



HAL
open science

Solutions innovantes pour des filtres de fréquences volumiques et semi-volumiques performants, en céramique, silice fondue et thermoplastique COC/COP... : nouvelles alternatives pour les futurs programmes de satellite multimédia

Sarra Abedrrabba

► **To cite this version:**

Sarra Abedrrabba. Solutions innovantes pour des filtres de fréquences volumiques et semi-volumiques performants, en céramique, silice fondue et thermoplastique COC/COP... : nouvelles alternatives pour les futurs programmes de satellite multimédia. Autre. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2017. Français. NNT : 2017BRES0126 . tel-02191858

HAL Id: tel-02191858

<https://theses.hal.science/tel-02191858v1>

Submitted on 23 Jul 2019

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.



université de bretagne
occidentale

UNIVERSITE
BRETAGNE
LOIRE



THÈSE / UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

Mention : Sciences et Technologies de l'Information et de la communication

Spécialité : Télécommunications

École Doctorale Mathématique et Sciences et Technologies
de l'information et de la communication - ED 601

présentée par

Sarra Abedrabba

Préparée au Lab-STICC,

Laboratoire des Sciences et Techniques de l'information, de
la communication, 6 Avenue Le Gorgeu - CS 93837- 29238
Brest Cedex 3

Solutions innovantes pour des filtres de fréquences volumiques et semi-volumiques performants, en céramique, silice fondue et thermoplastique COC /COP... Nouvelles alternatives pour les futurs programmes de satellite multimédia

Thèse soutenue le 11/12/2017 devant le Jury:

Rapporteurs :

Philippe Ferrari, Professeur à l'université Joseph Fourier à Grenoble, IMEP-LAHC - UMR CNRS 5130.

Serges Verdeyme, Professeur à l'université de Limoges, XLIM- UMR 6172.

Directeur de thèse :

Eric Rius, Professeur à l'Université de Bretagne Occidentale, Lab-STICC-UMR CNRS 6285.

Encadrants :

Benjamin Potelon, Maître de Conférences à l'université de Bretagne Occidentale, Lab-STICC-UMR CNRS 6285

Azar Maalouf, Ingénieur de Recherche à l'Université de Bretagne Occidentale, Lab-STICC-UMR CNRS 6285.

Invités :

Hervé Leblond, Ingénieur Responsable Innovation à THALES ALENIA SPACE.

Ludovic Carpentier, Ingénieur électronique hyperfréquence au CNES.

Présidente de Jury :

Emmanuelle Bourdel, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Supérieure de l'Electronique et de ses Applications ENSEA, ETIS- UMR CNRS 8051.

ANR
AGENCE
NATIONALE
DE LA
RECHERCHE

ATOMIQ

ThalesAlenia
Space
A Thales / Finmeccanica Company

cnes

A la mémoire de mon grand-père,

“Une personne qui n’a jamais commis d’erreurs n’a jamais tenté d’innover.”

Albert Einstein

Remerciements

J'adresse mes sincères remerciements à Serges Verdeyme, professeur à l'Université de Limoges et à Philippe Ferrari, professeur à l'Université de Grenoble Alpes, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de rapporter sur mon travail de thèse.

Je remercie également Emanuelle Bourdel, Maître de conférences à L'Ecole Nationale Supérieure d'Electronique et de ses Applications (ENSEA Cergy), d'avoir accepté de participer à mon jury de thèse. Je la remercie également pour l'encadrement qu'elle m'a apporté durant mon cursus en école d'ingénieur. Je profite pour remercier tous mes enseignants de l'ENSEA dont je garde un très bon souvenir et grâce à qui je porte aujourd'hui cet intérêt pour l'électronique.

J'exprime mes plus sincères remerciements et toute ma gratitude aux personnes ayant encadré ce travail :

Je remercie mon directeur de thèse Eric Rius, professeur à l'Université de Bretagne Occidentale, pour sa disponibilité, sa bonne humeur communicative et ses qualités scientifiques. Je le remercie pour ses conseils bienveillants et ses directives qui font que je me sente aujourd'hui capable de défendre ce travail.

