Synthèse et Optimisation de Réseaux d'Antennes Imprimées Linéaires par la Méthode du Minimax

Fouzi HARROU *, Benamar BOUYEDDOU**, Sidi Ahmed DJENNAS** et Lotfi MERAD**

**Laboratoire de Modélisation et Sûreté des Systèmes (LM2S)*
ICD/UTT, FRE CNRS 2848, 12 rue Marie Curie- B.P. 2060 - 10010, Troyes, France
fouzi.harrou@utt.fr

***Laboratoire de Systèmes est Technologies de l'Information et de la communication, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, B. P. 230, 13000 Tlemcen, Algérie*
bouben81@yahoo.fr
livarium@yahoo.fr
merad77@yahoo.fr

Résumé: Ce travail explore l'optimisation et la synthèse de réseaux d'antennes imprimées linéaires. La synthèse développée est basée sur une technique d'optimisation locale dite méthode du minimax. L'objectif de cet article est d'adapter la méthode du minimax au réseau d'antennes imprimées afin de réduire le niveau des lobes secondaires et d'approcher le diagramme de rayonnement à un diagramme désiré optimal spécifié à partir d'une fonction (une gaussienne par exemple) ou d'un gabarit à niveaux par action sur les paramètres géométriques (répartition spatiale des sources) et électriques (loi d'alimentation des sources rayonnantes) du réseau. L'application de ce formalisme donne de très bons résultats.
Mots clés : Antenne imprimée, réseau d'antennes, synthèse, optimisation, méthode du minimax, diagramme de rayonnement.

INTRODUCTION

De nos jours, les antennes sont devenues un outil indispensable pour toute liaison radioélectrique (télécommunications par satellites, radars, radiodiffusion), elles permettent le détachement des champs de leurs supports métalliques et leur rayonnement dans l'espace et inversement.
Le développement de nouvelles architectures de réseaux de télécommunications (stations de base assurant une reconfiguration dynamique de leur couverture, systèmes de poursuite de satellites défilant) nécessitent des évolutions technologiques majeures au niveau de ces antennes. Il devient impératif en ce sens de disposer d'antennes à large champ d'ouverture en rayonnement, pour permettre des dépointages importants sans accroître de manière significative les pertes par déformation du diagramme de rayonnement. Les antennes imprimées sont conçues pour satisfaire les exigences posées par cette évolution technologique qui tend aussi vers la miniaturisation des dispositifs électroniques et des systèmes de télécommunications. Avec leurs faibles dimensions, leurs performances, leur flexibilité les rend particulièrement adaptables aux engins mobiles (satellite, avion, bateau) et leur souplesse qui leur permettent d'épouser n'import quelle forme de surface (plane ou conformée), ces antennes ont prouvé leur efficacité et tendent à remplacer les antennes classiques définitivement. Leur association en réseau, qui font l'objet de recherches approfondies, permet en outre d'améliorer leurs performances, et de réaliser des fonctions particulières mieux adaptées à certains types d'application telles que : le dépointage et le balayage électronique, la réjection des brouilleurs, 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.

Dans le domaine des réseaux d'antennes imprimées, le problème de synthèse préoccupe de plus en plus les spécialistes du domaine, qui consiste à estimer les variations d'amplitude et de phase de l'alimentation et de la répartition spatiale des éléments

rayonnants afin de s'approcher au mieux de contraintes de rayonnement fixées (abaissement des lobes secondaires) ou d'un diagramme désiré spécifier par un gabarit ou une fonction. Le but de l'étude est donc de rechercher la combinaison optimale de ces différents paramètres afin que le réseau réponde aux besoins de l'utilisateur selon un cahier des charges précis [MER 00].

Pour une synthèse de diagramme de rayonnement de réseaux d'antennes, différentes méthodes analytiques et numériques d'optimisation globales et locales (Fourier, Woodward-Lawson, relaxation, Newton, gradient conjuguée, algorithme génétique, Algorithme de recuit simulé, etc…) ont été développées et appliquées [BEN 88], [MER 04], [MER 07]. Compte tenu de la diversité des buts recherchés par les utilisateurs, l'étude du problème de la synthèse n'est pas une chose aisée, et on ne trouvera pas une méthode générale applicable pour tous les cas. De ce fait plusieurs méthodes ont été développées, et il reste d'extraire les meilleures solutions, c'est à dire de chercher une combinaison optimale des différents paramètres (alimentation, répartition spatiale), d'où une optimisation est nécessaire.

Dans cet article, nous allons présenter la méthode du minimax qui sera appliquée à la synthèse de diagramme de rayonnement des réseaux d'antennes imprimées linéaires.

1. Problème de synthèse

On considère un réseau linéaire, symétrique à P éléments rayonnants ayant le même diagramme de rayonnement de directivité $f(\theta, \varphi)$ et disposés régulièrement sur l'axe OX. Chaque élément possède une position X_i et est excité par une pondération complexe d'alimentation W_i. Son diagramme de rayonnement s'écrit [MER 00]:

$$Fs(\theta) = \frac{f(\theta, \varphi)}{F_{smax}} \sum_{i=1}^{P} W_i \cos(k_0 X_i \sin\theta + \psi_i) \qquad (1)$$

Avec :

k_0 : nombre d'onde ($k_0 = 2\pi/\lambda$)

θ : direction angulaire

$W_i = a_i \exp(j\psi_i)$: la pondération complexe d'alimentation de la source i.

