



**HAL**  
open science

## Filtre à stubs compact en technologie LTCC High K en bande L

Ruben R Guerrero, Benjamin Potelon, Eric Rius, Ludovic Carpentier, Lidwine Raynauld, Jean-Claude Azzara

► **To cite this version:**

Ruben R Guerrero, Benjamin Potelon, Eric Rius, Ludovic Carpentier, Lidwine Raynauld, et al.. Filtre à stubs compact en technologie LTCC High K en bande L. XXèmes Journées Nationales Microondes (JNM 2017), May 2017, Saint-Malo, France. hal-01701571

**HAL Id: hal-01701571**

**<https://hal.science/hal-01701571>**

Submitted on 5 Feb 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Filtre à stubs compact en technologie LTCC High K en bande L

Ruben Guerrero<sup>1,2</sup>, Benjamin Potelon<sup>1,2</sup>, Eric Rius<sup>1,2</sup>, Ludovic Carpentier<sup>3</sup>, Lidwine Raynauld<sup>4</sup>, Jean-Claude Azzara<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>Univ. Bretagne Occidentale, Lab-STICC, 6 avenue Le Gorgeu, CS 93837, 29238 Brest Cedex 3

<sup>2</sup>Lab-STICC UMR CNRS 3192, CS 93837 – 29238 Brest Cedex

<sup>3</sup>Cnes, 18 avenue Edouard Belin, 31 401 Toulouse CEDEX 9

<sup>4</sup>Thales Alenia Space France, 26 avenue J.F. Champollion, BP33787, 31037 Toulouse  
rguerrero@univ-brest.fr

### Résumé

Cet article traite de la conception de filtres à stubs à court-circuit en bande L réalisés en technologie LTCC sur des substrats à haute permittivité. La souplesse de cette technologie est exploitée dans le processus de conception afin de réduire significativement les dimensions de la structure tout en gardant des performances électriques acceptables. Ainsi, l'utilisation d'une technique de repliement particulière associée à l'exploitation des degrés de liberté proposés par les topologies de filtres à stubs permet de synthétiser des filtres d'ordre élevé tout en gardant un encombrement réduit. A titre d'exemple, nous présentons le cas particulier de la synthèse et du réglage électromagnétique d'un filtre d'ordre 6. La solution proposée est destinée à répondre aux spécifications exigeantes du domaine spatial.

### 1. Introduction

Actuellement d'importants besoins se font sentir en termes de solutions de filtrage compactes et performantes pour répondre aux exigences dictées par les spécifications des futurs systèmes de télécommunications, notamment par satellite. Dans ce contexte, la technologie LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic) offre d'excellentes perspectives grâce à la mise en jeu de matériaux à faibles niveaux de pertes couplé à une bonne maîtrise de fabrication [1]. Ces avantages sont conservés avec l'utilisation d'un substrat à haute permittivité, lequel apporte une réduction de taille supplémentaire.

La combinaison de ces deux techniques est ici mise en œuvre pour le cas d'un filtre planaire en technologie triplaqué afin de répondre à une spécification en bande L avec une BPR (Bande Passante Relative) d'environ 16%. Cette largeur de bande passante relative assez faible pour un filtre planaire nous orienterait naturellement vers des topologies de type lignes couplées mais l'utilisation de substrats à forte permittivité écarte les topologies à couplages de proximité car ils seraient irréalisables technologiquement. Nous nous sommes donc tournés vers des structures à base de stubs et notamment vers les filtres à stubs en court-circuit. Compte-tenu de la bande passante visée, la synthèse conduit à un circuit présentant

un fort contraste entre les impédances caractéristiques des stubs et celles des inverseurs d'admittance [2]. Pour remédier à cette situation, nous proposons de tirer parti de deux atouts : d'une part le degré de liberté offert par la synthèse des filtres à stubs et d'autre part la souplesse d'agencement offerte par la technologie LTCC. Ensuite, une synthèse de filtrage est formulée, en tenant compte des conditions particulières présentées par la technologie adoptée, visant à réaliser une structure compacte avec des performances électriques supérieures.