Je remercie mon co-encadrant Benjamin Potelon, Maître de conférences à l'UBO, pour ses enseignements précieux, son sens de la répartie et ses innombrables qualités humaines. Je le remercie d'avoir toujours été à l'écoute et d'avoir essayé d'apporter son soutien à chaque étape difficile.

Je remercie mon co-encadrant Azar Maalouf, Ingénieur de recherche au Lab-STICC, grâce à qui j'ai découvert la complexité de la technologie. Je le remercie pour sa patience, ses encouragements, sa sagesse et la pertinence de ses instructions. Je le remercie parce qu'il m'a appris à relativiser et à voir en chaque échec une source de motivation.

Je tiens aussi à remercier Hervé Leblond, responsable innovations à Thales Alenia Space et manager du projet ATOMIQ, pour son implication dans la thèse et pour les différents échanges que nous avons eu. Je le remercie d'avoir su répondre à chacune de mes

interrogations et d'avoir fait en sorte de ne pas privilégier l'avancement du projet à celui de la thèse.

Ce travail n'aurait pu se faire sans la précieuse aide de l'UBO Open Factory. Je remercie son directeur Yves Quéré et ses Fabmanagers Mat, Tomi, Lina, Anne, Alex et toutes l'équipe. Ils ont fait de mes passages au Fablab des moments mémorables.

Je remercie également tous les membres du Lab-STICC pour leur accueil, leur aide et la bonne ambiance qu'ils mettent au sein du laboratoire. Je remercie plus particulièrement Rozenn Allanic avec qui je tiens de forts liens d'amitié, Vincent Laur pour sa générosité, Annaïg Guenou pour sa gentillesse et sa disponibilité, Noham Martin pour son énergie débordante.

Je ne peux achever mes remerciements sans en adresser des particuliers à ces personnes qui pendant ces trois années sont devenus de vrais amis : Younes, Mahdi, Adri, Ruben, Nono, Chris, Momo, Deniz freeze the flees, Vass, Nat, July hermosa, Lolo... et bien évidemment à tous les autres collègues du Lab-STIC.

Enfin et surtout, mes plus grands remerciements vont à mes parents Najoua et Manef, sans qui tout ça n'aurait pas été possible, à ma grand-mère Malika, à mes tuteurs français Thérèse et Jean-Louis et à Tonton Fathi et Tata Beti. Je finis par dédier cette réussite à mon frère Yassin, ma sœur Salma, tous mes oncles, tantes, cousins, cousines et amis.

Table des matières

Introduction générale	16
Chapitre I : Contexte général de l'étude.....	20
<i>I.1. Introduction</i>	<i>21</i>
<i>I.2. Le très Haut débit en France</i>	<i>22</i>
<i>I.2.1 La fracture numérique entre les villes et les zones rurales</i>	<i>22</i>
<i>I.2.2 Les solutions technologiques pour l'internet en zones rurales</i>	<i>23</i>
<i>I.3. Le très haut débit par satellite.....</i>	<i>24</i>
<i>I.3.1 Le satellite Ka-Sat.....</i>	<i>24</i>
<i>I.3.2 La proposition du CNES : le projet THD-Sat.....</i>	<i>24</i>
<i>I.3.3 Les constellations de satellites en orbite basse.....</i>	<i>26</i>
<i>I.4. Architecture d'un satellite de télécommunications</i>	<i>26</i>
<i>I.4.1 La plateforme.....</i>	<i>26</i>
<i>I.4.2 La charge utile.....</i>	<i>27</i>
<i>I.5. Les convertisseurs de fréquence nouvelle génération</i>	<i>28</i>
<i>I.6. Généralités sur le filtrage Tx</i>	<i>29</i>
<i>I.7. Etat de l'art des solutions de filtrage utilisées pour des applications spatiales</i>	<i>31</i>
<i>I.7.1 Filtres planaires</i>	<i>31</i>
<i>I.7.1.1 Les principales technologies planaires</i>	<i>31</i>
<i>I.7.1.2 Les principales topologies planaires.....</i>	<i>36</i>
<i>I.7.1.2.1 Filtres à lignes couplées.....</i>	<i>36</i>
<i>I.7.1.2.2 Filtre « Hairpin »</i>	<i>38</i>
<i>I.7.1.2.3 Filtre DBR «Dual Behavior Resonator».....</i>	<i>38</i>
<i>I.7.2 Filtres volumiques</i>	<i>40</i>
<i>I.7.3 Filtres SIW.....</i>	<i>42</i>
<i>I.8 Les besoins de filtrage identifiés en bandes Q et V.....</i>	<i>46</i>
<i>I.8.1 Facteur de qualité élevé</i>	<i>46</i>
<i>I.8.2 Intégrabilité dans un circuit intégré microonde.....</i>	<i>47</i>
<i>I.8.2.1 Circuits intégrés en technologie hybride.....</i>	<i>47</i>
<i>I.8.2.2 Interconnexions par fils de « bonding ».....</i>	<i>49</i>
<i>I.8.3 Stabilité en fréquence et précision de fabrication</i>	<i>51</i>