Le diagramme de directivité $f(\theta, \varphi)$ est une fonction des deux directions angulaires θ et φ. Si φ est fixée, le diagramme $f(\theta, \varphi)$ pourra être conformé dans le plan E ou H. Pour des raisons de commodité, on s'intéresse à la synthèse de réseaux linéaires dans le plan $\varphi = 0$ (une synthèse en deux dimensions). Dans le cas d'un nombre pair d'éléments (P = 2N) et une répartition spatiale symétrique [figure 1], le réseau a pour diagramme de directivité normalisé :

$$Fs(\theta s = \frac{f(\theta)}{F_{smax}} \sum_{i=1}^{N} a_i \cos(k_0 X_i \sin\theta + \psi_i) \qquad (2)$$

Dans une synthèse le problème posé d'une façon générale est le suivant : Quelles sont les lois d'alimentation et/ou de répartition spatiale des sources qui permettent d'approcher au mieux un diagramme désiré?. Le problème de synthèse consiste donc à rechercher les trois vecteurs $A = [a_1, a_2, ..., a_N]$, $\psi = [\psi_1, \psi_2, \ldots, \psi_N]$ et $X = [\Delta x_1, \Delta x_2, \ldots, \Delta x_N]$ pour que le diagramme de rayonnement synthétisé $Fs(\theta)$ soit aussi proche d'un diagramme désiré donné $Fd(\theta)$.

Pour le diagramme de rayonnement $f(\theta)$ de l'antenne microruban, nous avons utilisé le modèle donné par [DAM 89]. Ce diagramme est déterminé pour un substrat de permittivité $\varepsilon r = 2{,}2$ d'épaisseur 0,152 cm, de patch carré de dimension 1,89 cm de côté et pour une fréquence d'utilisation de 5 GHz.

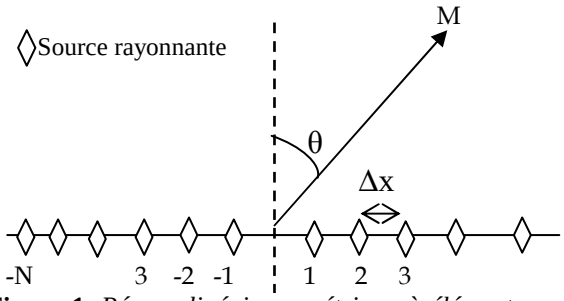

Figure 1. *Réseau linéaire symétrique à éléments non équidistants.*

2. Méthode du Minimax

C'est une méthode d'optimisation locale qui trouve son origine dans la conception des filtres utilisés dans les radars à compression d'impulsion [CHA 96], comme elle trouve aussi sa présence dans plusieurs d'autres applications :

-Exploration des graphes de jeu, où elle constitue une évaluation heuristique du jeu. Pour des joueurs cherchant à maximiser leur gain et minimiser leurs pertes, elle permet de schématiser le processus décisionnel que devrait suivre chaque joueur et prendre sa meilleure décision.

- L'intelligence artificielle et la synthèse des réseaux d'antennes (conventionnelles ou imprimées).

2.1. Principe:

Cet algorithme est capable de résoudre le problème suivant :

$$\text{Min Max}(F_i(x)) \qquad (3)$$

C'est à dire, il peut trouver les valeurs du vecteur x qui minimisent le maximum des valeurs de F_i.

Où :

F_i : une fonction continue linéaire ou non linéaire, à une ou plusieurs variables,

2.2. Adaptation de la méthode Minimax à la synthèse des réseaux d'antennes imprimées

La synthèse des réseaux d'antennes imprimées

consiste à déterminer la répartition spatiale et la loi d'alimentation des sources afin de produire un digramme désiré. Le diagramme de rayonnement d'un réseau linéaire d'antennes imprimées $F_S(\theta)$ est donné par l'expression suivante :

$$F_s(\theta) = f(\theta) \cdot F_R \qquad (4)$$

Où : $f(\theta)$: Diagramme de rayonnement élémentaire,

F_R : Facteur de réseau linéaire.

La méthode du minimax comme méthode d'optimisation et le diagramme de rayonnement ne présentent aucun lien entre eux. Afin d'appliquer la méthode du minimax à la synthèse des réseaux d'antennes imprimées, le lien sera établi au niveau du facteur de réseau F_R puisque le diagramme élémentaire $f(\theta)$ est indépendant des lois d'alimentation et de répartition spatiale des sources. Un calcul du facteur de réseau et de la fonction coût est effectué à chaque itération jusqu'à l'obtention de la solution optimale.

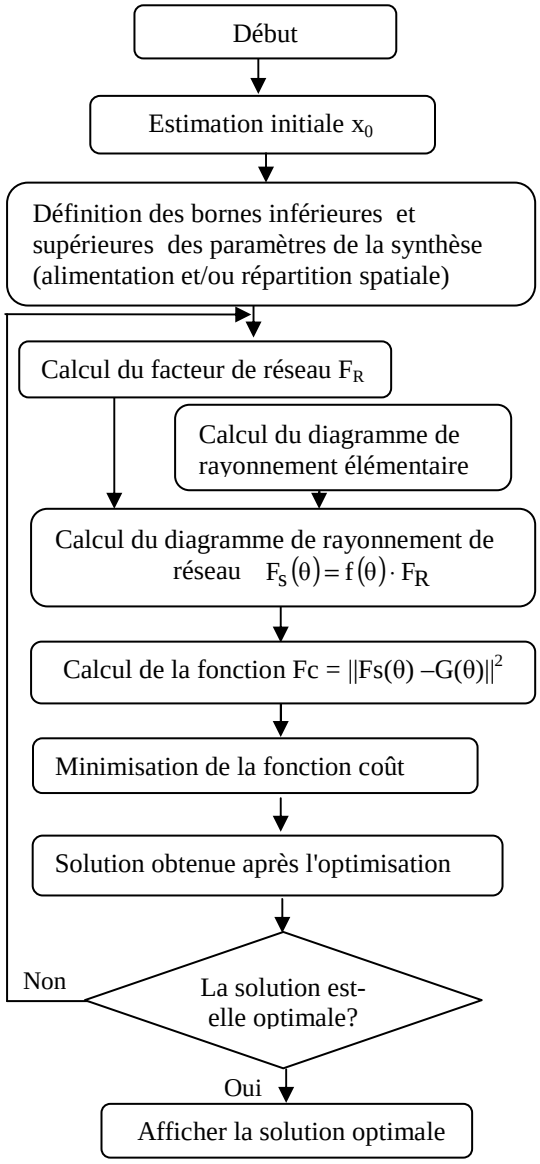

Figure 2. *Adaptation de la méthode du minimax à l'optimisation des réseaux d'antennes imprimées.*

Avec, $G(\theta)$: gabarit ou fonction désirés
Fc : fonction coût, $Fs(\theta)$: diagramme obtenu.

