

## ALGORITHME GENETIQUE ADAPTE A L'OPTIMISATION DES TRANSITIONS PSEUDO-GRADUELLES EN GUIDES D'ONDES CIRCULAIRES METALLIQUES

Reçu le 08/10/2003 – Accepté le 15/05/2004

### Résumé

Cette étude présente une approche informatique à la conception des transitions pseudo-graduelles en guides d'ondes circulaires par application de l'algorithme génétique (AG). La simulation de cette conception repose sur un calcul antérieur approfondi qui a permis de déterminer la matrice de dispersion généralisée  $S$  du transformateur. Ce calcul, basé sur la technique de l'analyse modale, nous permet de déduire les différentes réponses fréquentielles :  $S_{11}(f)$ ,  $S_{21}(f)$ ,  $ROS(f)$ . Ensuite, l'étude est reformulée en un problème d'optimisation en utilisant l'AG : approche génétique basée sur la sélection naturelle et la reproduction. La sélection optimale des paramètres a permis une amélioration du rapport d'ondes stationnaire (ROS) dans la bande utile du transformateur. Des résultats d'optimisation sont présentés pour des transformateurs à deux et à quatre paliers.

**Mots clés:** Optimisation, algorithme génétique, transitions pseudo-graduelles.

### Abstract

This study presents a data-processing approach for the design of pseudo-gradual transitions in circular waveguides using the genetic algorithm (GA). The simulation is based on a previous calculation, which made it possible to determine the generalized scattering matrix  $S$  of the transformer. This calculation, based on the technique of the modal analysis, enables us to deduce the various frequential answers:  $S_{11}(f)$ ,  $S_{21}(f)$ ,  $VSWR(f)$ . Then, the study is reformulated as a problem of optimization by using GA. The optimal selection of the parameters allowed an improvement of the voltage standing wave ratio (VSWR) in the permissible operating range of the transformer. Results of optimization are presented for both two and four-section transformers.

**Keywords:** Optimization, genetic algorithm, pseudo-gradual transitions.

R. THABET

M.L. RIABI

Laboratoire  
d'Electromagnétisme  
et de Télécommunications  
Département d'Electronique  
Faculté des Sciences  
de l'Ingénieur  
Université Mentouri  
Constantine, Algérie

### ملخص

تقدم هذه الدراسة طريقة لتصميم التحويلات الشبه متدرجة في موجات الأمامية الدائرية باستخدام الخوارزمي الجيني. ارتكزت محاكاة التصميم على حساب سابق معمق سمح باستخراج مصفوفة التبدل المعممة للمحول. هذا الحساب المبني على أساس طريقة الوصل النمطية سمح لنا باستنتاج مختلف الأجوبة الترددية. تصاغ الدراسة ثانية على شكل تقييم ومحاولة تحسين للأمتل باستخدام الخوارزمي الجيني: طريقة جينية تركز على أساس الاصطفاء الطبيعي و التكاثر. الانتقاء الأمثل للوسائط سمح بتحسين نسبة الأمواج المستقرة على الشريط الناقد للمحول. قدمت نتائج التحسين بالنسبة للمحولات ذات جزئين و أربعة أجزاء.

**الكلمات المفتاحية:** الخوارزمي الجيني, المحولات الشبه متدرجة.

Le problème de conception des transitions pseudo-graduelles en guides d'ondes a déjà suscité beaucoup d'intérêt et d'attention. Cependant, l'inhérente complexité d'une synthèse exacte de telles structures a mené les chercheurs à opter en général, pour les transformateurs quart d'ondes homogènes [1].

Dans cet article, l'étude est basée sur les résultats des travaux réalisés par application de la méthode variationnelle multimodale [2] et par la méthode de raccordement modal [3], où il s'agit de modéliser des transformateurs quart d'ondes non homogènes en guides d'onde circulaires métalliques. Chaque palier a une longueur égale au quart de la longueur d'onde guidée de la section correspondante à une fréquence commune dans la bande utile du transformateur.