<i>I.9 Tests de qualification d'un satellite</i>	52
<i>I.9.1 Tests de vibrations et de chocs mécaniques</i>	52
<i>I.9.2 Analyses thermiques</i>	54
<i>I.9.3 Compatibilité électromagnétique</i>	57
<i>I.9.4 Test de validation électrique</i>	58
<i>I.10 Conclusion</i>	58
<i>Bibliographie du Chapitre I</i>	60
Chapitre II : Techniques de fabrication de circuits 3D en alumine, silice fondue et thermoplastiques COC/COP	63
<i>II.1. Introduction</i>	64
<i>II.2. Choix du matériau pour le substrat diélectrique</i>	66
<i>II.2.1 Critères de choix d'un substrat</i>	66
<i>II.2.2 Les céramiques</i>	68
<i>II.2.3 Les polymères</i>	70
<i>II.2.4 Caractéristiques électriques et thermiques des substrats alumine, silice fondue et polymère COP</i>	72
<i>II.3 Les conducteurs pour les hyperfréquences</i>	73
<i>II.4 Etat de l'art des techniques de mise en forme de substrat 3D</i>	73
<i>II.4.1 L'ablation laser</i>	74
<i>II.4.2 Le micro-usinage mécanique</i>	75
<i>II.4.3 L'impression 3D</i>	76
<i>II.4.3.1 Impression 3D par dépôt de fil fondu</i>	77
<i>II.4.3.2 Impression 3D par stéréolithographie</i>	77
<i>II.3.4 Le moulage par injection</i>	78
<i>II.3.5 La technologie LTCC</i>	79
<i>II.5 Etat de l'art des techniques de métallisation de substrats 3D</i>	80
<i>II.5.1 Le dépôt par sérigraphie</i>	80
<i>II.5.2 La photolithographie</i>	81
<i>II.5.3 Le laminage</i>	81
<i>II.5.4 La gravure</i>	82
<i>II.5.5 Dépôt sous vide</i>	82
<i>II.5.6 Croissance électrolytique et croissance auto-catalytique</i>	84
<i>II.6 Procédé de fabrication des filtres SIW en alumine et en silice fondue</i>	85

<i>II.7 Procédé de fabrication des filtres SIW en polymère COP</i>	89
<i>II.7.1 Etape de moulage</i>	89
<i>II.7.2 Etape de perçage</i>	95
<i>II.7.3 Etape de métallisation</i>	100
<i>II.8. Conclusion</i>	104
<i>Bibliographie du Chapitre II</i>	106
<i>Chapitre III : Conception et Mesures de Filtres SIW en Bandes Q et V intégrables dans un environnement planaire</i>	108
<i>III.1. Introduction</i>	109
<i>III.2. Spécifications et expression du besoin</i>	109
<i>III.2.1 Gabarits de filtrage</i>	109
<i>III.2.1.1 Filtre Tx en bande Q</i>	109
<i>III.2.1.2 Filtre Tx en bande V</i>	110
<i>III.2.1.3 Spécifications interfaces</i>	110
<i>III.3. Cavités résonantes et facteur de qualité</i>	111
<i>III.4. Synthèse du filtre</i>	117
<i>III.4.1 Réponse idéale du filtre</i>	117
<i>III.4.2 Filtre à plots inductifs</i>	121
<i>III.5. Intégrabilité des filtres SIW dans un environnement planaire</i>	126
<i>III.5.1 Transition microruban à base de « taper »</i>	126
<i>III.5.2 Limitations de la transition microruban</i>	128
<i>III.6. Approche de conception et nouvelle transition 3D</i>	131
<i>III.6.1 Approche de conception</i>	131
<i>III.6.2 Transition 3D</i>	131
<i>III.7. Filtres SIW sur substrats d'alumine et de silice fondue</i>	134
<i>III.7.1 Filtres planaires</i>	134
<i>III.7.2 Filtres 3D</i>	136
<i>III.7.3 Filtres en bande V</i>	138
<i>III.8. Conception des Filtres SIW en thermoplastiques COC/COP</i>	139
<i>III.8.1 Généricité de la bande passante</i>	140
<i>III.8.2 Sensibilité aux tolérances de fabrication</i>	141
<i>III.9. Mesures</i>	144
<i>III.9.1 Résultats de mesures des filtres sur substrats d'alumine et de silice fondue</i>	144

