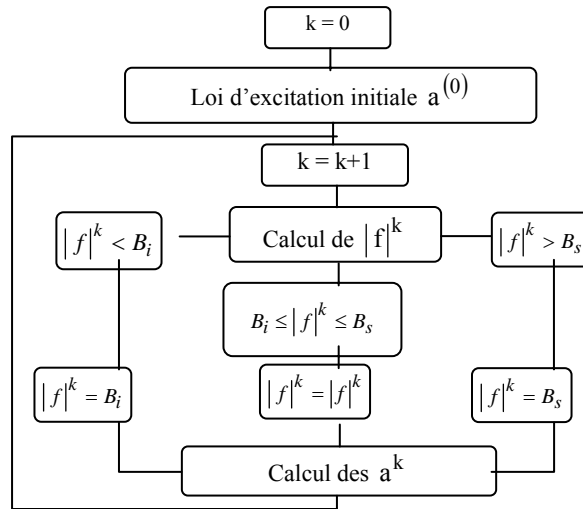


Figure 2. Diagramme synoptique de la résolution numérique par procédé itératif.

DEFINITION DU GABARIT

Comme déjà énoncé, le gabarit est la fonction idéale que le diagramme de rayonnement devra suivre. Cependant cette fonction est définie par plusieurs paramètres dans l'espace. Ces paramètres sont représentés sur la Figure 3, pour toute la sphère d'observation et sur la Figure 4 pour une coupe réalisée au niveau du plan principal de rayonnement, c'est à dire le plan φ_c .

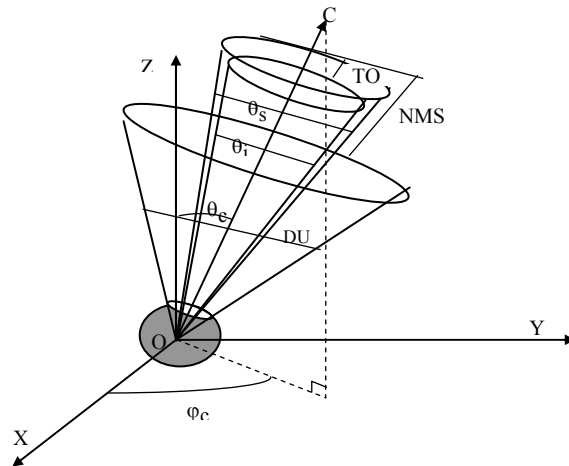


Figure 3. Gabarit défini sur toute la sphère d'observation.

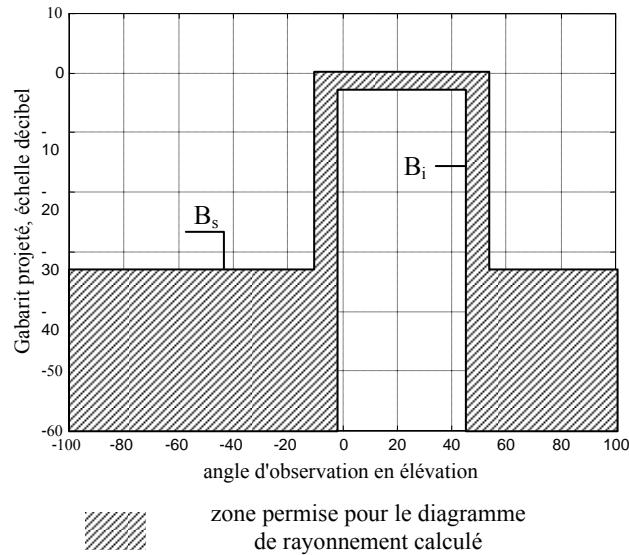


Figure 4. Projection de la Figure 3 sur le plan φ_c .

B_s , B_i sont la borne supérieure et inférieure du gabarit.