L'étude de la fonction du diagramme de rayonnement, nous permet de déduire les techniques de synthèse suivantes :

- Synthèse par loi d'amplitude et/ou de phase de l'alimentation.
- Synthèse par répartition spatiale des sources.
- Synthèse par loi d'amplitude et/ou de phase d'alimentation et/ou de répartition spatiale.

3. Synthèse à niveau de lobes secondaires

Le but de cette première partie est de minimiser au maximum le niveau des lobes secondaires, en utilisant les différentes techniques citées ci dessus. Pour atteindre ce but, la procédure utilisée est la suivante:

- Dans un premier lieu, et pour fixer la zone des lobes secondaires, on détermine le premier minimum du diagramme de rayonnement et la valeur de θ correspondante (θ_{min} par exemple) sur l'intervalle [0°,90°], en raison de la symétrie des réseaux à synthétiser.
- On applique la méthode du minimax sur la fonction coût dans l'intervalle [θ_{min} , 90°] pour minimiser au maximum le niveau des lobes secondaires.

3.1 Synthèse par loi d'amplitude

Pour un réseau de 12 éléments espacés d'un pas de 0.5λ soit 3 cm et par l'ajustement sur l'estimation initiale qui joue un rôle important sur la convergence, la méthode du minimax nous a permis de réduire le niveau des lobes secondaires à -69.32 dB après 70 itérations [figure.3] et dans un temps d'exécution inférieur à 8 secondes. La loi d'amplitude obtenue est donnée par le tableau 1. La figure 4 représente l'évolution du niveau maximum des lobes secondaires au cours de ces itérations.

On constate que la synthèse de réseaux d'antennes linéaires par la méthode de Minimax permet de réduire fortement le niveau maximum de lobes secondaires.

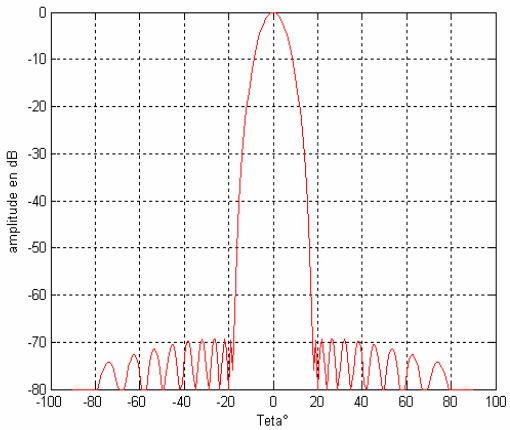

Figure 3. *Diagramme de rayonnement d'un réseau symétrique à 12 éléments.*

Source	*Amplitude*
1	*1.0000*
2	*0.8200*
3	*0.5340*
4	*0.2806*
5	*0.1043*
6	*0.0225*

Tableau 1. *La loi d'amplitude obtenue.*

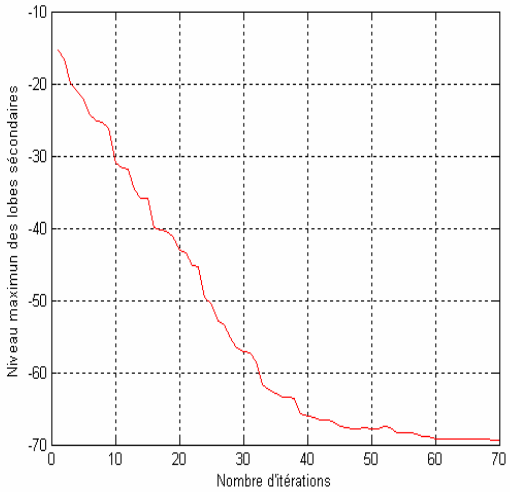

Figure 4. *Evolution du niveau maximum des lobes secondaires au cours des itérations.*

3.2 Synthèse par répartition spatiale

Dans ce type de synthèse, seule la répartition spatiale des sources permet de modifier les caractéristiques du diagramme de rayonnement. Avec des lois d'alimentation fixes en amplitude et en phase, et à partir d'un réseau périodique qui représente la solution initiale, on cherche une répartition spatiale des sources de telle façon qu'on obtienne des lobes secondaires de faible niveau. La solution optimale obtenue est acceptable si elle est réalisable en pratique. C'est pour cette raison qu'on prend en considération la distance entre deux sources successives (D_{xmin}) qui doit être supérieur à la largeur de l'élément rayonnant (Ly), c'est à dire : $D_{xmin} > Ly$, qui représente une contrainte additive au problème.

Pour un réseau de 12 éléments, et une loi d'alimentation équi-amplitude et equi-phase, le diagramme de rayonnement obtenu est représenté sur la figure 5. La répartition spatiale obtenue est donnée sur le tableau 2. Le niveau maximum des lobes secondaires est de -23.04 dB. L'évolution du niveau maximum des lobes secondaires est représentée sur la figure 6.