<i>III.9.1.1 Résultats de mesure des filtres sur substrat d'alumine</i>	144
<i>III.9.1.2 Résultats de mesure des filtres sur substrat de silice fondue</i>	146
<i>III.9.3 Résultats de mesure des Filtres 3D sur substrat thermoplastique COP</i>	147
<i>III.10. Conclusion</i>	149
<i>Bibliographie du Chapitre III</i>	150
<i>Conclusion générale & Perspectives</i>	151
<i>Annexes</i>	155
<i>Annexe 1 : Repliage des filtres Alumine et Silice fondue</i>	156
<i>Annexe 2 : Solutions de post-réglages pour le filtre COP</i>	159

Liste des figures

Figure I.1 : La couverture en Très Haut Débit du Finistère [1].	22
Figure I.2: Panorama des solutions technologiques pour l'Internet très haut débit [2].	23
Figure I.3 : Couverture du satellite Ka-Sat d'Eutelsat [3].	24
Figure I.4 : Illustration de la proposition du CNES pour le très haut débit par satellite [4].	25
Figure I.5 : Architecture du satellite HOT BIRD™ 6 d'Eutelsat construit par Thales Alenia Space [5].	27
Figure I.6 : Architecture d'une charge utile [5].	28
Figure I.7 : Les transpositions de fréquence au niveau des satellites nouvelle génération :	
(a) Mission THD-sat	
(b) Mission constellation de satellites	28
Figure I.8 : Chaîne RF du convertisseur de fréquence pour les satellites nouvelle génération.	29
Figure I.9 : Réponse d'un filtre passe-bande.	31
Figure I.10 : La ligne microruban.	32
Figure I.11 : Evolution de l'impédance caractéristique de la ligne microruban en fonction du rapport w/h pour différentes constantes diélectriques [7].	33
Figure I.12 : Exemple de diagramme de dispersion du mode quasi-TEM et des deux premiers modes hybrides supérieurs d'une ligne microruban [8].	34
Figure I.13 : Guide coplanaire « coplanar waveguide » : (a) Mode quasi-TEM (b) Mode TE.	35
Figure I.14 : Ligne tri-plaque « stripline ».	35
Figure I.15 : Ligne à fente "slotline".	36
Figure I.16 : Filtre à lignes couplées : (a) résonateurs en série (b) résonateurs en parallèle	37
Figure I.17 : Exemple de filtre à lignes couplées en parallèle fonctionnant en bande V [10].	37
Figure I.18 : Filtre à résonateurs "Hairpin".	38
Figure I.19 : Exemple de filtre "Hairpin" fonctionnant en bande Q [12].	38
Figure I.20 : Filtre DBR "Dual Behavior Resonator".	39
Figure I.21 : Exemple de filtre DBR avec des segments passe-bas pour la suppression de remontées hors-bande [14].	39
Figure I.22 : Exemple de filtre à cavités métalliques rectangulaires développé à l'ESA [16].	40
Figure I.23 : Schéma de principe du filtre Plan E [16].	41
Figure I.24 : Filtre à cavités bi-modes (a) Schéma de principe pour un guide circulaire (b) Photographie du filtre [16].	41
Figure I.25 : Dimensionnement d'un guide SIW [18].	42
Figure I.26 : Filtre SIW en bande Ku avec une topologie à cavités cylindriques [19].	43
Figure I.27 : Filtre SIW à plots inductifs replié [20].	43
Figure I.28 : Miniaturisation du Filtre SIW en bande C en utilisant un substrat à forte permittivité [21].	43
Figure I.29 : Transition conventionnelle à base de taper [22]	44
Figure I.30 : Evolution du facteur de qualité à 25 GHz en fonction de l'épaisseur de substrat pour : (a) une cavité SIW avec différentes tangentes de pertes, (b) une cavité SIW avec différentes permittivités du substrat, (c) des cavités SIW et une cavité métallique, (d) une ligne microruban [23].	45
Figure I.31 : Ordres de grandeur de facteurs de qualités pour différents types de résonateurs hyperfréquences [18].	46

