

## ANALYSE RIGOUREUSE D'IRIS METALLIQUES EPAIS ET LEUR APPLICATION DANS LES FILTRES A CAVITES RECTANGULAIRES DIRECTEMENT COUPLEES

Reçu le 05/04/2000 – Accepté le 16/12/2000

### Résumé

Une technique générale, basée sur l'analyse modale, est utilisée pour la modélisation de discontinuités et de filtres en guides d'ondes rectangulaires. Dans notre étude où l'épaisseur de l'obstacle métallique (iris épais) est prise en compte, nous déterminons d'abord la matrice de diffraction de l'iris par utilisation de l'analyse en modes symétriques et asymétriques, puis en considérant le principe d'association de quadripôles en cascade, nous obtenons la réponse du filtre. Nos différents résultats sont comparés avec ceux publiés dans la littérature.

**Mots-clés:** Analyse modale, discontinuités plan-H, guides d'ondes, filtres, iris, micro-ondes.

### Abstract

A general method, based on modal analysis, is used for the modeling of rectangular waveguide discontinuities and filters. In our study where the finite thickness of the metallic diaphragm (thick iris) is taken into account, we first determine the scattering matrix of the iris using the symmetrical and asymmetrical excitations. The filter response is obtained by cascading the two-ports S matrices in pairs. Our results were compared with those published in literature.

**Key words:** modal analysis, H-plane discontinuities, waveguides, filters, iris, microwaves.

**M. BELMEGUENAI**

**M.L. RIABI**

Département d'Electronique  
Faculté des Sciences de  
l'Ingénieur  
Université Mentouri  
Constantine, Algérie

### ملخص

استعملنا في هذا البحث طريقة عامة تعتمد على التحليل النمطي لدراسة عدم الاستمرار و المرشحات في مرشد الأمواج المستطيل (guide d'ondes) حيث أخذنا فيها بعين الاعتبار سمك الحاجز المعدني (Iris) (épais)، تحدد أولا مصفوفة التبدد (Matrice S) للحاجز (Iris) باستعمال التحليل بالأنماط المتماثلة و غير المتماثلة و بعدها نحصل على استجابة المرشح باستعمال مبدأ جمع ثنائيات الأقطاب الموضوعة الواحدة تلو الأخرى. كل النتائج المحصل عليها تمت مقارنتها بتمثيلتها الموجودة في البحوث المعروفة.

**الكلمات المفتاحية:** التحليل النمطي، عدم الاستمرار، مرشد الأمواج، plan-H، المرشحات، الحاجز، الأمواج الدقيقة.

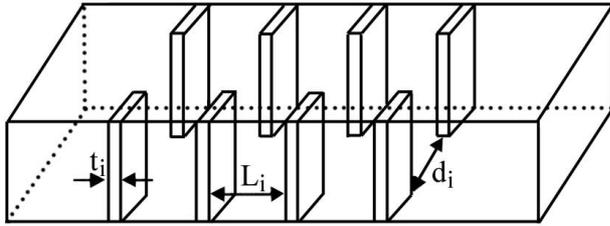
La modélisation électromagnétique des discontinuités en guides d'ondes (iris, diaphragmes, changement de section droite dans les guides,.....) a attiré l'attention de plusieurs chercheurs depuis de nombreuses années [1-6] à cause de leurs applications dans la conception d'un grand nombre de circuits et dispositifs micro-ondes tels que les résonateurs, les coupleurs ou les filtres. Les méthodes d'analyse de ces discontinuités en guide peuvent être classées en deux catégories: les méthodes numériques et les techniques analytiques. Ces dernières, déjà anciennes et historiquement les premières, ont permis de résoudre les problèmes qui correspondent à des structures de guidage dont les limites coïncident avec des axes de coordonnées curvilignes. Elles utilisent les transformations conformes et sont souvent appliquées aux discontinuités dont les fonctions propres des modes sont analytiquement résolues. Quant aux méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis (Finite Element Method FEM) [7, 8], la méthode des éléments aux frontières (Boundary Element Method) [9] et certaines méthodes hybrides [10] généralement développées pour l'analyse de structures complexes, malgré leurs avantages d'avoir un champ d'application plus vaste, elles présentent cependant l'inconvénient de donner des résultats dont la précision est souvent tributaire de la capacité des ordinateurs utilisés, et par conséquent, le temps de calcul est excessivement long.