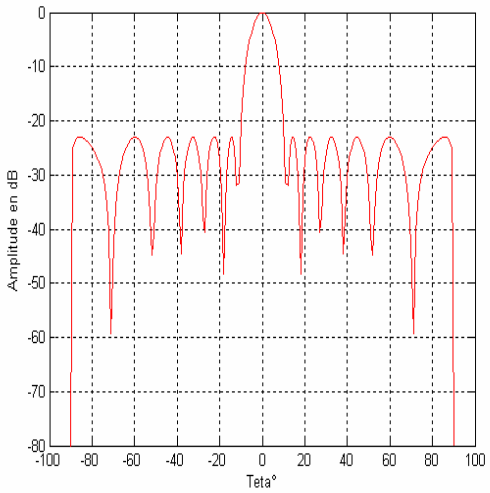

Figure 5. *Diagramme de rayonnement d'un réseau symétrique à 12 éléments.*

Source	Δx (m)
1	0.0207
2	0.0258
3	0.0236
4	0.0284
5	0.0338
6	0.0454

Tableau 2. *Répartition spatiale.*

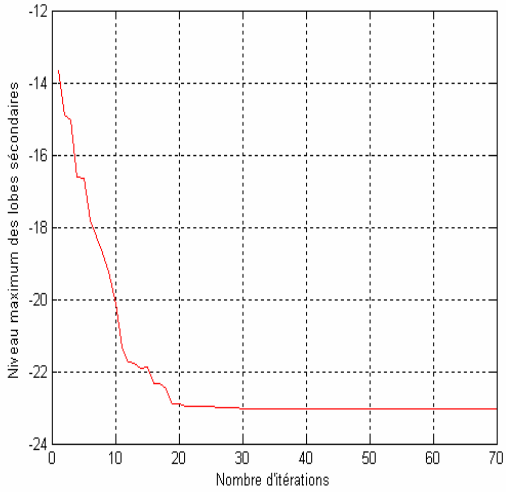

Figure 6. *Evolution du niveau maximum des lobes secondaires au cours des itérations.*

3.3 Synthèse par lois d'amplitude et de répartition spatiale

Cette étape consiste à réaliser une synthèse de réseaux non périodiques à 12 éléments en tenant compte de la variation des deux paramètres : amplitude et répartition spatiale. Le problème de la synthèse, consiste donc à déterminer les deux vecteurs

A et X. Nous avons obtenu le diagramme de rayonnement de la Figure 7, qui présente un niveau maximum de lobes secondaires de -67.57 dB.

On constate que ce type de synthèse a permis de réduire le niveau des lobes secondaires de façon considérable. Les valeurs d'amplitude et de répartition spatiale des sources sont données dans le tableau 3. La figure 8 représente l'évolution du niveau maximum des lobes secondaires au cours des itérations.

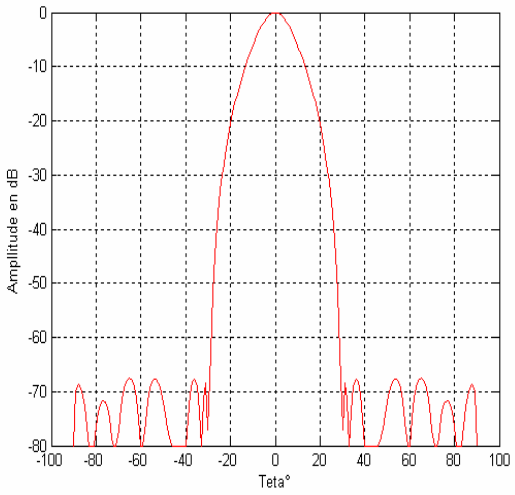

Figure 7. *Diagramme de rayonnement d'un réseau symétrique à 12 éléments.*

Source	*Amplitude*	*Δx (m)*
1	*1.0000*	*0.0306*
2	*0.8923*	*0.0353*
3	*0.4572*	*0.0410*
4	*0.1433*	*0.0467*
5	*0.0531*	*0.0591*
6	*0.0165*	*0.0460*

Tableau 3. *Valeurs d'amplitude et de répartition spatiale.*

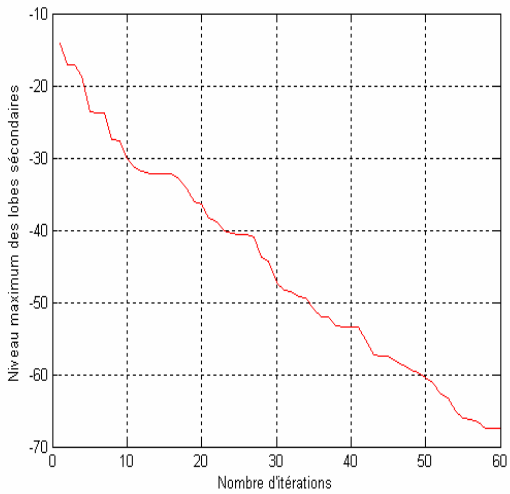

Figure 8. *Evolution du niveau maximum des lobes secondaires au cours des itérations.*

3.4 Synthèse par lois d'amplitude, de phase et de répartition spatiale

Pour terminer cette première partie, nous allons généraliser le problème de la synthèse en agissant simultanément sur les trois paramètres : amplitude, phase et répartition spatiale. Dans ce cas le problème de la synthèse consiste à déterminer les amplitudes Ai et les phases ψ_i de l'alimentation et aussi la répartition spatiale Xi des sources, toujours dans le but d'avoir un diagramme de rayonnement avec des lobes secondaires réduits au maximum.

Le résultat obtenu par cette approche est représenté sur la figure 9, dont le niveau maximum des lobes secondaire est à -63.46 dB.

L'évolution du niveau maximum des lobes secondaires au cours des itérations est donnée par la figure 10.