Figure I.32 : Exemple d'intégration de composants dans un circuit hybride [25].....	47
Figure I.33 : Exemples de motifs réalisés par une technique couches minces [26]......	48
Figure I.35 : Exemple de câblage filaire type "bonding" et évolution de l'inductance parasite associée [27].	49
Figure I.36 : [28] (a) Câblages de type « bonding » à 1, 2 et 3 fils (b) Paramètres S11 des câblages à 1,2 et 3 fils (c) Evolution de l'inductance mutuelle pour un câblage à 2 fils en fonction du rapport espacement des fils / largeur de la ligne microruban.....	50
Figure I.37 : Circuit équivalent de l'ensemble {fils de "bonding"+ pads de compensations + lignes d'accès} représenté sur le logiciel ADS d'Agilent.	50
Figure I.38 : Simulations EMDS (Agilent) de deux lignes microruban interconnectées par un câblage à 2 fils de "bonding" [29].....	51
Figure I.39 : Analyse de sensibilité (a) filtre SIW à iris inductifs (b) filtre à lignes couplées [30].	52
Figure I.40 : Sollicitations mécaniques appliquées aux composants électroniques [31] : (a) Exemple de véhicule test (b) Exemple de test de qualification de montages dans des environnements mécanique et thermomécanique.....	54
Figure I.41 : Modèle de résistance thermique pour un système électronique spatialisable [31].	55
Figure I.42 : Exemple de placement de composants électroniques dans une carte spatialisable [31] : (a)Exemple de simulation de profil de température d'un équipement (b)Exemple de carte électronique.....	57
Figure II.43 : Forme 3D des structures de filtrage.....	64
Figure II.44 : Vue 3D des structures de filtrage à réaliser.	65
Figure II.45: Relations entre les propriétés du substrat et les performances d'un filtre SIW [1].	66
Figure II.46 : Exemples de techniques de réalisation d'une pièce céramique.	70
Figure II.47 : Chronologie de l'interaction laser – matière [9].	75
Figure II.48 : Perçage par laser : (a) IR assisté par le gaz CO2 (b) UV YAG (société µUL).	75
Figure II.49 : Schéma de principe des techniques de fraisage (à gauche) et de perçage mécanique (à droite).....	76
Figure II.50 : Circuit gravé à l'aide de la micro-usineuse Protomat S103 de la société LPKF.	76
Figure II.51 : Schéma de principe de l'impression par dépôt de fil fondu (FDM).....	77
Figure II.52 : Schéma de principe de la SLA utilisée dans le cadre de cette étude.	78
Figure II.53 : Schéma de principe du moulage polymère.....	78
Figure II.54 : Exemple de filtre en bande C réalisé en technologie LTCC [13].....	79
Figure II.55 : Schéma de principe du procédé LTCC développé au Lab-STICC par l'équipe de l'IMT [14]. Atlantique.....	79
Figure II.56 : Représentation schématique des différentes étapes de la technique de sérigraphie. ...	80
Figure II.57 : Schéma de principe de la photolithographie avec une résine photosensible positive....	81
Figure II.58 : Plaquage d'un ruban de résine photosensible sur un substrat polymère 3D par laminage (TFP).....	81
Figure II.59 : Gravure : (a) isotrope (b) anisotrope (c) quasi-isotrope.	82
Figure II.60 : Schéma de principe du dépôt par pulvérisation cathodique [15].....	83
Figure II.61 : Schéma de principe du dépôt chimique en phase vapeur (CVD) [16].....	83
Figure II.62 : Schémas de principe de la croissance électrolytique et de la croissance auto-catalytique.	84