A titre d'exemple, un filtre à stubs d'ordre 6 en bande L, conçu sur un substrat Heraeus Heratape ®CT765, avec  $\epsilon_r = 68,7$ , est présenté.

### 2. Synthèse d'un filtre à stubs en court-circuit en technologie LTCC High K.

#### 2.a. Technologie LTCC.

La technologie LTCC consiste en l'empilement de plusieurs couches de substrat, ou chacune d'elles a été métallisée de façon séparée par un procédé standard. Les couches de substrat sont percées, sérigraphiées et coupées séparément. Ensuite, elles sont empilées, laminées et co-cuites à des températures voisines de 900 °C, pour obtenir finalement une structure homogène [3]. La Figure 1 décrit le processus de fabrication d'un circuit LTCC.

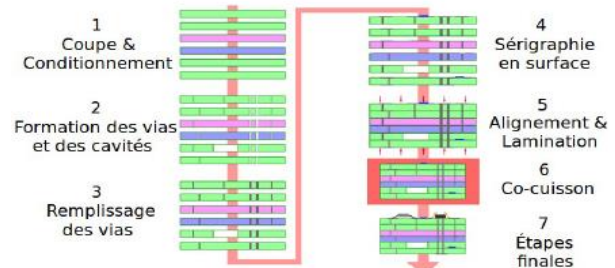
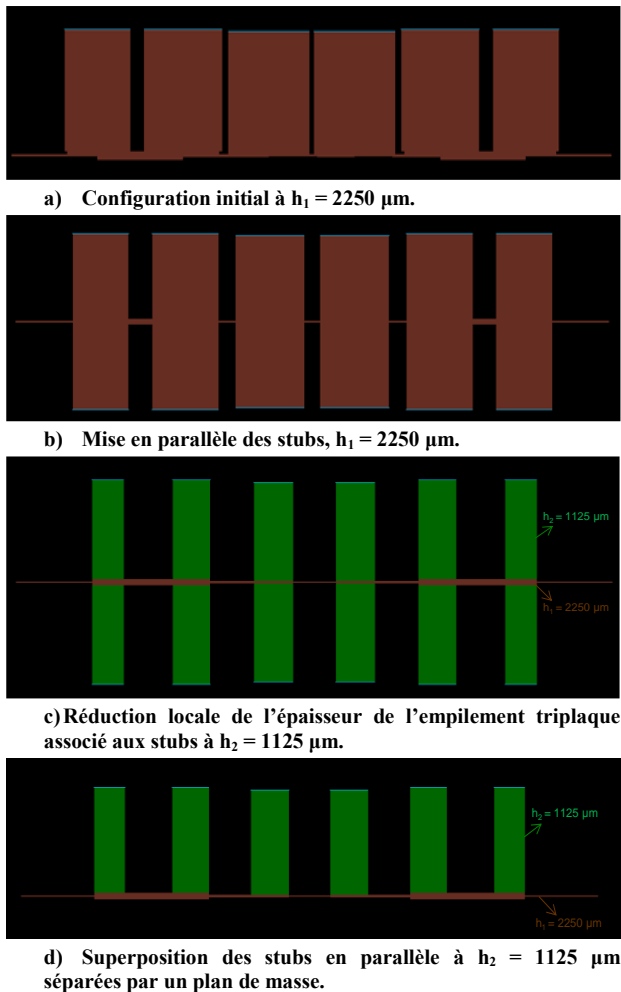


Figure 1. Processus de fabrication d'un circuit en technologie LTCC [4]

Un filtre à stubs à bande étroite opérant dans une configuration stripline est construit sur la base de la technologie LTCC. On tire profit de l'aspect multicouche pour proposer une nouvelle approche de conception, formalisée par une synthèse de filtre. Elle permet de diminuer le contraste d'impédance entre les éléments du



**Figure 2. Evolution du masque du filtre à stubs triplaque à travers des différentes configurations des stubs.**

filtre, du aux conditions de bande étroite, et de réduire significativement son empreinte.