La méthode de raccordement modal [11, 12] est l'une des techniques les plus utilisées pour la résolution des problèmes de discontinuités dans les guides d'ondes. Cette technique convient bien aux structures dont la géométrie peut être identifiée à une jonction de deux ou plusieurs régions où chacune appartienne à un système de coordonnées séparées. Il s'agit alors d'exprimer le champ total dans chaque région en termes d'un système complet des modes du guide dont les amplitudes sont choisies de façon que les conditions aux limites au niveau de la discontinuité soient satisfaites.

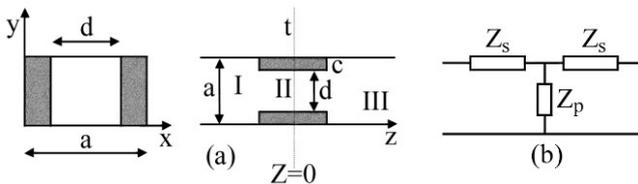
Dans cet article, cette méthode est utilisée pour la caractérisation rigoureuse d'iris métalliques épais en guides d'ondes rectangulaires. Ces discontinuités constituent les éléments de base importants dans la réalisation de filtres plan-E multicellulaires micro-ondes d'où la nécessité d'exiger, pour les fréquences élevées, une grande précision dans leur modélisation. De tels filtres sont très utilisés dans les multiplexeurs (répéteurs) embarqués à bord des satellites de télécommunications. Dans cette étude, nous tenons compte de l'épaisseur des iris dont l'influence est non négligeable sur la détermination des caractéristiques du filtre. La convergence des résultats est atteinte avec un nombre de modes relativement restreint d'où un temps de calcul raisonnable.

## THEORIE

Soit le filtre à obstacles métalliques représenté sur la figure 1 dont l'élément de base est l'iris inductif symétrique d'épaisseur  $t$  et d'ouverture  $d$  (Fig. 2). Cet obstacle est placé dans le plan E d'un guide d'onde rectangulaire de section droite  $a \times b$ .



**Figure 1:** Filtre à iris inductifs épais symétriques.



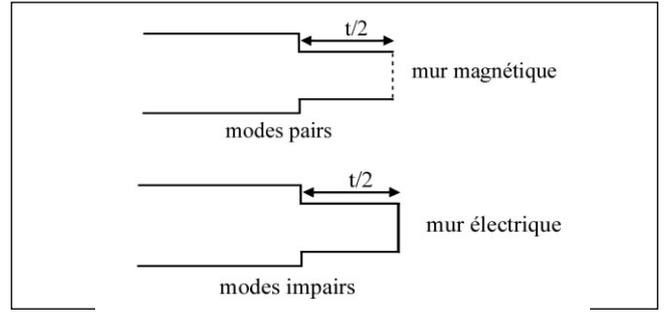
**Figure 2:** Iris inductif symétrique (a) et son schéma équivalent électrique (b).

La structure de la figure 2 est symétrique par rapport au plan  $Z=0$  et peut être modélisée par un schéma équivalent électrique en T [12]. A cause de la symétrie du problème, nous n'étudierons que la moitié gauche de la structure (discontinuité plan - H). Le principe de la caractérisation est basé sur l'utilisation des excitations en modes pairs et impairs (Fig.3) qui nous permettent de déterminer les paramètres impédances de l'iris.

La matrice de répartition [S] de l'iris est ensuite aisément déduite des paramètres impédances par utilisation de la relation de passage suivante:

$$[S] = ([z] - [I]) ([z] + [I])^{-1}$$

où [I] est la matrice identité et [z] représente la matrice impédance normalisée de l'iris.



**Figure 3:** Structure équivalente aux modes pairs et impairs.

Pour une excitation en modes pairs, le champ électromagnétique transverse dans la région I ( $Z \leq -\frac{t}{2}$ ) est exprimé en termes de modes d'ordre supérieur  $TE_{n0}$  par les équations suivantes [12]:

$$E_y^I = \varphi_1(x) e^{-\beta_1^I(Z+t/2)} + \sum_{i=1}^{\infty} R_i^e \varphi_n(x) e^{\beta_n^I(Z+t/2)} \quad (1)$$

$$H_x^I = -Y_1^I \varphi_1(x) e^{-\beta_1^I(Z+t/2)} + \sum_{i=1}^{\infty} Y_n^I R_i^e \varphi_n(x) e^{\beta_n^I(Z+t/2)}$$

Dans la région II ( $-\frac{t}{2} \leq Z \leq 0$ ), nous aurons:

$$E_y^{II} = \sum_{j=1}^{\infty} T_j^e \psi_m(x) \cosh(\beta_m^{II} Z) \quad (2)$$

$$H_x^{II} = \sum_{j=1}^{\infty} Y_m^{II} T_j^e \psi_m(x) \sinh(\beta_m^{II} Z)$$

$$n = 2i-1 \text{ et } m = 2j-1,$$

$$\varphi_n(x) = \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \quad \text{et} \quad \psi_m(x) = \sin\left(m\pi \frac{x-c}{d}\right).$$

$\beta_n^{I,II}$  et  $Y_n^{I,II}$  sont respectivement la constante de propagation guidée et l'admittance caractéristique du mode  $TE_{n0}$  dans les régions I et II.  $R_i^e$  et  $T_j^e$  expriment les amplitudes des modes réfléchis et transmis pour une excitation en modes pairs.