Figure II.63 : Masques de 4 filtres sur substrat d'alumine 2 pouces après perçages et délimitation par fente chez TFP.	85
Figure II.64 : Procédé de métallisation des filtres alumine et silice fondue (TFP).	86
Figure II.65 : Clichés des premiers prototypes en alumine.	87
Figure II.66 : Clichés pris au microscope optique des défauts de réalisation des filtres en alumine: Défaut de métallisation (a) défaut de forme des trous (b) et clichés de l'accès microruban et des marches de la transition 3D (c)	88
Figure II.67 : Cliché du deuxième prototype alumine après optimisation des paramètres de l'ablation laser.	89
Figure II.68 : Moule du filtre COP.	90
Figure II.69 : Cliché au microscope confocal Zeiss de la pièce moulé après première injection (PIMM UBO).	90
Figure II.70: Mesure de rugosité au profilomètre.	91
Figure II.71 : Traitement thermique et traitement chimique des échantillons rugueux.	92
Figure II.72 : Photos des échantillons sans traitement et avec traitements chimique et thermique. ...	93
Figure II.73 : Profils de rugosités des échantillons sans et avec traitements thermique et chimique..	93
Figure II.74 : Profils des traces des éjecteurs après traitements thermique et chimique.	94
Figure II.75 : Photos des pièces injectées obtenue avec l'ancien moule et le moule amélioré.	94
Figure II.76 : Mesures de rugosités des surfaces des échantillons obtenus avec l'ancien moule et le moule amélioré.	95
Figure II.77 : Evolution de la qualité du perçage suite à une optimisation des paramètres de la LPKF pour le perçage du COP.	95
Figure II.78 : Problème d'alignement des trous.	96
Figure II.79 : Placement de l'échantillon sur la plateforme de la LPKF (Fablab).	96
Figure II.80 : Placement de l'échantillon sur la plateforme de la LPKF (Fablab).	97
Figure II.81 : Echantillons percés à la LPKF.	97
Figure II.82 : Clichés des trous pris au microscope optique avec un grossissement 2,5X.	98
Figure II.83 : Clichés des trous pris au microscope optique avec un grossissement 10X.	98
Figure II.84 : Perçage par ablation laser des plaques COP percées à l'aide du laser UV nanoseconde de la plateforme EquipEx Leaf de l'IEMN.	99
Figure II.85 : Etapes du procédé de métallisation développé au Lab-STICC.	100
Figure II.86 : Masques réalisés par impression 3D et utilisés à l'étape de pulvérisation cathodique.	100
Figure II.87 : Deuxième méthode de masquage des accès.	101
Figure II.88 : Motifs des accès après croissance avec : (a) la 1 ^{ère} méthode de masquage (b) la 2 ^{ème} méthode de masquage.	101
Figure II.89 : Dispositif de la croissance auto-catalytique développée au Lab-STICC.	102
Figure III.90 : Gabarit du filtre Tx en bande Q (Thales Alenia Space et le CNES).	109
Figure III.91: Gabarit du filtre Tx en bande V (Thales Alenia Space et le CNES).	110
Figure III.92 : Schéma de principe des interconnexions par câblage filaire d'un filtre.	110
Figure III.93 : Câblage filaire de type "bonding" (Thales Alenia Space) : (a) Report des fils de "bonding" sur les accès du filtre (b) Configuration du câblage filaire.	111
Figure III.94 : Photographies des câblages filaires type "bonding" utilisés à Thales Alenia Space.	111
Figure III.95 : Cavité rectangulaire résonante.	112