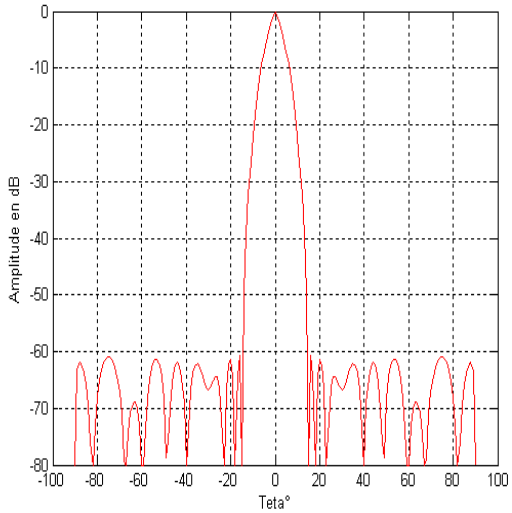

Figure 9. *Diagramme de rayonnement d'un réseau symétrique à 12 éléments.*

Source	Amplitude	Δx (m)	Phase (rad)
1	*0.9348*	*0.0337*	*0.2037*
2	*1.0000*	*0.0430*	*0.0424*
3	*0.9574*	*0.0338*	*0.7679*
4	*0.4569*	*0.0300*	*1.8452*
5	*0.0785*	*0.0600*	*0.9509*
6	*0.0183*	*0.0509*	*0.7995*

Tableau 4. *Valeurs de l'alimentation et de la répartition spatiale pour un réseau symétrique à 12 éléments rayonnants.*

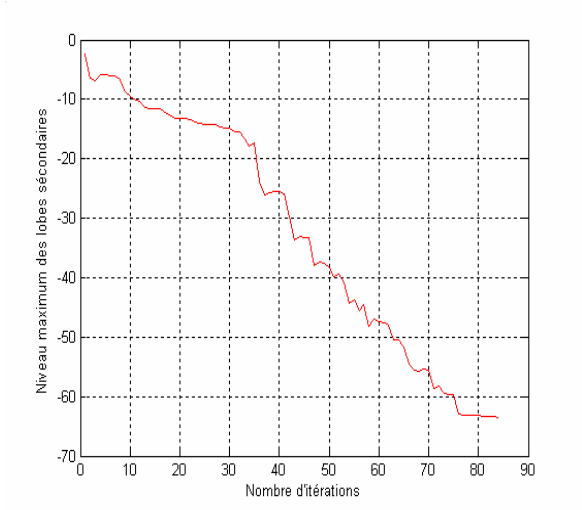

Figure 10. *Evolution du niveau maximum des lobes secondaires au cours des itérations.*

4. Synthèse à gabarit

Pour le cas de synthèse à gabarit, on cherche à minimiser l'écart entre une fonction à niveaux (gabarit $F_d(\theta)$) et le diagramme de rayonnement ($Fs(\theta)$) pour concentrer la puissance rayonnée dans le gabarit en question, et par conséquence, le diagramme synthétisé doit être dans les limites fixées par ce gabarit.

Le problème d'optimisation, donc, consiste à minimiser l'erreur quadratique (*coût)* donné par l'équation suivante :

$$\text{Coût} = \sum_{\theta} \left(F_s(\theta) - F_d(\theta)\right)^2 \qquad (5)$$

Le gabarit peut être défini dans tout l'espace, dans une partie de l'espace ou seulement dans quelques plans. Un exemple de projection de gabarit est donné sur la figure 11, avec ses différentes spécifications.

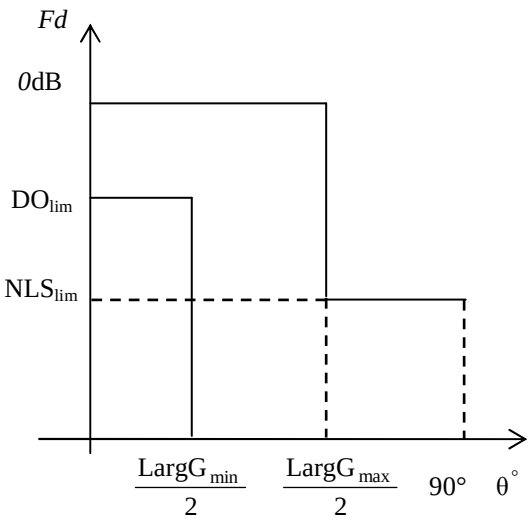

Figure 11. *Demi-gabarit centré caractérisant le diagramme désiré.*

Avec :
DO_{lim} : Domaine d'ondulation ; $DO_{lim} = F_d(\theta)_{min}$
NLS_{lim} : Niveau maximum des lobes secondaires ;
$NLS_{lim} = Fd(\theta)_{max}$
$LargG_{max}$: Largeur maximum du gabarit ;
$LargG_{min}$: Largeur minimum du gabarit ;

Afin de limiter le temps de calcul, nous avons défini le gabarit seulement dans le plan $\theta = 90$. Le but de l'optimisation est de minimiser au maximum la fonction coût.

4.1 Synthèse par loi d'amplitude

La figure 12 représente le résultat de la synthèse d'un réseau à 12 éléments, par loi d'amplitude. Le gabarit utilisé possède un domaine d'ondulation DO_{lim} de –5 dB, une largeur maximale du faisceau principal (LargGmax) de 50°, une largeur minimale (LargGmin) de 22° et un niveau maximum des lobes secondaires NLS_{lim} de –25 dB. On remarque que le diagramme de rayonnement résultant respect bien les limites du gabarit.

Le tableau 5 présente la loi d'amplitude obtenue. L'évolution d'erreur entre le diagramme de rayonnement et le gabarit est donnée par la figure 13.