Notre objectif est d'obtenir des transitions pseudo-graduelles, non nécessairement quart d'ondes où le coefficient de réflexion maximum obtenu dans la bande utile serait minimisé afin de permettre un transfert maximum de l'énergie électromagnétique à travers cette structure. La sélection des paramètres les plus pertinents est une opération assez délicate et importante dans la conception d'une telle structure et c'est dans cette optique qu'on s'est proposé de faire une optimisation à l'aide de l'AG [4,5]. Cette technique est basée sur une approche génétique qui optimise le choix des dimensions d'un transformateur non homogène à plusieurs paliers afin de pouvoir réaliser le minimum de réflexion possible dans la bande utile tout en respectant certaines contraintes sur les dimensions de chaque palier.

Vu la simplicité de son mécanisme, la facilité de sa mise en application et son efficacité, cette technique est devenue un instrument de recherche et d'optimisation important dans l'ingénierie électromagnétique [6-8]. Elle est appliquée à la conception de structures diverses telles que les antennes [9], les filtres, les surfaces sélectives en fréquence, etc.

## I- FORMULATION DU PROBLEME

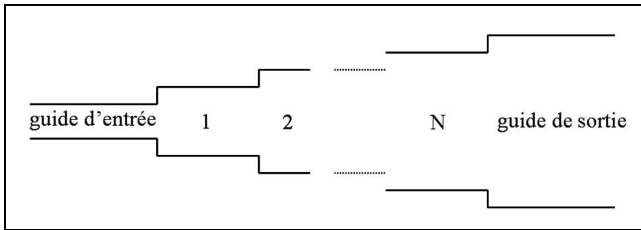
Considérons le transformateur à guides d'ondes circulaires, de la figure 1, formé de N paliers avec N+1 discontinuités transverses. Notre objectif est de trouver la fonction [1]:

$$\tilde{U} = \min_{\Phi} (U) = \min_{\Phi} \left\{ \max_{f_{\min} < f < f_{\max}} [|\rho(\Phi, f)|] \right\} \quad (1)$$

où

$$\Phi = [R_1, l_1, R_2, l_2, \dots, R_N, l_N]^T \quad (2)$$

$R_k$  et  $l_k$  sont respectivement le rayon et la longueur du  $k^{\text{ème}}$  palier pour  $k = (1, 2, \dots, N)$ ,  $\rho$  est le coefficient de réflexion à l'entrée du transformateur,  $f$  est la fréquence.  $f_{\min}$  et  $f_{\max}$  représentent les fréquences limites de la bande utile. Cette dernière est la bande de fréquence où il n'y a propagation que du seul mode fondamental TE<sub>11</sub>. Donc, l'objectif est de trouver l'ensemble des valeurs des paramètres de  $\Phi$  minimisant  $U$ , qui est l'amplitude maximale du coefficient de réflexion dans la bande utile.



**Figure 1:** Transformateur à N paliers.

### Limites sur les paramètres

$$\begin{cases} R_0 < R_1 < \dots < R_N < R_{N+1} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} (\lambda_{g_k} / 4 - \lambda_{g_k} / 16) \leq l_k \leq \lambda_{g_k} / 4 + \lambda_{g_k} / 16 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} k = 1, 2, \dots, N \end{cases}$$

Les paramètres géométriques d'un transformateur à N paliers sont soumis aux conditions suivantes :

$R_0$  et  $R_{N+1}$  sont respectivement les rayons du guide d'entrée et du guide de sortie, et  $\lambda_{g_k}$  la longueur d'onde guidée du mode fondamental TE<sub>11</sub> relative à une fréquence commune  $f_0$ , qui est la fréquence de travail, et correspondante au palier  $k$  :

$$\lambda_{g_k} = \lambda_0 / \sqrt{1 - (0.293 \lambda_0 / R_{k_0})^2} \quad (5)$$

où  $\lambda_0 (= c / f_0)$  est la longueur d'onde du vide à la fréquence  $f_0$  et  $R_{k_0}$  est le rayon du palier  $k$  du transformateur donné par [2] et [3].

## II. LES ALGORITHMES GENETIQUES

### II.1- Introduction

Les AGs sont des méthodes d'optimisation numériques de fonctions. Ils s'appuient sur les mécanismes de la sélection naturelle (Darwinisme) et de la génétique de l'évolution [4]. La combinaison de ces deux mécanismes assure l'évolution d'une population d'individus (solutions potentielles) qui, de génération en génération, ne contiendra que les individus les mieux adaptés à leur environnement.