Figure III.96 : Facteur de forme d'une cavité rectangulaire quelconque en fonction du rapport largeur / longueur.	113
Figure III.97 : Cavités Alumine, Silice fondue et COP simulés avec l'outil Eigenmode HFSS™	114
Figure III.98 : Facteurs de forme des cavités en alumine, silice fondue et COP en fonction de la hauteur de substrat.....	116
Figure III.99 : Facteurs de qualité liés au conducteur des cavités en alumine, silice fondue et COP en fonction de la hauteur de substrat.....	116
Figure III.100 : Facteurs de qualité à vide des cavités en alumine, silice fondue et COP en fonction de la hauteur de substrat.	117
Figure III.101 : Schéma électrique équivalent du filtre : Topologie en inverseurs d'impédance et en résonateurs LC série.	119
Figure III.102 : Réponse idéale du filtre en bande Q.....	120
Figure III.103 : Estimation des pertes par insertion du filtre en Bande Q pour différentes valeurs de facteur de qualité.	120
Figure III.104 : Topologie du filtre à plots inductifs.....	121
Figure III.105 : Fréquences de coupure du mode fondamental TE_{10} et du 1 ^{er} mode supérieur TE_{20} en fonction de la largeur des guides en alumine, en silice fondue et en thermoplastique COP.	122
Figure III.106: Evolution du coefficient d'atténuation α_c dans les guides en alumine, silice fondue et COP en fonction du rapport $f_0/f_{c_{TE10}}$	123
Figure 107 : Modèle de discontinuité d'un trou métallique noyé dans le substrat [2].....	124
Figure III.108 : Abaque de Marcuvitz [2].	125
Figure III.109 : Vues 3D des filtres à plots inductifs en bande Q dédiés à la mission THD.....	125
Figure III.110 : Réponses des filtres à plots inductifs en bande Q simulés avec le logiciel HFSS™	126
Figure 111 : Exemple de calcul des dimensions optimales de la transition microruban conventionnelle.....	127
Figure III.112: Calcul de la largeur optimale du "taper" microruban dans le cas de la silice fondue (a) et du COP (b)	127
Figure III.113 : Transition microruban conventionnelle sur substrats d'alumine et de silice fondue de différentes épaisseurs	128
Figure III.114 : Diagrammes de dispersion de lignes 50 Ω sur substrats d'alumine et de silice fondue de différentes épaisseurs.	129
Figure III.115 : Paramètres S des fils de "bonding" fournis par Thales Alenia Space.....	130
Figure III.116 : Simulation de la compensation des effets inductifs introduits par les fils de "bonding " de différentes longueurs.	130
Figure III.117 : Approche de conception pour l'intégrabilité dans un environnement MIC.	131
Figure III.118 : Transition microruban conventionnelle sur pente.....	132
Figure III.119 : Profils d'impédance et de largeur de ligne de la transition conventionnelle : (a) sur une épaisseur d'alumine de (b) sur une épaisseur d'alumine variable.	132
Figure III.120 : Réponse d'un guide d'onde terminé par des transitions microruban sur une alumine à 635 μm (a), une pente (b) et une pente usinée (c).	133
Figure III.121 : Vue de la nouvelle transition 3D.	133
Figure III.122 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW avec la transition 3D (HFSS™).	134
Figure III.123 : Résultats de simulation des filtres planaires en alumine d'épaisseurs 254 μm et 635 μm	135