Les caractéristiques du gabarit imposé sont :

- Taux d'ondulation, TO en décibels,
- Niveau maximum des lobes secondaires, NMS en décibels,
- Etendue angulaire minimale du lobe principal, θ_i en degrés,
- Etendue angulaire maximale du lobe principal, θ_s en degrés,
- Domaine utile, DU en degrés,
- Angle de dépointage, AP : θ_c en degrés,
- Plan principal de rayonnement, PR : φ_c en degrés.

Les résultats graphiques de la synthèse qui vont suivre, seront esquissés sur toute la sphère d'observation ainsi que pour des coupes réalisées au niveau du plan principal de rayonnement.

Les graphiques omnidirectionnels du rayonnement synthétisé sont des courbes hypsométriques dont chaque coupe est donnée en coordonnées polaires ($F_n \cos \theta$, $F_n \sin \theta$), tandis que leurs projections sont données en coordonnées cartésiennes ($F_n B$, θ).

Avec :

$$F_n = \frac{|f(\theta, \varphi)|}{\max [|f(\theta, \varphi)|]} \quad (5)$$

$$F_{nB} = 20 \log \frac{|f(\theta, \varphi)|}{\max [|f(\theta, \varphi)|]} \quad (6)$$

RESULTATS

A. Réseau tétraèdre

Le premier réseau choisi pour l'étude a l'aspect d'une pyramide à quatre faces. Sur la Figure 5, ce réseau d'antennes a pour axe de révolution l'axe OZ et possède 16 éléments rayonnants qui fonctionnent à la fréquence de 5 GHz, soit une longueur d'onde λ de 6 cm.

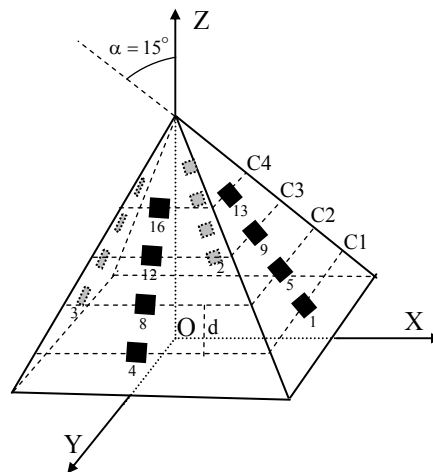


Figure 5. Réseau tétraèdre.

Les sources sont réparties symétriquement sur 4 couronnes à raison de 4 sources par couronne et avec une distance inter-sources comprise entre 0.5λ et 1.1λ . Les rayons des couronnes C1, C2, C3, C4, sont de : 4.24 cm, 3.45 cm, 2.68 cm, 1.90 cm, avec $d = 0.5 \lambda$.

L'optimisation par projections a généré des diagrammes de rayonnement dépointés respectivement de -75° et -90° sur tout l'espace pour la Figure 6 et la Figure 8. Ensuite,

ces deux Figures sont représentées par leurs projections sur les plans principaux de rayonnement par la Figure 7 et la Figure 9.

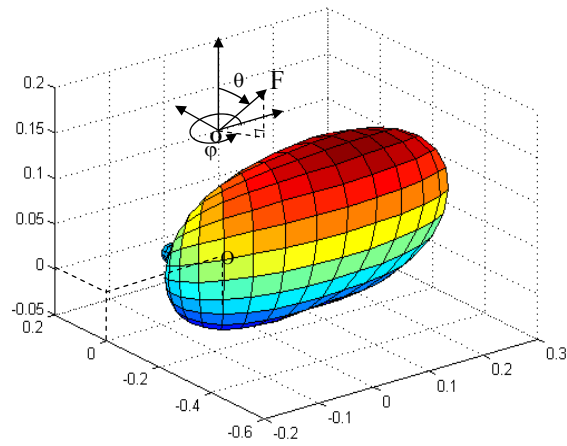


Figure 6. Rayonnement synthétisé du réseau tétraèdre.