### II.2- Principes généraux

Les AGs sont des algorithmes de recherche globale stochastique. Ils utilisent une procédure itérative dans le but d'optimiser d'une fonction définie par l'utilisateur (le critère, la fonction de coût ou la fonction de profit), appelée fonction d'adaptation [4].

L'application de l'AG pour l'optimisation d'un problème repose sur les cinq éléments suivants :

- 1/ Un principe de codage des solutions potentielles au problème.
- 2/ Un mécanisme de génération de la population initiale.
- 3/ Un choix approprié de la fonction d'évaluation. Elle classe les solutions en fonction de leurs aptitudes.
- 4/ Des opérateurs de reproduction qui définissent la manière dont les caractéristiques des parents sont transmises aux descendants.
- 5/ Les valeurs des paramètres utilisés par l'AG : taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, les probabilités liées à l'application de chaque opérateur génétique.

### II.3- Concepts de base

L'AG travaille en parallèle sur une population de M individus ou chromosomes, distribués dans la totalité de l'espace de recherche. Chaque chromosome représente le codage d'une solution potentielle au problème à résoudre. Il est constitué d'un ensemble de caractéristiques ou gènes, pouvant prendre plusieurs valeurs (allèles) appartenant à un alphabet qui n'est pas nécessairement numérique.

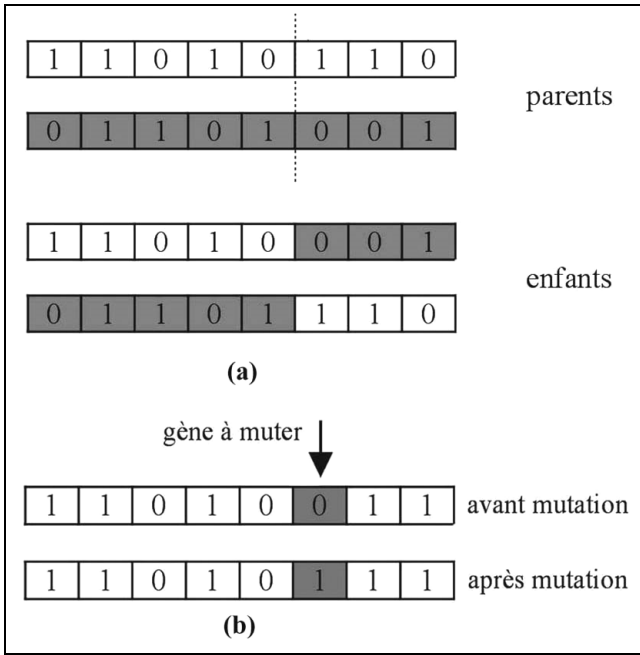
Le but est d'obtenir une combinaison optimale de ces gènes, donnant lieu au maximum d'adéquation [4].

La création d'une nouvelle population à partir de la précédente s'effectue en trois étapes :

- 1/ L'évaluation : la fonction d'adaptation est évaluée pour tous les individus de l'ancienne population.
- 2/ La sélection : l'AG sélectionne les individus sur la base de leur fonction d'adaptation (sélection des éléments pertinents qui optimisent le mieux la fonction).
- 3/ La reproduction par croisement et mutation : le croisement permet de combiner les gènes de deux chromosomes parents pour en obtenir deux nouveaux (Fig. 2a), tandis que la mutation agit en modifiant aléatoirement un ou plusieurs gènes d'un chromosome (Fig. 2b). Cette dernière a pour rôle de maintenir une certaine diversité dans la population [4].

### II.4- Codage des paramètres

L'optimisation d'un problème par application de l'AG nécessite de coder les solutions potentielles à ce problème en des chaînes finies de bits constituant les chromosomes.