Un substrat à haute permittivité compatible avec le procédé LTCC a été utilisé. Il s'agit de l'Heraeus Heratape ©CT765, fabriqué par Heraeus (Allemagne). Sa permittivité relative est  $\epsilon_r = 68,7$  à 2,5 GHz et sa tangente de perte est  $\tan\delta = 1,73.10^{-3}$ . Par rapport à une topologie microruban équivalente réalisée sur un substrat d'alumine classique avec  $\epsilon_r = 9,9$ , une telle haute permittivité permet de diviser la longueur physique de la structure par un facteur d'environ 68%, ce qui conduit à une réduction d'encombrement significative.

Le substrat est produit en couches de  $150 \mu\text{m}$  ( $112,5 \mu\text{m}$  après cuisson). Via Electronics® a été la fonderie retenue, afin d'obtenir une précision de classe industrielle pour la fabrication de prototypes. Des vias décalés interconnectés par des pistes métalliques sont employés dans le circuit, car l'utilisation de vias empilés peut provoquer des surépaisseurs sur la surface du circuit. Leur hauteur correspond à une couche de substrat. D'autres règles imposées par la fonderie sont : le diamètre minimal des vias de  $\phi = 160 \mu\text{m}$ , l'écart minimal entre les vias de  $2.5\phi$  et une largeur minimale des lignes de  $80 \mu\text{m}$ .

## 2.b. Développement de la synthèse du filtre

Un filtre passe bande à stubs en court-circuit est proposé. Il intègre des stubs court-circuités en parallèle et des lignes inverseurs d'admittance, tous avec une longueur de  $lg_0/4$ . Sa procédure de synthèse est décrite en [5]. Si ce filtre est destiné à répondre à un gabarit à bande étroite (FBW <20%), la synthèse implique d'importants contrastes sur les impédances caractéristiques entre les inverseurs et les stubs, ce qui rend difficile le processus de fabrication [2].

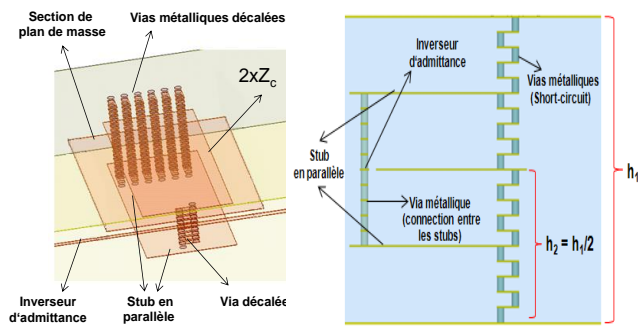
Afin d'implémenter le filtre à stubs sur la technologie LTCC considérée, nous avons choisi des lignes de transmission de type triplaque. Afin d'obtenir le meilleur facteur de qualité, nous travaillons sur une épaisseur de  $h_1 = 2250 \mu\text{m}$ .

Soulignons que les dimensions minimales réalisables sur cette technologie triplaque sont de  $80 \mu\text{m}$ , et afin de conserver des rapports de forme acceptables, il n'est pas raisonnable d'avoir une largeur supérieure à  $3000 \mu\text{m}$ . Ainsi, les impédances caractéristiques réalisables sur cet empilement triplaque sont alors comprises entre 6.32 Ohms ( $w = 80 \mu\text{m}$ ) et 29.42 Ohms ( $w = 3000 \mu\text{m}$ ).