TO = 3 dB, NMS = -20 dB, $\theta_i = 40^\circ$
 $\theta_s = 80^\circ$, DU = 360° , AP = -75° , PR = 90°

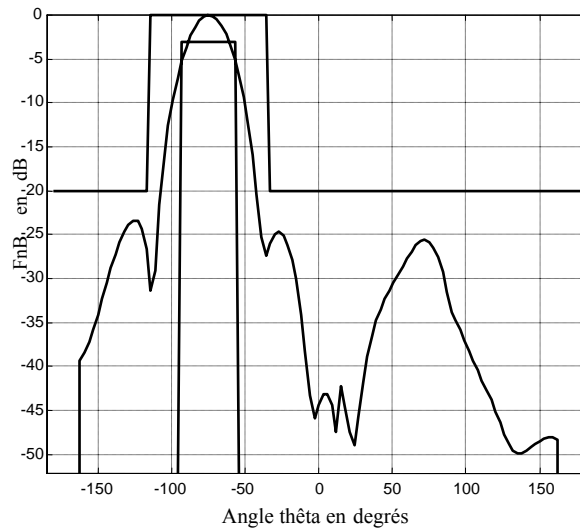


Figure 7. Coupe transversale de la Figure 6 sur le plan

PR = 90° .

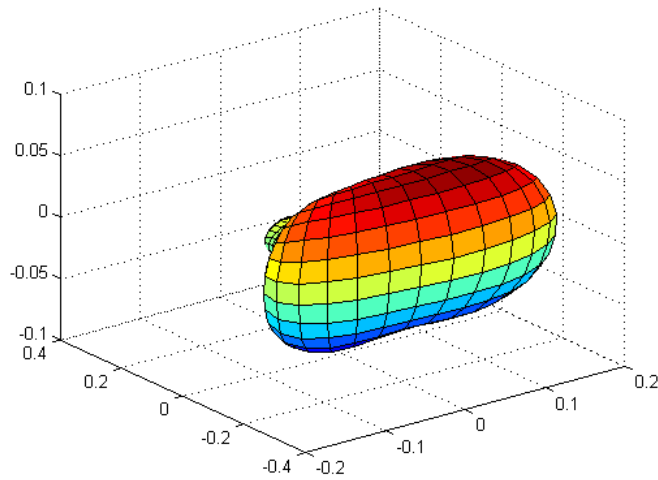
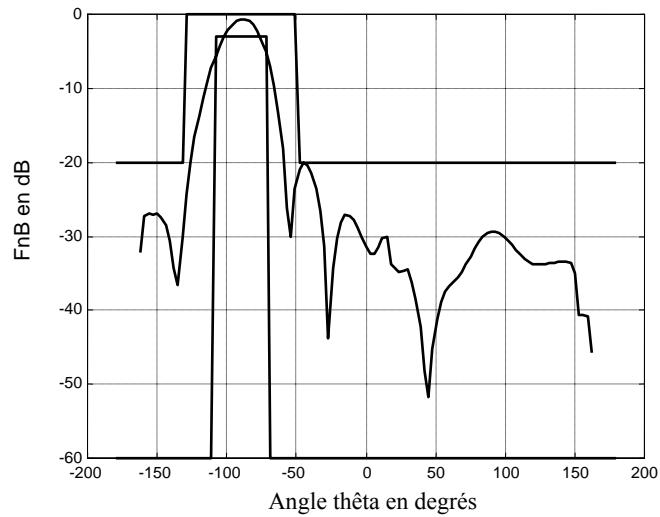


Figure 8. Rayonnement synthétisé du réseau tétraèdre.

$TO = 3 \text{ dB}$, $NMS = -20 \text{ dB}$, $\theta_i = 40^\circ$
 $\theta_s = 80^\circ$, $DU = 360^\circ$, $AP = -90^\circ$, $PR = 60^\circ$



**Figure 9. Coupe transversale de la Figure 8 sur le plan
 $PR = 60^\circ$.**

B. Réseau cône

Le deuxième type de réseau étudié sur la figure 10 est de forme conique et est composé de 82 éléments imprimés. La fréquence d'utilisation est de 3 GHz, soit une longueur d'onde λ de 10 cm. Les éléments rayonnants sont répartis sur 6 couronnes distantes de 0.8λ .