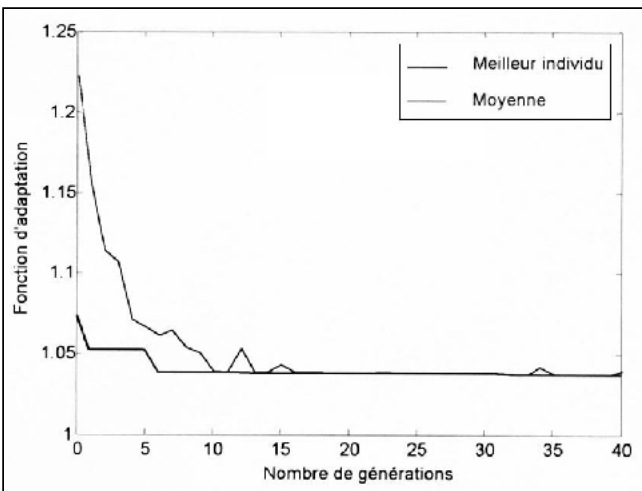
**Figure 2:** Opérateurs de reproduction. (a) Opérateur de croisement. (b) Opérateur de mutation.

Dans notre cas, le codage retenu est le codage binaire. Le nombre de gènes dans un chromosome correspond au nombre de variables à optimiser. Pour chaque variable  $x_k$ , on considère un espace de recherche tel que:

$$x_{k_{\min}} \leq x_k \leq x_{k_{\max}}$$

où  $x_{k_{\max}}$  et  $x_{k_{\min}}$  sont les bornes de cet intervalle de recherche. Le codage d'une variable sur  $l_k$  bits implique une discrétisation de l'espace de recherche en  $g_{k_{\max}} = 2^{l_k} - 1$  valeurs discrètes,  $l_k$  étant la longueur du gène  $k$ . Les paramètres géométriques  $x_k$  sont soumis à la formule de décodage suivante [6] :

$$x_k = x_{k_{\min}} + \left( \frac{x_{k_{\max}} - x_{k_{\min}}}{g_{k_{\max}}} \right) \sum_{i=0}^{l_k-1} a_{k_i} 2^i \quad (7)$$



**Figure 3:** Evolution de la valeur d'adaptation du meilleur individu et de la moyenne des fonctions d'adaptation pour la 1<sup>ère</sup> structure.

$a_{k_i}$  est la valeur du bit correspondant à la position  $i$  du gène  $k$ .  $x_{k_{\min}}$  et  $x_{k_{\max}}$  peuvent être déterminés par la connaissance antérieure de la structure à étudier.

### III. RESULTATS NUMERIQUES ET DISCUSSION

Le but de l'optimisation sera de minimiser le rapport d'ondes stationnaires (ROS) au voisinage de la fréquence de travail, de diminuer la longueur totale du transformateur et d'augmenter sa largeur de bande[10]. La fonction d'adaptation choisie est la fonction  $U$  définie en section II. Elle correspond à l'amplitude maximale du coefficient de réflexion à l'entrée du transformateur et elle est calculée par la méthode de raccordement modal [11,12].

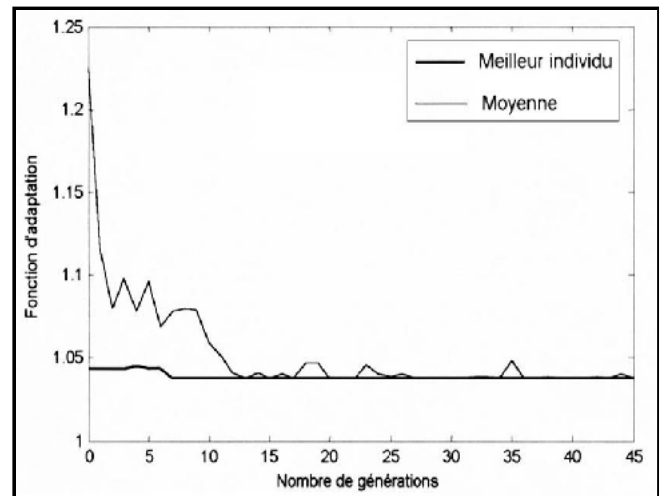
Rappelons que cette dernière permet de déterminer avec précision tous les champs générés par chaque transition. Elle prend en compte l'influence des champs évanescents ainsi que la transmission en puissance due aux modes supérieurs excités à chaque transition. Elle prend également en considération les effets d'interaction du mode dominant et des modes d'ordre supérieur entre les discontinuités successives.