La synthèse d'un filtre à stub possède un degré de liberté noté  $b$  qui permet d'ajuster, de façon globale sur l'ensemble du filtre, les niveaux d'impédances caractéristiques non seulement des stubs mais également des inverseurs [5]. Cependant, malgré ce degré de liberté, la synthèse d'un filtre à stub d'ordre 6 présentant une bande passante relative de 16% implique d'importants contrastes sur les impédances caractéristiques entre les inverseurs et les stubs. Ainsi, les valeurs issues de la synthèse correspondant aux éléments sont respectivement situées autour de 2.71 Ohms ( $Z_c$  minimal liée aux stubs) et 29.42 Ohms ( $Z_c$  maximal liée aux inverseurs). Ceci est situé en dehors de la gamme des impédances caractéristiques réalisables. La figure 2a illustre le problème décrit.

Afin de résoudre cet inconvénient, une première solution consiste à remplacer chacun des stubs par deux stubs en parallèle (voir Figure 2b), chacun présentant alors une impédance caractéristique égale à  $2xZ_c$ . Cette solution permet d'augmenter les valeurs des impédances caractéristiques à réaliser. Cependant, celles-ci restent toutefois hors de portée de la technologie considérée et d'autre part cela augmente significativement l'encombrement.

Aussi, pour pallier ces problèmes, nous proposons, au niveau des stubs, et uniquement au niveau de ceux-ci, de réduire l'épaisseur de l'empilement triplaque considéré à  $h_2 = 1125 \mu\text{m}$ , c'est à dire, à la moitié de l'épaisseur totale de l'empilement triplaque  $h_1$ . La Figure 2c montre la masque du filtre, dans laquelle l'épaisseur associée des stubs et des inverseurs est de  $h_2 = 1125 \mu\text{m}$  et  $h_1 = 2250 \mu\text{m}$  respectivement. Cette modification locale de l'épaisseur du triplaque présente deux avantages, d'une part cela permet de déplacer la plage d'impédances caractéristiques réalisables vers les valeurs basses (la limite pour cette épaisseur d'empilement est maintenant située autour de 3.59 Ohms, contre 6.32 Ohms précédemment), et donc de rendre possible l'obtention



**Figure 3. Vues en 3D et en coupe d'un stub en parallèle avec l'introduction d'une section métallique de plan de masse.**

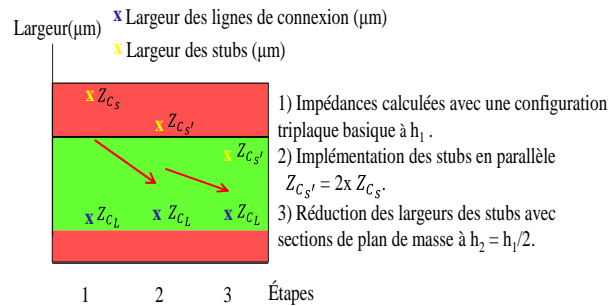
d'impédances caractéristiques de l'ordre de 5.42 Ohms, correspondant au double de l'impédance caractéristique minimale associée à la mise en parallèle des stubs. D'autre part, cela permet de superposer les deux empilements triplaques l'un au-dessus de l'autre et ainsi récupérer l'encombrement perdu par la mise en parallèle des deux stubs, tel qu'on voit sur la figure 2d. En résumé, la mise en œuvre des différentes étapes précédemment décrites, permet d'améliorer le rapport de forme entre les éléments du filtre ainsi que d'obtenir un filtre réalisable technologiquement et très compact.

La Figure 3 montre une vue en coupe et en 3D de la structure d'un stub en parallèle proposée. Dans la vue en coupe le via métallique située à gauche est utilisé pour réaliser la connexion entre les lignes qui composent le stub en parallèle, tandis que les vias métalliques situés à droite sont employés pour réaliser la connexion entre le stub et les plans de masse supérieure et inférieure. D'autre part, la section de plan de masse métallique est employée pour effectuer la réduction de l'épaisseur du substrat triplaque associé aux stubs à une largeur de  $h_2$ .