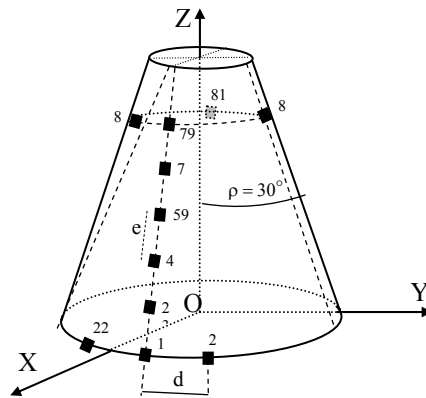


Figure 10. Réseau cône.

Les couronnes supérieure et inférieure comportent respectivement 4 et 22 éléments.

Les résultats obtenus avec et sans dépointage pour le réseau cône sont présentés sur la Figure 11 et la Figure 12 pour un gabarit centré et sur la Figure 13 et la Figure 14 pour un gabarit dépointé.

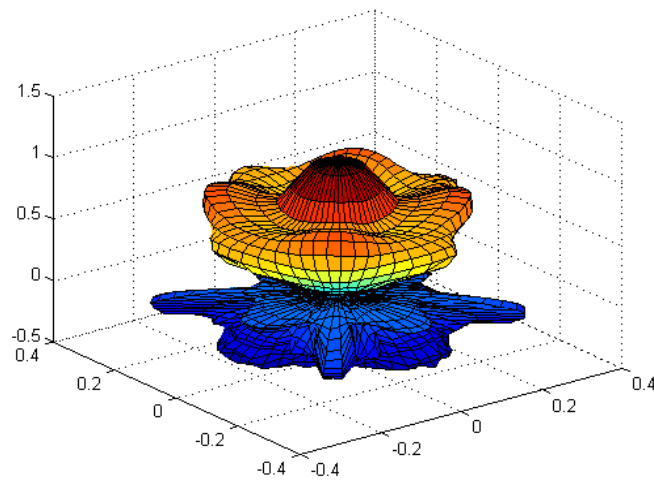


Figure 11. Rayonnement synthétisé du réseau cône.

$$TO = 2 \text{ dB}, NMS = -20 \text{ dB}, \theta_i = 50^\circ$$

$$\theta_s = 60^\circ, DU = 180^\circ, AP = 0^\circ, PR = 0^\circ$$

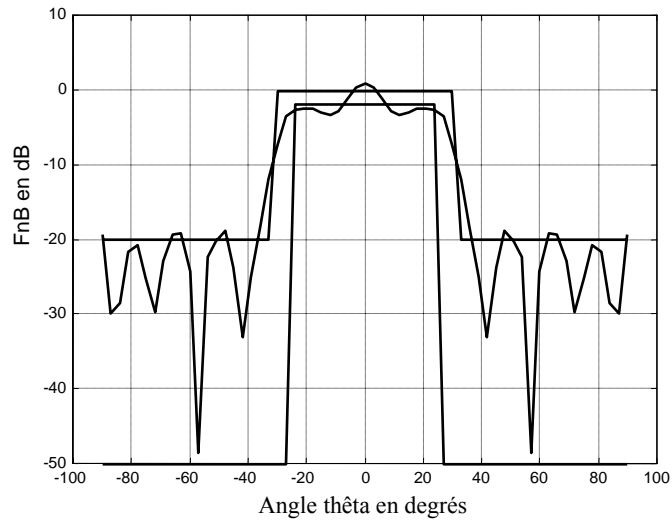


Figure 12. Coupe transversale de la Figure 11 sur le plan $PR = 0^\circ$.