La modélisation des transitions multiples est obtenue par le chaînage des matrices  $S$  de chaque transition en tenant compte de la longueur entre chacune d'elles, le couplage par modes évanescents étant négligeable.

#### III.1- Transformateur à deux paliers

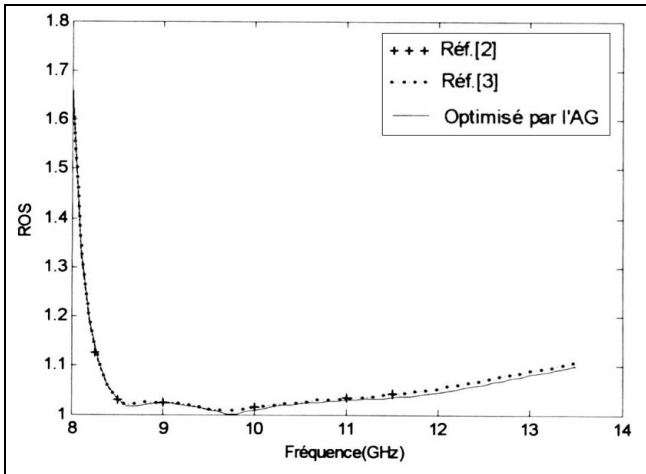
Pour l'optimisation du ROS dans la bande utile de ce transformateur, nous avons traité deux cas de figure. Pour la 1<sup>ère</sup> structure, nous procédons à l'optimisation simultanée des variables  $R_k$  et  $l_k$ , tandis que pour la seconde, nous optimisons seulement les rayons  $R_k$ ; les longueurs  $l_k$  étant fixées égales au quart des longueurs d'onde guidées des sections correspondantes. La 2<sup>ème</sup> structure représente un transformateur quart d'onde à 9.5 GHz.

Les figures 3 et 4 représentent l'évolution de la valeur d'adaptation de l'individu le plus adapté de chaque génération et de la moyenne des valeurs d'adaptation pour la 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> structure respectivement. Les tailles des

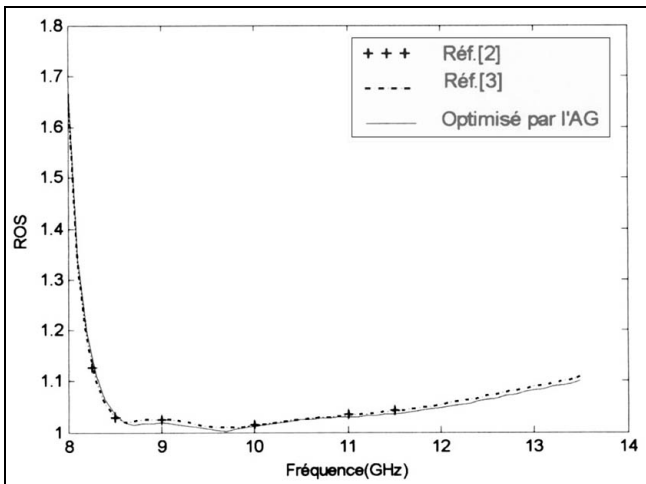


**Figure 4:** Evolution de la valeur d'adaptation du meilleur individu et de la moyenne des fonctions d'adaptation pour la 2<sup>ème</sup> structure.

populations utilisées sont de 18 individus pour la 1<sup>ère</sup> structure et de 16 pour la 2<sup>ème</sup> structure. La valeur moyenne a tendance à se rapprocher de celle de l'individu le plus adapté. Cela correspond à une uniformisation croissante de la population.



**Figure 5:** Variation du ROS pour le transformateur à deux paliers optimisé (1<sup>ère</sup> structure). Les dimensions correspondantes sont données au tableau 1.



**Figure 6:** Variation du ROS pour le transformateur à deux paliers quart d'onde optimisé (2<sup>ème</sup> structure). Les dimensions correspondantes sont données au tableau 1.

Sur les figures 5 et 6, nous représentons les variations du ROS du mode fondamental TE<sub>11</sub> en fonction de la fréquence pour les transformateurs à deux paliers optimisés par l'AG. La comparaison est faite avec le transformateur quart d'onde de référence [2,3].