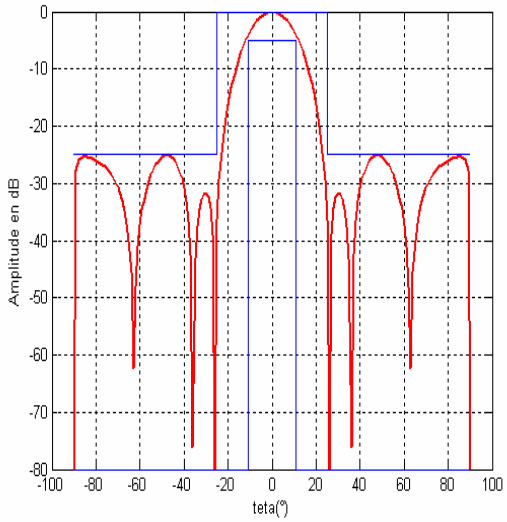

Figure 12. *Diagramme de rayonnement d'un réseau symétrique à 12 éléments.*

Source	*Amplitude*
1	*0.9987*
2	*1.0000*
3	*0.9321*
4	*0.4777*
5	*0.4135*
6	*0.6803*

Tableau 5. *Loi d'amplitude obtenue.*

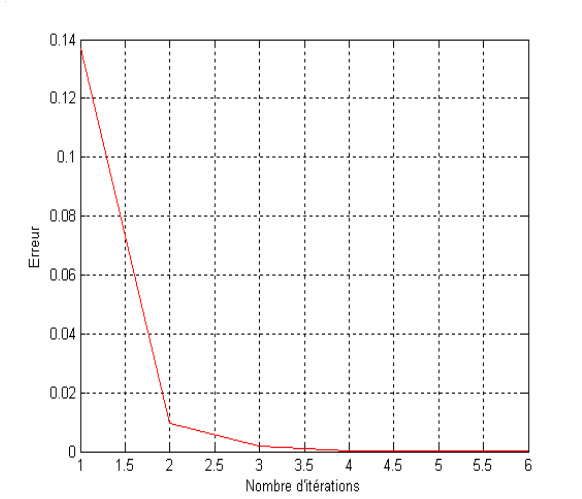

Figure 13. *Evolution d'erreur entre le diagramme de rayet le gabarit au cours des itérations.*

4.2 Synthèse par lois d'amplitude, de phase et de répartition spatiale

Dans cette étape, nous avons utilisé un gabarit qui possède un domaine d'ondulation DO_{lim} de – 4 dB, une largeur maximale du faisceau principal de 50°, une largeur minimale de 30° et un niveau maximum des lobes secondaires de –20 dB.

La figure 14 représente le résultat de la synthèse d'un réseau à 12 éléments, et par action sur les trois paramètres : amplitude, phase et répartition spatiale.

Comme bien illustré, le diagramme de rayonnement synthétisé est contenu dans les limites imposées par le gabarit décrit ci dessus.

Les lois d'alimentation et de répartition spatiales correspondantes sont données dans le tableau 6. L'évolution d'erreur quadratique au cours de la simulation est représentée sur la figure 15.

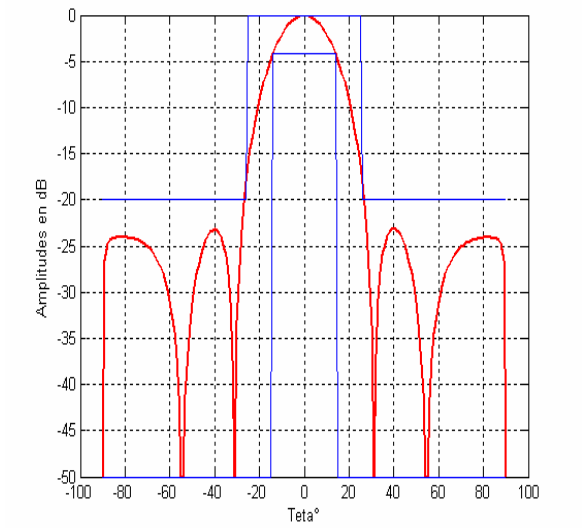

Figure 14. *Diagramme de rayonnement d'un réseau symétrique à 12 éléments.*

Source	*Amplitude*	Δx *(m)*	*Phase (rad)*
1	*0.9978*	*0.0203*	*0*
2	*0.9507*	*0.0195*	*0*
3	*0.8914*	*0.0256*	*0*
4	*0*	*0.0199*	*0.0002*
5	*0*	*0.1978*	*0.0145*
6	*0*	*0.1954*	*0.0095*

Tableau 6. *Valeurs de l'alimentation et de la répartition spatiale pour un réseau symétrique à 12 éléments rayonnants.*

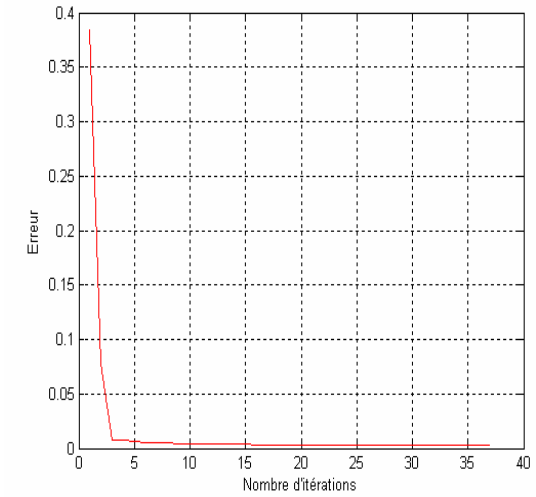

Figure 15. *Evolution d'erreur entre le diagramme de rayonnement et le gabarit au cours des itérations.*

5. Synthèse à gaussienne

L'objectif de cette section consiste à synthétiser des diagrammes de rayonnement conformément à diagramme désiré portant la forme d'une gaussienne.

5.1. Synthèse par loi d'amplitude

Dans le but de minimiser l'écart entre la gaussienne et le diagramme de rayonnement du réseau à synthétiser, nous avons fixé la distance inter-élément à 3 cm, et nous avons varié l'estimation initiale de la loi d'amplitude, jusqu'à l'obtention du résultat de la figure16. Ce résultat montre que le diagramme de rayonnement suit parfaitement la gaussienne utilisée.

La loi d'amplitude obtenue est donnée par le tableau 7.