La condition de continuité pour le champ électromagnétique transverse au niveau de la discontinuité ( $Z=-t/2$ ) est exprimée par les relations suivantes:

$$E_y^I\left(x, -\frac{t}{2}\right) = \begin{cases} E_y^{II}\left(x, -\frac{t}{2}\right) & , c \leq x \leq d+c \\ 1 & , \text{ailleurs} \end{cases} \quad (3)$$

$$H_x^I\left(x, -\frac{t}{2}\right) = H_x^{II}\left(x, -\frac{t}{2}\right) \quad c \leq x \leq c+d \quad (4)$$

En tenant compte des conditions d'orthogonalité des modes au niveau de la discontinuité et après quelques manipulations algébriques, nous obtenons un système d'équations de la forme  $[Q].[R^e]=[P]$  où les éléments de la matrice Q et du vecteur P sont données par les expressions suivantes:

$$Q_{ji} = \sum_{k=1,3,..}^N \frac{2Z_k^{II} I_{km} I_{kn}}{dZ_n^I} \coth(\beta_k^{II} t/2) + \frac{a}{2} \delta_{mn}$$

$$P_j = \sum_{k=1,3,..}^N \frac{2Z_k^{II} I_{km} I_{k1}}{dZ_1^I} \coth(\beta_k^{II} t/2) - \frac{a}{2} \delta_{m1}$$

où:  $I_{km} = \int_c^{c+d} \sin\left(k\pi \frac{x-c}{d}\right) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) dx$

$\delta_{mn}$  est le symbole de Kronecker et  $Z_n^{I,II}$  est l'impédance caractéristique du mode TE<sub>n0</sub> dans les régions I et II.

La résolution du système précédent, par utilisation de la méthode de Jordan, nous permet de déterminer les coefficients de réflexion et de transmission en fonction de la fréquence.

Pour l'excitation en modes asymétriques, la procédure décrite précédemment étant reconduite, nous obtenons également un système d'équations linéaires que nous résoudrons de manière similaire.

### RESULTATS NUMERIQUES

Dans le tableau 1 sont consignées les impédances normalisées série  $z_s$  et shunt  $z_p$  du schéma équivalent électrique en T de l'iris pour différentes valeurs de l'épaisseur normalisée  $t/a$  (la longueur d'onde est égale à  $1.4a$  et l'ouverture normalisée  $d/a$  de l'iris est fixée à 0.4813). Dans cette étude, l'influence de l'épaisseur de l'obstacle métallique sur la détermination des éléments du schéma équivalent est prise en considération. En effet, pour les iris dont les épaisseurs sont négligeables devant la longueur d'onde, nous retrouvons l'hypothèse d'iris mince formulée dans la littérature où l'obstacle est modélisé par une impédance shunt [1]. Le test de convergence effectué (Tab.1) montre clairement que pour des épaisseurs d'iris de plus en plus petites le nombre de modes à considérer doit être plus important. Dans les cas pratiques qui sont particulièrement intéressants dans la réalisation de filtres micro-ondes ( $0.01 < t/a < 0.5$ ), la convergence est assurée en prenant une vingtaine d'harmoniques de part et d'autre de la jonction.

Sur la figure 4 sont représentées, en fonction de l'épaisseur relative  $t/a$  et pour trois valeurs de la longueur d'onde, les variations des réactances normalisées  $x_s$  (série) et  $x_p$  (shunt) du schéma équivalent électrique en T d'un iris symétrique.

Sur la figure 5 nous étudions une double discontinuité en guide d'onde rectangulaire dont les deux plans de jonction sont supposés suffisamment éloignés. L'iris, d'épaisseur  $t$  égale à 79.8 mm, est inséré dans un guide WR284 ( $a = 72.14$  mm et  $b = 34.04$  mm). Pour cela nous avons tracé les variations du module et de la phase des coefficients de réflexion et de transmission en fonction de la fréquence. Nos résultats sont comparés à ceux obtenus par De Smedt et al. [13] et l'accord est satisfaisant.