Le transformateur (Fig.6) a été optimisé autour de  $f_0$ , dans la bande 8.5 à 11.6 GHz, où un ROS maximum de 1.04 a été obtenu. La longueur de chaque section est égale au quart d'une longueur d'onde à  $f_0 = 9.5$  GHz. On remarque que de légères améliorations sur le ROS et sur la longueur du transformateur ont été obtenues.

Dans le tableau 1 sont reportées les dimensions des transformateurs étudiés. Les bornes de l'intervalle de recherche  $l_{min}$ ,  $l_{max}$ ,  $R_{min}$ ,  $R_{max}$  sont déterminées à partir des inégalités (3) et (4).

	k	R <sub>k</sub>		l <sub>k</sub>	
		Réf. [2],[3]	obtenus par AG	Réf. [2],[3]	obtenus par AG
1 <sup>ère</sup> structure	0		11.165		∞
	1	11.36	11.46	13.61	13.326
	2	11.965	12.175	12.41	11.909
	3		13.4		∞
2 <sup>ème</sup> structure	0		11.165		∞
	1	11.36	11.448	13.61	13.408
	2	11.965	12.192	12.41	12.125
	3		13.4		∞

**Tableau 1:** Dimensions en mm des transformateurs à deux paliers optimisés par l'AG.

### III.2- Transformateur à quatre paliers

L'étude a été faite de façon similaire que pour le transformateur à deux paliers. Nous appellerons 3<sup>ème</sup> structure celle relative à l'optimisation simultanée des longueurs et des rayons, et 4<sup>ème</sup> structure celle correspondant à l'optimisation des rayons seuls. Cette dernière représente aussi un transformateur quart d'onde à 9,5 GHz.

Les figures 7 et 8 représentent la variation de la valeur d'adaptation en fonction des générations pour la 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> structure respectivement. Les tailles des populations utilisées sont de 16 individus pour les deux structures. Les fluctuations dans la courbe représentant la moyenne des fonctions d'adaptation sont essentiellement dues aux mutations.

Les variations du ROS du mode fondamental TE<sub>11</sub> en fonction de la fréquence correspondant aux structures optimisées sont représentées sur la figure 9 (pour la 3<sup>ème</sup> structure) et figure 10 (pour la 4<sup>ème</sup> structure). Pour mettre en évidence l'amélioration apportée, nous avons tracé la courbe correspondante pour le transformateur à quatre paliers (quart d'onde à 9.5 GHz), résultat de [2] et [3].

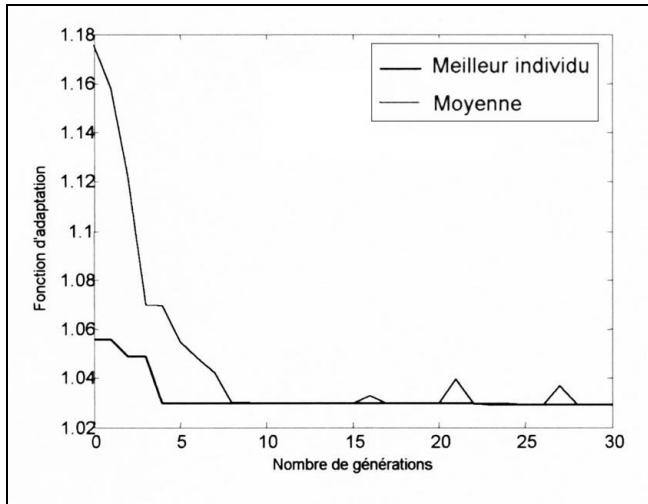
Le transformateur (Fig. 10) a été optimisé autour de  $f_0$ , dans la bande 8.4 à 11.8 GHz, où un ROS maximum de 1.0295 a été obtenu. La longueur de chaque section est égale au quart d'une longueur d'onde à  $f_0 = 9.5$  GHz.

Le tableau 2 représente les dimensions des transformateurs optimisés. Le ROS est minimisé au voisinage de  $f_0$ . Les améliorations générales désirées sur la largeur de bande, le ROS et la longueur du transformateur sont obtenues.