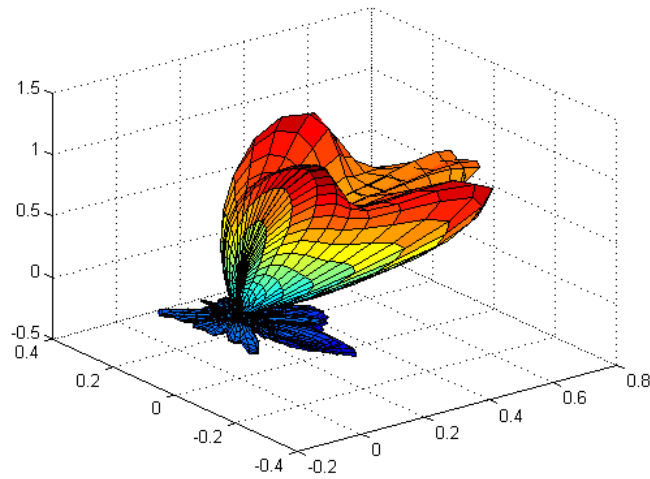


Figure 13. Rayonnement synthétisé du réseau cône.

$TO = 2 \text{ dB}$, $NMS = -20 \text{ dB}$, $\theta_i = 50^\circ$
 $\theta_s = 60^\circ$, $DU = 180^\circ$, $AP = 30^\circ$, $PR = 0^\circ$

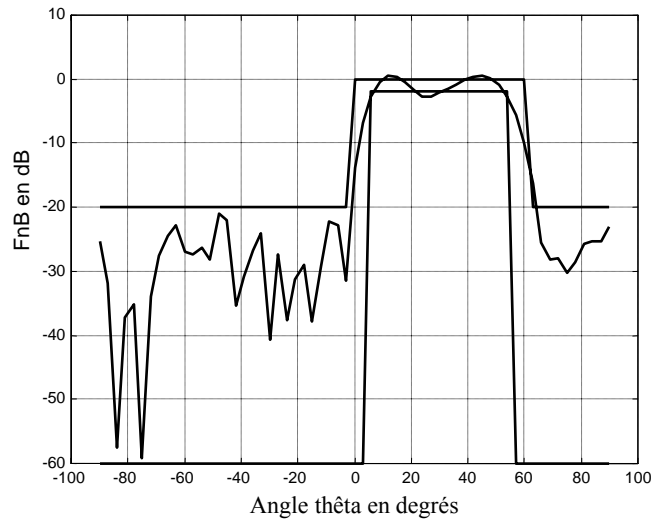


Figure 14. Coupe transversale de la Figure 13 sur le plan $PR = 0^\circ$.

C. Réseau cylindre

Le troisième réseau dont nous allons effectuer la synthèse est de forme semi-cylindrique. Comme le montre la Figure 15, ce réseau a pour axe de révolution, l'axe OX et est composé de 64 éléments imprimés.

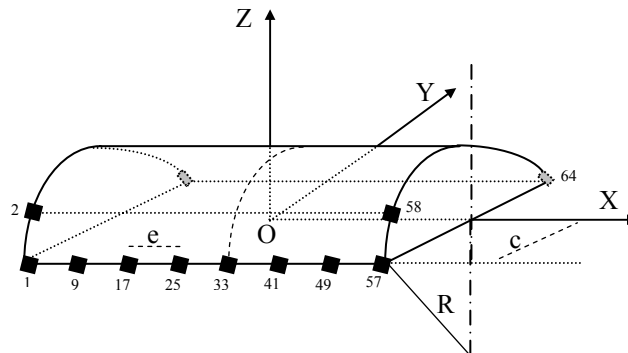


Figure 15. Réseau cylindre.

Les éléments rayonnants sont répartis symétriquement par rapport à l'axe OZ, leur distance suivant l'axe OX est de 0.75λ . La fréquence de fonctionnement est de 3 GHz.

La synthèse du diagramme de rayonnement réalisée pour le réseau cylindrique est représentée par les résultats des Figures 16 et 17 pour un gabarit centré et sur ceux des Figures 18 et 19 pour un gabarit dépointé.