Comme application pratique des obstacles métalliques, nous présentons la réponse obtenue pour un filtre multi-

N (nombre de modes)	20		40		60	
	$z_s$	$z_p$	$z_s$	$z_p$	$z_s$	$z_p$
10	j0.32278	j0.00000	j0.32197	j0.00000	j0.32174	j0.00000
1	j0.31922	j0.00356	j0.31843	j0.00355	j0.31820	j0.00355
10 <sup>-1</sup>	j0.10634	j0.26574	j0.10615	j0.26460	j0.10609	j0.26429
10 <sup>-2</sup>	j0.01249	j0.46141	j0.01249	j0.45597	j0.01249	j0.45473
10 <sup>-3</sup>	j0.00127	j0.52391	j0.00127	j0.50467	j0.00127	j0.49957
10 <sup>-4</sup>	j0.00012	j0.56545	j0.00012	j0.52554	j0.00012	j0.51518
10 <sup>-5</sup>	j0.00001	j0.60351	j0.00001	j0.53954	j0.00001	j0.52784

Tableau 1: Impédances normalisées du schéma équivalent en T.

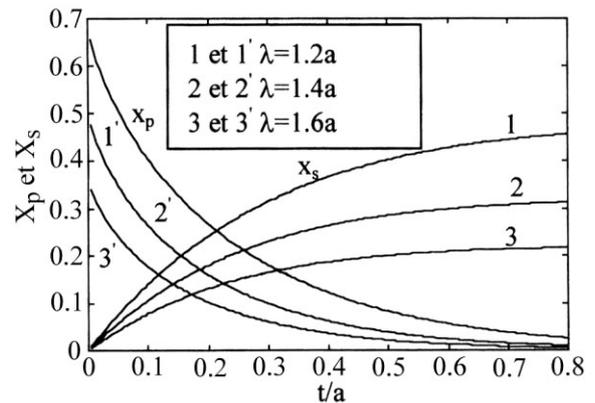


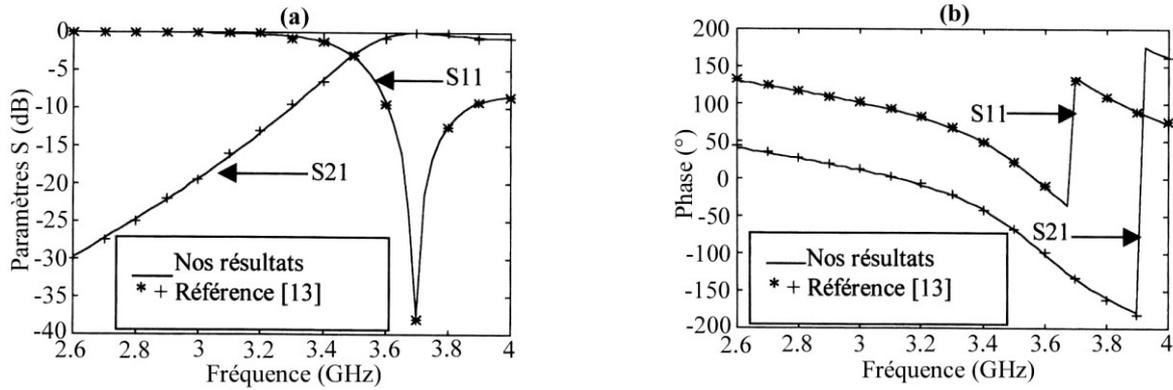
Figure 4: Réactances normalisées du schéma équivalent en T d'un iris selfique symétrique en fonction de l'épaisseur normalisée ( $d/a = 0.4813$ ).

cellulaire à cavités rectangulaires couplées par des iris inductifs épais (Fig. 6). Ce filtre est constitué de trois résonateurs rectangulaires, soit quatre iris symétriques insérés dans un guide WR75 ( $a = 19.05$  mm et  $b = 9.525$  mm). La fréquence centrale de ce filtre est égale à 11 GHz et sa bande passante est très étroite. Nos résultats sont en excellent accord avec ceux donnés par la méthode variationnelle multimodale [14].

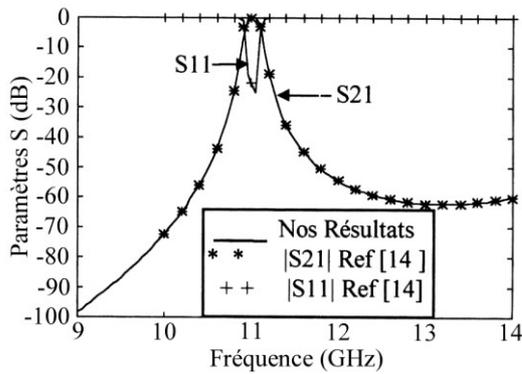
Une étude de convergence (Fig. 7), présentée pour différentes fréquences de la bande utile du guide, montre que l'utilisation de 20 harmoniques est suffisante pour une détermination correcte de la réponse de ce filtre.