Pour illustrer la démarche exposée, la Figure 4 montre un schéma avec les étapes décrites. Cette figure présente en abscisses les différentes étapes et en ordonnées les largeurs des lignes de transmission nécessaires pour obtenir les impédances caractéristiques issues de la synthèse.

Technologiquement, il est impossible de réaliser des lignes dont la largeur est inférieure à 80  $\mu\text{m}$  (zone rouge inférieure) et topologiquement, il n'est pas raisonnable d'avoir une largeur supérieure à 3000  $\mu\text{m}$  (zone rouge supérieure), ce qui entrainerait alors des rapports de forme non conforme et engendrerait des discontinuités trop importantes.

Étant donné une épaisseur de  $h_1 = 2250 \mu\text{m}$ , la plage d'impédances réalisables est comprise entre 6,32 Ohms  $< Z_{\text{réalisable}} < 29,42$  Ohms pour une configuration triplaque classique, en prenant compte des limites des largeurs mentionnées. Au départ, on choisit un facteur d'échelle approprié, en adoptant la réduction de la largeur des stubs comme critère de conception et en s'assurant que la largeur des inverseurs se trouve dans la zone verte. Dans la première étape, la largeur des stubs se situe dans la zone rouge pour une configuration triplaque à  $h_1 = 2250 \mu\text{m}$  (voir Figure 2a). Ensuite, l'impédance des stubs est dupliquée au moyen de sa mise en parallèle, donc donc  $Z_{C_s'} = 2xZ_{C_s}$ , réduisant ainsi sa largeur (voir Figure



**Figure 4. Synthèse des étapes exécutées pour réduire le contraste de l'impédance des éléments du filtre.**

2b). Enfin, les stubs en parallèle sont repliés dans deux piles de substrat superposées et son épaisseur de substrat triplaque associée est réduite à  $h_2 = 1125 \mu\text{m}$ , ce qui conduit à une réduction de largeur supplémentaire (voir Figure 2c et 2d). Dans la dernière étape, la largeur des stubs se trouve dans la zone verte, respectant ainsi la plage des dimensions réalisables. Tel qu'on le voit sur la Figure 4, la largeur des inverseurs reste inchangée au cours de la procédure. L'application de cette technique permet de déplacer vers le bas la plage globale d'impédances caractéristiques réalisables, en obtenant alors une plage comprise entre 3,59 Ohms  $< Z_{\text{réalisable}} < 29,42$  Ohm, utilisant les deux hauteurs  $h_1$  et  $h_2$ .

Ensuite, la conception d'une ligne d'accès compatible avec la technologie triplaque doit être effectuée. À ce stade, deux limitations apparaissent. Tout d'abord, ce n'est pas possible de réaliser des lignes de transmission de 50 ohms en raison de la restriction de largeur minimale imposé à 80  $\mu\text{m}$  par la technologie et la permittivité élevée du substrat. En deuxième instance, il existe un problème d'adaptation au niveau de l'accès du filtre, lequel doit présenter une impédance caractéristique de 50 ohms afin d'assurer la compatibilité du filtre avec d'autres dispositifs RF en cascade. Pour surmonter ces inconvénients, un transformateur quart d'onde de 80  $\mu\text{m}$  de largeur, avec  $Z_c = 29.42$  Ohms (l'impédance réalisable la plus haute), relié avec un port localisé d'impédance de 50 ohms, a été conçu pour l'accès. La condition à respecter est que la connexion doit être faite ponctuellement et précisément à l'extrémité de cette ligne. Ainsi, l'impédance de la ligne terminale du filtre à stubs, employée pour satisfaire la synthèse du filtre, peut être déterminée avec l'équation :

$$Z_{in} = \frac{Z_0^2}{Z_L} \quad (1)$$

valide pour un transformateur quart d'onde. Donc,  $Z_{in} = 17,314$  Ohms, ce qui donne  $Y_{in} = 0,0577$  Siemens. Finalement les transformateurs quart d'onde avec  $Z_c = 29,42$  Ohms sont introduites aux extrémités du circuit total pour atteindre l'impédance du terminal requise. Un filtre à stubs triplaque d'ordre 6 en bande L avec une bande passante de 16% est conçu ci-après pour valider la synthèse décrite.