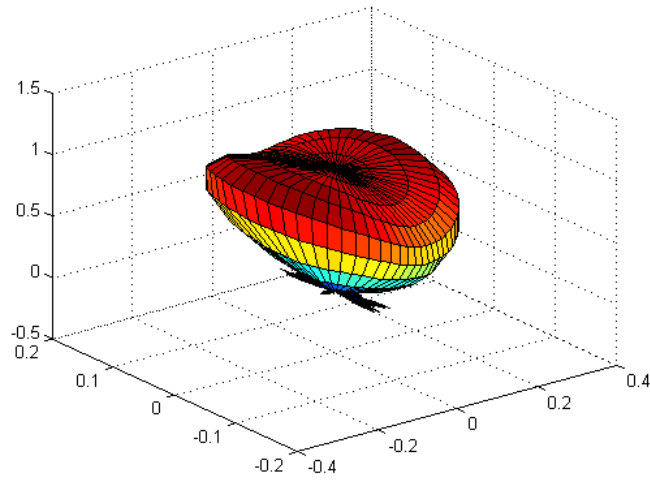


Figure 16. Rayonnement synthétisé du réseau cylindre.

TO = 1 dB, NMS = -20 dB, $\theta_i = 30^\circ$
 $\theta_s = 40^\circ$, DU = 180°, AP = 0°, PR = 0°

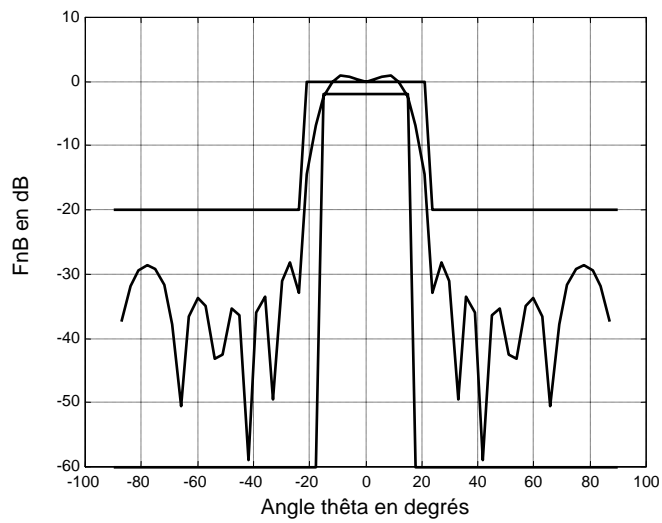


Figure 17. Coupe transversale de la Figure 16 sur le plan
PR = 0° .

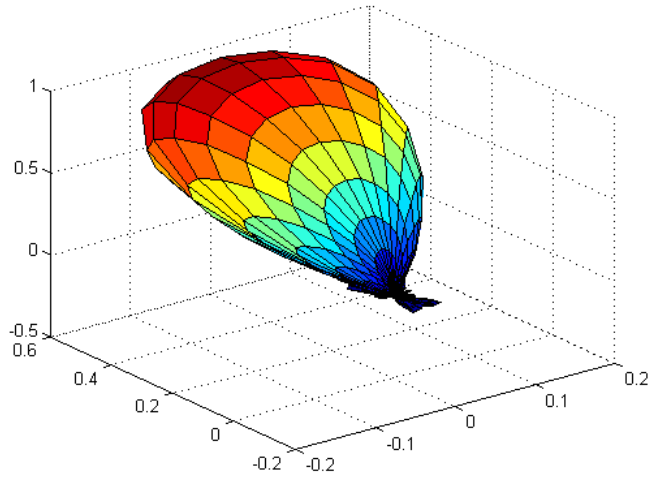


Figure 18. Rayonnement synthétisé du réseau cylindre.

$TO = 1 \text{ dB}$, $NMS = -20 \text{ dB}$, $\theta_i = 30^\circ$
 $\theta_s = 40^\circ$, $DU = 180^\circ$, $AP = 30^\circ$, $PR = 90^\circ$