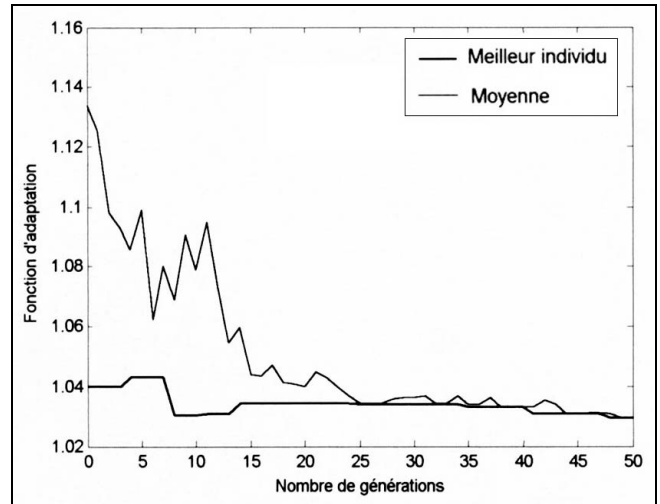
### CONCLUSION

La conception d'un transformateur à réponse fréquentielle optimale nécessite la sélection des paramètres les plus pertinents pour réaliser l'adaptation maximale et améliorer les conditions de propagation des ondes électromagnétiques. L'optimisation basée sur l'AG s'est avérée adaptée à la résolution de notre problème.

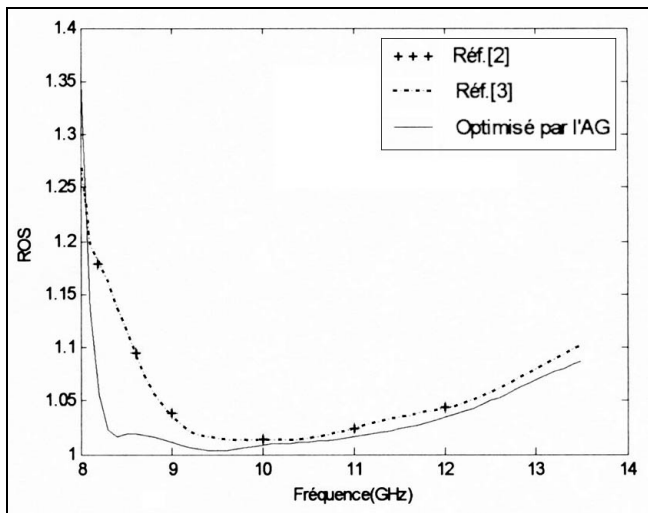
Le choix des paramètres de l'AG, tels que : la taille de la population, la probabilité de croisement et de mutation et la longueur du chromosome, ont été un exercice difficile



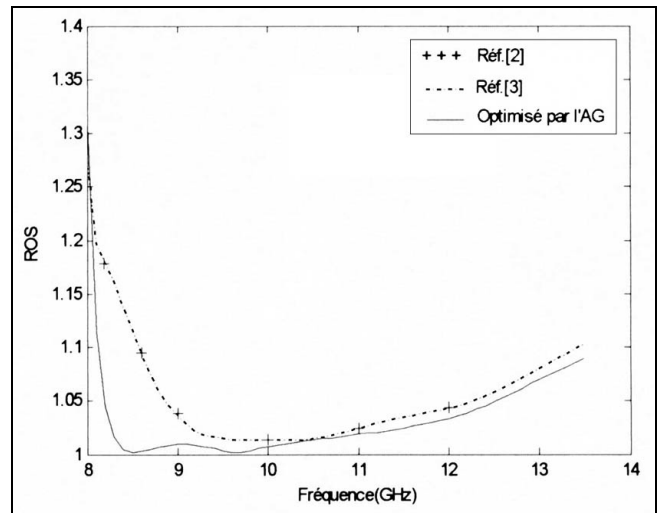
**Figure 7:** Evolution de la valeur d'adaptation du meilleur individu et de la moyenne des fonctions d'adaptation pour la 3<sup>ème</sup> structure.



**Figure 8:** Evolution de la valeur d'adaptation du meilleur individu et de la moyenne des fonctions d'adaptation pour la 4<sup>ème</sup> structure.