### 2.c. Application de la technique décrite.

Le tableau 1 présente les valeurs calculées de  $b$  et les plages d'impédance des éléments du filtre, à partir de la synthèse avec la valeur de  $Y_{in}$  calculée précédemment. Pour cela, on a pris en compte les limites d'impédances

Hauteur du substrat	Limites d'impédances réalisables	Paramètre $b$	Plages d'impédance des éléments du filtre pour le paramètre $b$ spécifié
$h_1 = 2250 \mu\text{m}$	$Z_{\min} = 6,32 \text{ ohms}$	0,5198	3,16 ohms ( <b>6,32 ohms</b> pour les stubs) $< Z_c < 34,325 \text{ Ohms}$
	$Z_{\max} = 29,42 \text{ ohms}$	0,6064	2,71 ohms (5,42 ohms pour les stubs) $< Z_c < \mathbf{29,423 \text{ Ohms}}$
$h_2 = 1125 \mu\text{m}$	$Z_{\max} = 24,4 \text{ ohms}$	0,7312	2,24 ohms (4,497 ohms pour les stubs) $< Z_c < \mathbf{24,4 \text{ Ohms}}$
	$Z_{\min} = 3,59 \text{ ohms}$	0,9146	1,79 ohms ( <b>3,59 ohms</b> pour les stubs) $< Z_c < 19,5 \text{ Ohms}$

**Table 1. Valeurs du facteur d'échelle  $b$  et plages d'impédance associés.**

$i$	$Z_i$ [Ohms]	$W_i$ [ $\mu\text{m}$ ] à $h_1 = 1125 \mu\text{m}$	$Z_{i+1}$ [Ohms]	$W_{i+1}$ [ $\mu\text{m}$ ] à $h_2 = 2250 \mu\text{m}$
1	6,36	1473	20,74	305
2	5,59	1743	27,69	106
3	5,42	1816	29,42	80
4	5,42	1816	27,69	106
5	5,59	1743	20,74	305
6	6,36	1473		

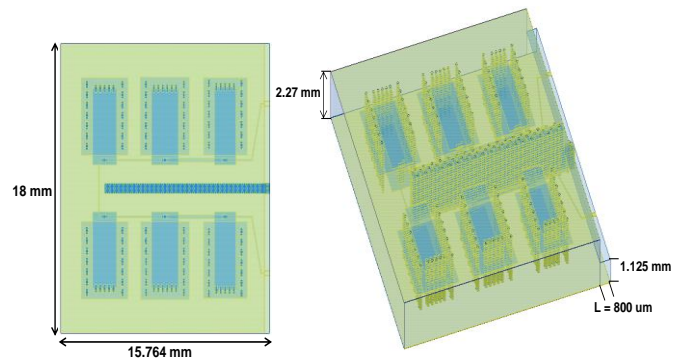
**Table 2. Impédances caractéristiques des éléments du filtre et ses dimensions pour  $b = 0,6064$ .**

réalisables pour  $h_1$  et  $h_2$ , dont ses valeurs sont présentées dans le tableau. En outre, les impédances des stubs correspondent à deux fois la valeur issue de la synthèse ( $2xZ_i$ ), car ils ont été mis en parallèle. Selon le tableau, le paramètre  $b$  doit être compris entre 0,6064 et 0,9146, de sorte que les plages d'impédance associées soient comprises dans la plage d'impédance globale réalisable. Dans cet intervalle, la valeur choisie est  $b = 0,6064$ , conduisant ainsi à une plage d'impédance avec la limite supérieure la plus élevée, visant à réduire la largeur des stubs (voir le tableau 1). Par conséquent, la plage d'impédance associée aux éléments du filtre pour cette valeur de  $b$  est de  $5,42 \text{ ohms} < Z_c < 29,42 \text{ ohms}$ . Le tableau 2 enregistre leurs dimensions. Les valeurs  $Z_i$  et  $Z_{i+1}$  correspondent aux impédances des stubs en parallèle et des inverseurs d'admittance respectivement.