Ainsi, on remarque que l'erreur, aux sens des moindres carrés entre la gaussienne et le diagramme de rayonnement obtenu, représenté sur la figure 17 tend vers 0 au cours des itérations de la simulation.

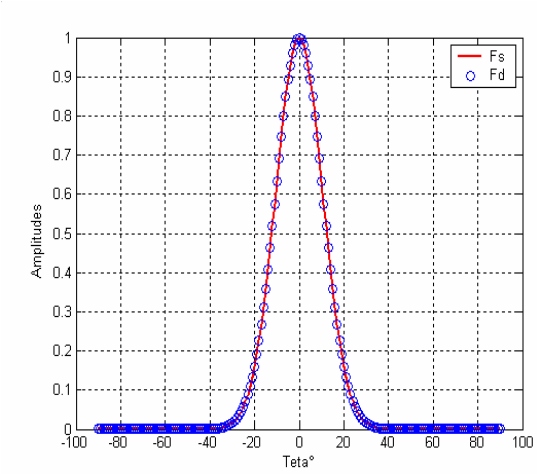

Figure 16. *Diagramme de rayonnement d'un réseau symétrique à 12 éléments.*

Source	*Amplitude*
1	*1.0000*
2	*0.7250*
3	*0.3757*
4	*0.1346*
5	*0.0313*
6	*0.0042*

Tableau 7. *Loi d'amplitude obtenue pour un réseau symétrique à 12 éléments rayonnants.*

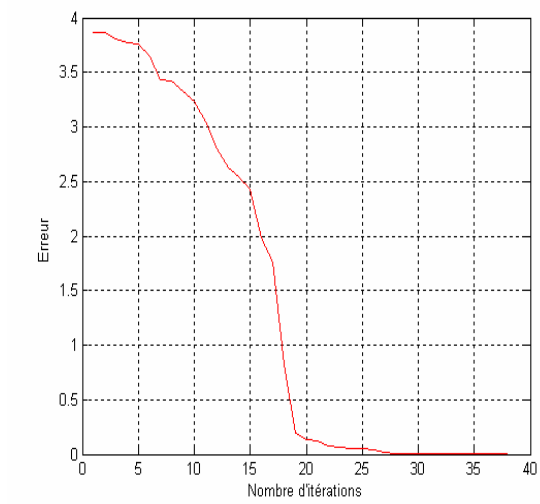

Figure 17. *Evolution de l'erreur entre le diagramme de rayonnement et la gaussienne.*

5.2. Synthèse par lois d'amplitude, de phase et de répartition spatiale (cas centré)

Comme il est bien illustré sur la figure 18, l'action sur ces trois paramètres, nous a permis de synthétiser un diagramme de rayonnement, d'un réseau à 12 éléments, confondu avec une gaussienne centrée. Les lois d'amplitude, de phase et de répartition spatiale ainsi obtenues sont données par le tableau 8. La figure 19 représente l'évolution de l'erreur entre le diagramme de rayonnement et la gaussienne.

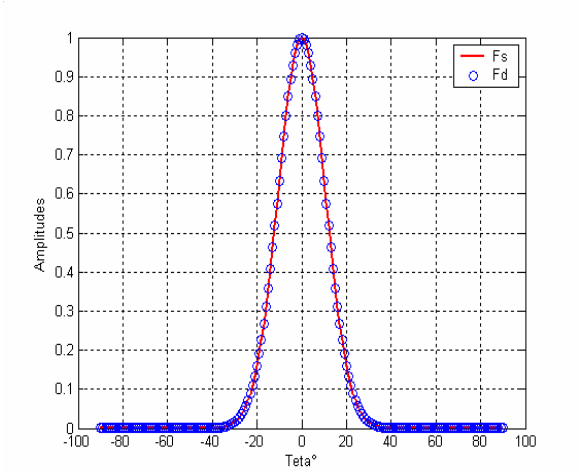

Figure 18. *Diagramme de rayonnement d'un réseau symétrique à 12 éléments.*

Source	*Amplitude*	Δx *(m)*	*Phase (rad)*
1	*1.0000*	*0.0316*	*0*
2	*0.7225*	*0.0325*	*0*
3	*0.3337*	*0.0341*	*0.0002*
4	*0.0868*	*0.0355*	*0.0004*
5	*0.0108*	*0.0365*	*0.0203*
6	*0.0005*	*0.0459*	*0.0119*

Tableau 8. *Valeurs de l'alimentation et de la répartition spatiale pour un réseau symétrique à 12 éléments rayonnants.*

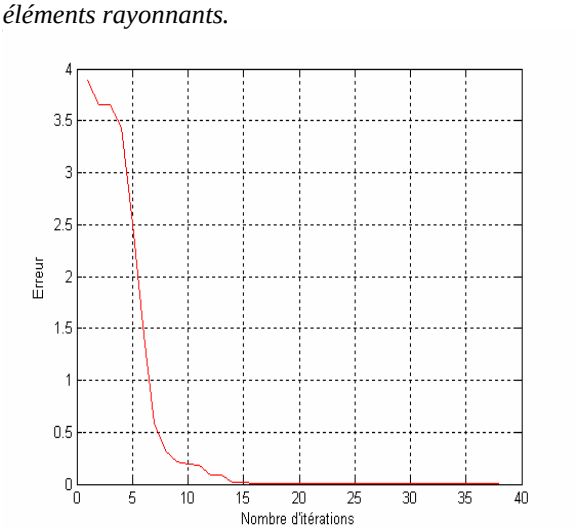

Figure 19. *Evolution d'erreur entre le diagramme de rayonnement et la gaussienne au cours des itérations.*

5.3. Synthèse par lois d'amplitude, de phase et de répartition spatiale (cas dépointé)

L'un des principaux avantages de la pondération complexe d'alimentation est la possibilité d'adapter les caractéristiques de rayonnement avec les exigences de l'utilisateur et la nature d'application. Par exemple le dépointage du lobe principal, appliqué dans les réseaux à balayage électronique, est obtenu par un ajustement sur le gradient de phase. Le but de cette dernière étape est le dépointage du lobe principal avec

un angle bien déterminé, soit (θ_{dep}). Pour atteindre ce but, nous avons synthétisé un réseau à 12 éléments par action sur les lois d'amplitude, de phase et de répartition spatiale, l'angle de dépointage de 40°.