### CONCLUSION

L'analyse modale a été appliquée pour l'étude et la conception de filtres multicellulaires rectangulaires dont les éléments de base sont des iris inductifs symétriques. La méthode utilisée est basée sur une formulation générale, applicable sans aucune condition restrictive, notamment pour les épaisseurs des iris. Dans la plupart des cas étudiés, nos résultats théoriques sont en très bon accord avec ceux de la littérature.



**Figure 5:** Variations du module (a) et de la phase (b) des paramètres  $S$  en fonction de la fréquence pour une structure à iris inductif symétrique.

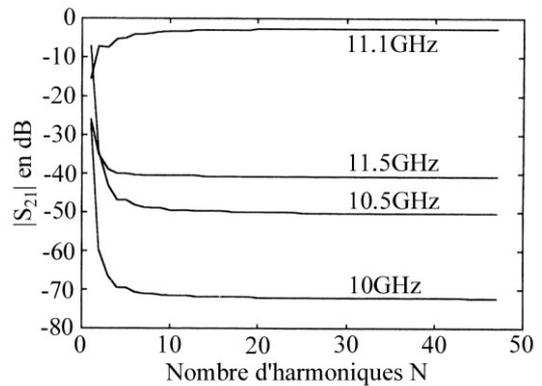


Numéro	1	2	3	4
$d_i$ (mm)	9.169	5.507	5.507	9.169
$t_i$ (mm)	2	2	2	2
$L_i$ (mm)	16.924	18.346	16.924	

**Figure 6:** Variations du module des paramètres  $S$  en fonction de la fréquence pour un filtre à trois cavités.

**REFERENCES**

[1]- Marcuvitz N., "Waveguide handbook", New York, Mc Graw-Hill (1951).  
 [2]- Ise K., Inoue K. and Koshiba M., "Three-dimensional finite-element method with edge elements electromagnetic waveguide discontinuities", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-39, n°8, Aug. (1991), pp.1289-1295.  
 [3]- Weisshaar A., Mongiardo M. and Tripathi V.K., "CAD-Oriented equivalent circuit modeling of step discontinuities in rectangular waveguides", *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol.6, n°4, Apr. (1996), pp. 171-173.  
 [4]- MacPhie R.H. and Wu K.L., "A full-wave modal analysis of arbitrarily shaped waveguide discontinuities using the finite plane-wave series expansion", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-47, n°2, Feb. (1999), pp. 232-237.  
 [5]- Valero A. and Fernando M., "Full-wave equivalent network representation for multiple arbitrarily shaped posts in H-plane waveguide", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-47, n°10, Oct. (1999), pp. 1997-2002.  
 [6]- Guillot Ph., Baudrand H. et Sabatier C., "Application des discontinuités uniaxiales en guides métalliques à la conception et à l'optimisation de transitions utilisées dans le



**Figure 7:** Convergence du coefficient de transmission  $|S_{21}|$  du filtre en fonction du nombre de modes.

domaine des antennes", *Journées Internationales de Nice sur les antennes JINA*, Nice, Nov. (1994), pp. 8-10.  
 [7]- Koshiba M. and Suziki M., "Finite-element analysis of H-plane waveguide junction with arbitrarily shaped ferrite post", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-34, n°6, June (1986), pp. 103-109.  
 [8]- Webb J.P. and Porihar S., "Finite-element analysis of H-plane rectangular waveguide problems", *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 133, pt. H, n°2, Apr. (1986), pp. 91-94.  
 [9]- Koshiba M. and Suziki M., "Application of boundary-element method to waveguide discontinuities", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-34, n°2, Feb. (1986), pp. 301-307.  
 [10]- Wug K.L., Delisle G.Y., Fang D.G. and Lecours M., "Waveguide discontinuities analysis with a coupled finite boundary-element method", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-37, n°6, June (1989), pp. 993-998.  
 [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]- Collin R.E., "Field theory of guided waves", Mc Graw Hill, New York, (1960).  
 [13]- De Smedt R. and Denturk B., "Scattering matrix of junction between rectangular waveguides", *IEEE Proceedings-H*, vol.130, n°2, Mar. (1983), pp.183-190.  
 [14]- Guillot P., "Contribution à l'étude des discontinuités en guides métalliques. Application aux transitions et aux filtres", Thèse de Doctorat INPT (1994), Toulouse, France. □