**Figure 9:** Variation du ROS pour le transformateur à quatre paliers optimisé (3<sup>ème</sup> structure). Les dimensions correspondantes sont données au tableau 2.



**Figure 10:** Variation du ROS pour le transformateur à quatre paliers quart d'onde optimisé (4<sup>ème</sup> structure). Les dimensions correspondantes sont données au tableau 2.

	k	Réf. [2],[3]	R <sub>k</sub> obtenus par AG	Réf. [2],[3]	l <sub>k</sub> obtenus par AG
3 <sup>ème</sup> structure	0		11.165		∞
	1	11.21	11.246	13.99	12.58
	2	11.415	11.454	13.48	13.222
	3	11.685	11.935	12.93	12.712
	4	12.09	12.838	12.27	12.386
	5		13.40		∞
4 <sup>ème</sup> structure	0		11.165		∞
	1	11.21	11.211	13.99	13.983
	2	11.415	11.333	13.48	13.674
	3	11.685	11.735	12.93	12.837
	4	12.09	12.498	12.27	11.745
	5		13.40		∞

**Tableau 2:** Dimensions en mm des transformateurs à quatre paliers optimisés par l'AG.

mais important (cette difficulté a surtout été rencontrée dans le cas du transformateur à deux paliers). Ces paramètres affectent la vitesse de convergence vers la solution optimale et le temps de calcul. Aussi, un bon choix de l'intervalle de recherche est un critère d'efficacité dans la recherche de la solution optimale.

Les AGs ont montré une grande souplesse et une simplicité d'utilisation. Ils ne nécessitent a priori aucune hypothèse sur la structure étudiée puisqu'ils ne sont pas basés sur une approche analytique mais sur une approche itérative et heuristique. Cette indépendance vis-à-vis du système à optimiser facilite leur application sur un large éventail de problèmes.

## REFERENCES

- [1]- Bandler J.W., "Computer optimisation of inhomogeneous waveguide transformers", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-17, N°8, Aug. (1969), pp. 563-571.

- [2]- Vuong T.P., "Contribution à l'étude des discontinuités dans les guides d'ondes métalliques creux", Thèse de Doctorat INPT, ENSEEIHT, Toulouse, France, Déc. (1999).
- [3]- Belmeguenai M., Riabi M.L. et Saguët P., "Caractérisation rigoureuse des discontinuités en guides circulaires. Application aux iris et transformateurs", 16<sup>ème</sup> Colloque International OHD'01, Le Mans, France, Sept. (2001), pp. 233-236.
- [4]- Renders J.M., "Algorithmes génétiques et réseaux de neurones", Edition HERMES, (1995).
- [5]- Goldberg D.E., "Algorithmes génétiques : Exploration, optimisation et apprentissage automatique", Editions Addison-Wesley, France, S.A., juin (1994).
- [6]- Rahmet-Samii Y. and Michielssen E., "Electromagnetic optimization by genetic algorithms," Wiley, New York, (1999).
- [7]- Chien-Ching C. et Wei-Ting C., "Electromagnetic imaging for an imperfectly conducting cylinder by the genetic algorithm", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.48, N°11, Nov. (2000), pp. 1901-1905.
- [8]- Hussein Y.A. and El-Ghazaly S.M., "Modeling and optimization of microwave devices and circuits using genetic algorithms", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.52, N°1, Jan. (2004), pp. 329-336.
- [9]- Allard R.J., Werner D.H. and Werner P.L., "Radiation pattern synthesis for arrays of conformal antennas mounted on arbitrarily-shaped three-dimensional platforms using genetic algorithms", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 51, N°5, May, (2003), pp. 1054-1062.
- [10]- Riblet H.J., "A general theorem on an optimum stepped impedance transformers", *IRE Trans. Microwave Theorem Tech.*, Mar. (1960), pp. 169-170.
- [11]- Wexler A., "Solution of waveguide discontinuities by modal analysis", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-15, N°9, Sept. (1967), pp. 508-517.
- [12]- Sabatier C., "Etude des discontinuités en guide circulaire à l'aide de l'analyse modale. Application aux cornets", Proc. JINA'88, Nice, (1988), pp. 432-436. □