La figure 20 donne le résultat obtenu et montre un suivi quasi-absolu du de rayonnement à la gaussienne dépointée.

Les lois d'amplitudes, de phase et de répartition spatiale sont données par le tableau 9. L'évolution d'erreur entre le diagramme de rayonnement et la gaussienne est donnée par la figure 21.

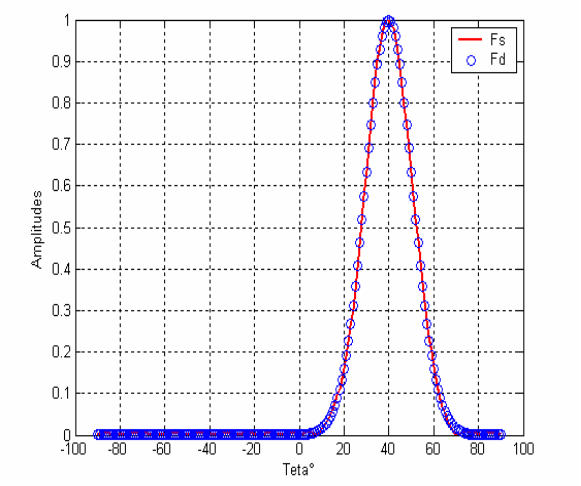

Figure 20. *Diagramme de rayonnement dépointé de 40° d'un réseau symétrique à 12 éléments.*

Source	*Amplitude*	*Δx (m)*	*Phase (rad)*
1	*1.0000*	*0.0262*	*2.0756*
2	*0.6463*	*0.0291*	*0.0427*
3	*0.5804*	*0.0414*	*4.6899*
4	*0.5630*	*0.0202*	*2.2259*
5	*0.2310*	*0.0203*	*6.0059*
6	*0.0395*	*0.0391*	*4.0494*

Tableau 9. *Valeurs de l'alimentation et de la répartition spatiale pour un réseau symétrique à 12 éléments rayonnants.*

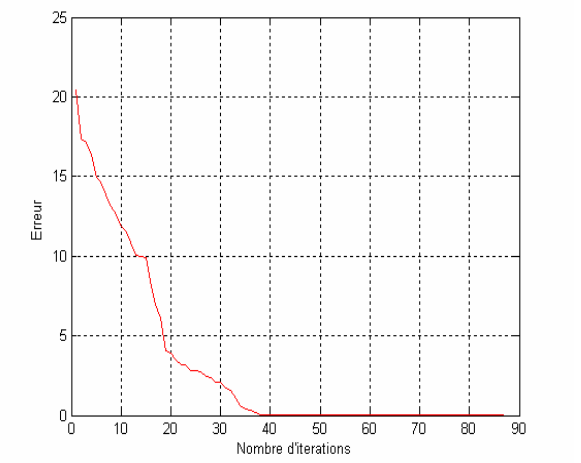

Figure 21. *Evolution d'erreur entre le diagramme de rayonnement et la gaussienne au cours des itérations.*

6. Conclusion

Dans cet article, nous avons explicité la méthode du Minimax, son principe, ces applications et son adaptation à la synthèse des réseaux d'antennes imprimées. Nous avons envisagé l'utilisation de cette méthode à l'optimisation et la synthèse de réseaux d'antennes linéaires.

Les simulations développées étaient à base de : la synthèse à niveau de lobes secondaires, à gaussienne et à gabarit et sont effectuées par action sur les paramètres géométriques et électriques du réseau.

Les résultats trouvés annoncent, d'une part, une réduction remarquable du niveau des lobes secondaires et d'autres parts un suivi quasi-absolue du diagramme de rayonnement à l'encontre des fonctions imposées que ce soit une gaussienne ou un gabarit à niveaux.

Il reste sans doute à dire que la méthode du Minimax est aussi efficace visa vis du problème de la synthèse des réseaux d'antennes imprimées et donne des résultats très appréciés, ouvrant ainsi, de par leur exploitation, les chemins sur une synthèse ciblant cette fois-ci les réseaux conformés d'antennes imprimées.

REFERENCES

[BEN 88] F. T. BENDIMERAD, E. CAMBIAGGIO, A. PAPIERNIK, *Méthode non linéaire de synthèse de réseaux d'antennes non périodiques : Application aux antennes microrubans*, Annales des télécommunications, 43, n° 5-6, 1988, p. 265-275.

[CHA 96] I.CHARON, *méthodes d'optimisation combinatoire*, Paris, Masson, 1996.

[DAM 89] J. P. DAMIANO, Contribution à l'étude des antennes microrubans multicouches à éléments superposés ou décalés, Thèse de Docteur es-sciences, Université de Nice-Sophia Antipolis, Janvier 1989.

[MER 00] L. MERAD, S.M. MERIAH, F.T. BENDIMERAD, *Modélisation et optimisation par les réseaux de neurones de réseaux d'antennes imprimées*, Journées des Mathématiques Appliquées, JMA 2000, Blida, 13-14 novembre 2000.

[MER 04] L.MERAD, F.T. BENDIMERAD and S.M. MERIAH, *Design of microstrip antennas array using genetics algorithms and simulated annealing*, Signal Processing Journal, Vol 21, N°3, France, November 2004.

[MER 07] L. MERAD, F.T. BENDIMERAD, S.M. MERIAH and S.A.DJENNAS, *Neural Networks for synthesis and optimization of antennas arrays*, Radioengineering Journal, Vol 16, N°1,April 2007.