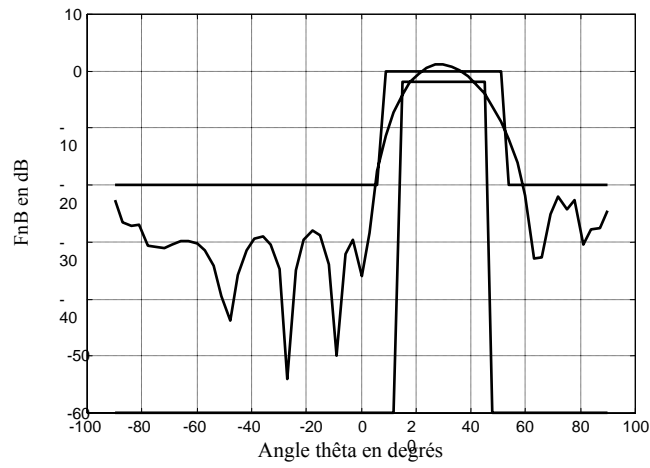


Figure 19. Coupe transversale de la Figure 18 sur le plan

$PR = 90^\circ$.

DISCUSSION ET COMMENTAIRES

La résolution du problème de la synthèse par le procédé d'optimisation à projections s'est caractérisée par la précision des résultats obtenus après simulation en un temps de calcul moyen de 300 secondes. Cette précision est remarquée sur les graphiques omnidirectionnels et projetés du champ rayonné et sur lesquels le suivi des gabarits imposés est pertinent.

CONCLUSION

On a proposé dans cet article une méthode de synthèse que nous avons parfaitement adaptée aux réseaux conformés d'antennes imprimées. Cette méthode basée sur le principe des projections permet d'obtenir toute forme désirée pour le diagramme de rayonnement du réseau étudié.

Cette méthode reste adaptée à toutes les structures conformées. D'abord validé par simulation et par comparaison avec les limites du gabarit imposé, l'outil de synthèse développé a été ensuite testé pour trois types de structures conformées, à savoir : un réseau tétraèdre un réseau cône et un réseau cylindre.

Les résultats obtenus pour différents cas de gabarits centrés ou dépointés sont très satisfaisants à l'encontre des difficultés et des complexités liées d'un côté à la modélisation des réseaux conformes et d'un autre côté à l'adaptation de la méthode de synthèse au problème en question.

Le logiciel réalisé est destiné à la synthèse et à la Conception Assistée par Ordinateur des réseaux conformés d'antennes imprimées. Ce module de calcul a fait l'objet de nombreux tests et les résultats qu'il fournit restent toujours en conformité avec les contraintes imposées.

REFERENCES

- Djennas, S.A. and Bendimerad, F.T. 2005. Genetic algorithm-based synthesis of three-dimensional microstrip arrays. *International Arabian Journal of Information Technology*, July, 2(3): 183-191.
- Djennas, S.A., Bendimerad, F.T., Merad, L., Meriah, S. 2003. Shaped beam synthesis of conformal microstrip antennas using genetic algorithm. *ITG-Conference on Antennas INICA*, September, Berlin, Germany.
- Girard, T., Staraj, R., Cambiaggio, E., Muller, F. 2000. Synthesis on conformal antenna array. *Millennium Conference on Antennas & Propagation, A.P. 2000*, April.
- Jin, J.M., Berrie, J.A., Kipp, R., Lee, S.W. 1997. Calculation of radiation patterns of microstrip antennas on cylindrical bodies of arbitrary cross section. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 45(4): 126-132.
- Maillout, R.J. 1994. *Phased Array Antenna Design Handbook*. Artech House.
- Mazzarella, G., Panariello, G. 1993. Pattern synthesis of conformal arrays. *IEEE. AP-S Int Symp.*, pp. 1054-1057.
- Pozar, D.M. and Schaubert, D.H. 1995. *Microstrip antennas : the analysis and design of microstrip antennas and arrays*. *IEEE Press*.

- Rostan, F., Gottwald, G., Wiesbeck, W. 1994. Design and performance of conformal microstrip patch arrays on cylindrical surfaces. September, *European Microwave Conference*, France, pp.1756–1761.
- Swart, W.A. and Oliver, J.C. 1998. Numerical synthesis of arbitrary discrete arrays. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, AP-40, pp. 1171–1174.
- Tennant, A. 1995. Numerical pattern synthesis of difference beam in conformal arrays. *Electronic Letters*, June, 31(12): 938–939.