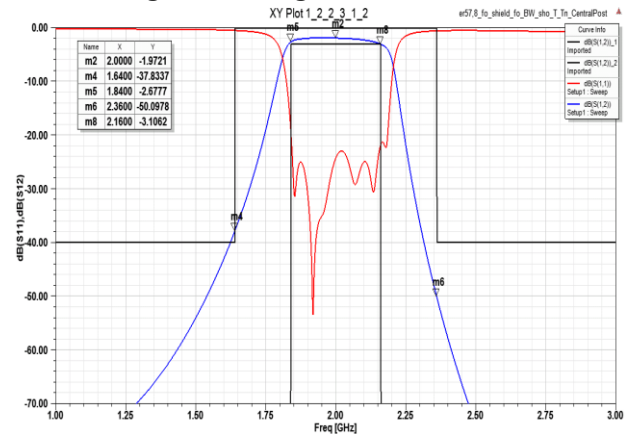
### 3. Filtre à stubs et résultats de simulations

#### 3.a. Implémentation physique et résultats de simulation.

Le filtre à stubs triplaque en technologie LTCC High K est construit et simulé avec le logiciel HFSS. La Figure 4 présente le masque du filtre. Des vias décalés sont utilisés pour réaliser les courts-circuits situés à l'extrémité des stubs, le blindage entre les stubs en parallèle et le mur d'isolation central. Un pliage planaire de la structure a été réalisé, afin d'obtenir une topologie symétrique et une réduction d'encombrement supplémentaire. La ligne d'accès quart d'onde est intégrée par une section triplaque et microruban, destinée à permettre la caractérisation du circuit avec des ports de mesure de 50 Ohms. La figure 5 montre le résultat de simulation. Les pertes d'insertion et la platitude sont de 1.98 dB et 1.14 dB respectivement. De plus, le niveau de rejection est de 50,23 dB et 37,73 dB dans chaque côté de la bande passante. L'asymétrie de la rejection est due à la compacité du filtre, ce qui favorise l'apparition de couplages parasites entre des résonateurs non adjacents.



**Figure 4. Filtre à stubs multicouche d'ordre 6 en technologie LTCC High K.**



**Figure 6. Résultat de simulation électromagnétique.**

## 4. Conclusion

Ce papier présente une structure conçue sur une technologie LTCC high K. Elle tire parti de la flexibilité offerte par cette technologie pour obtenir une structure réalisable et une réduction d'encombrement substantielle par rapport à un équivalent planaire classique. A l'heure actuelle, compte tenu de difficultés de réalisation rencontrées par le fondeur, en partie dues au matériau, les mesures du filtres ne sont pas disponibles.

## 5. Bibliographie

- [1] Garreau, J *et al.*, «Ultra-compact X-band SIW filter in LTCC technology using high permittivity substrate for a space application» 2012 IEEE MTT-S International, pp.1-3, June 2012.
- [2] J.-S. Hong, « Microstrip Filters for RF/Microwave Applications », 2<sup>nd</sup> Edition. New York: J. Wiley & Sons, 2011.
- [3] Decrossas, E, *et al.*, «Broad frequency LTCC vertical interconnect transition for multichip modules and system on package applications», *European Microwave Conference (EuMC), 2013*, pp.104-107.
- [4] A, Khalil, «Technologies LTCC et stéréolithographie céramique 3D appliquées à la conception de dispositifs millimétriques et sub-millimétriques ». Thèse doctoral. Université de Limoges, 2010.
- [5] Matthaei G, Young L, Jones E.M.T, « Microwave Filters, Impedance-Matching, and Coupling Structures » Artech House Books, 1980, pag. 427 - 668.