Figure III.124 : Résultats de simulation des filtres planaires en silice fondue d'épaisseurs 254 μm et 500 μm	136
Figure III.125 : Résultats de simulation des filtres 3D en alumine et en silice fondue comparés à ceux des filtres planaires.	137
Figure III.126 : Résultats de simulation du filtre alumine avec un absorbant EM (ABS) placé entre les accès pour éliminer les couplages parasites.	138
Figure III.127 : Résultats de simulation des filtres 3D bande V.	138
Figure III.128 : Résultats de simulation des filtres Bande Q en alumine, silice fondue et thermoplastique COP 480R.	139
Figure III.129 : Diamètres et positions des trous en fonction des bandes passantes ciblées.	140
Figure III.130 : Réponses du filtre avec différentes bandes passantes.	140
Figure III.131 : Sensibilité de la réponse du filtre COP aux variations de la permittivité.	142
Figure III.132 : Sensibilité de la réponse du filtre aux variations de la tangente de pertes.	142
Figure III.133 : Variation de la réponse du filtre suite à une variation du diamètre des trous centraux.	143
Figure III.134 : Limites de sensibilités dimensionnelles du filtre COP.	143
Figure III.135 : Résultats de mesures et de rétro-simulations des filtres sur substrat d'alumine.....	144
Figure III.136 : De-embedding de 325 μm de longueur de « <i>bonding</i> ».	145
Figure III.137 : Filtre mesuré après de-embedding de 325 μm de longueur de " <i>bonding</i> ".	146
Figure III.138 : Résultats de mesure et de rétro-simulation du filtre planaire sur substrat de silice..	147
Figure III.139 : Dispositif utilisé pour la mesure des filtres COP.	147
Figure III.140 : Résultats de mesure des filtres COP.....	148
Figure 141 : Repliement du filtre 3D en silice fondue.	156
Figure 142 : Réponses des structures obtenues aux différentes étapes de repliement.....	156
Figure 143 : Structure finale du filtre replié.	157
Figure 144 : Résultats de simulation des filtres 3D repliés en alumine et en silice fondue comparés à ceux des filtres 3D dépliés initiaux.	158
Figure 145 : Motifs de post-réglages.....	159
Figure 146 : Décalage fréquentiel de 300 MHz assuré par la gravure d'un disque et d'une fente circulaire.	159
Figure 147 : Décalage fréquentiel de 300 MHz assuré par la gravure d'un carré et d'une croix.	160
Figure 148 : Méthode de sous-couplage en transmission pour l'évaluation du facteur de qualité à vide.	160
Figure 149 : Décalage fréquentiel et évolution du facteur de qualité en fonction du diamètre du motif de post-réglage : Disque circulaire et fentes.....	160
Figure 150 : Décalage fréquentiel et évolution du facteur de qualité en fonction du côté du motif de post-réglage carré.	160
Figure 151 : Décalage fréquentiel et évolution du facteur de qualité en fonction de la largeur sur segment horizontal ou vertical d'une croix de côté égal à 1mm (a) et à 2 mm (b).	160
Figure 152 : Evaluation du facteur de pertes avec et sans pertes diélectriques et conductrices.....	160
Figure 153 : Evaluation du rayonnement pour un décalage fréquentiel assuré par un motif en disque.	160
Figure 154 : Evaluation du rayonnement pour un décalage fréquentiel assuré par un motif en carré.	160

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques thermiques de matériaux utilisés en microélectronique [32].....	56
Tableau II.2 : Exemples d'applications pour les céramiques fonctionnelles [3].....	69
Tableau II.3 : Exemples d'usages des polymères dans le domaine des hyperfréquences [4].....	71
Tableau II.4 : Caractéristiques électriques et thermiques des substrats : Alumine, Silice fondue et COP 480R.....	73
Tableau II.5: Paramètres de la presse à injecter pour le moulage du COP.	90
Tableau II.6 : Résultats de mesures de rugosité des pièces injectées dans l'ancien moule.	91
Tableau II.7 : Valeurs des diamètres obtenus à l'aide du perçage laser.	99
Tableau II.8: Procédés de fabrication des filtres COP.	103
Tableau III.9: Résonance des premiers modes supérieurs au sein des cavités carrées en alumine, silice fondue et COP 480R	115
Tableau III.10 : Résonance du mode supérieur TE_{011} au sein des cavités alumine, silice fondue et COP 480R.....	115
Tableau III.11 : Coefficients du filtre prototype passe bas de Tchebychev d'ordre 4 pour une ondulation dans la bande égale à $0.01 dB$	118

Introduction générale

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du projet ANR-ATOMIQ qui vise à développer des solutions de filtrage innovantes pour les convertisseurs de fréquence nouvelle génération employés dans les futures applications de télécommunication satellitaire. Ces applications vont permettre aux zones dites « blanches » d'accéder à l'internet haut débit à un coût équivalent à celui de la fibre optique et ainsi réduire la fracture numérique qui existe entre les grandes agglomérations et le reste des territoires.

La plupart des liaisons avec les satellites multimédia première génération se font aujourd'hui en bande Ka (20-30GHz). Pour libérer de la ressource et offrir un meilleur débit aux utilisateurs, les bandes Q (autour de 40 GHz) et V (autour de 50 GHz) seront utilisées pour relier le satellite aux stations au sol. Les convertisseurs de fréquence au niveau des charges utiles assureraient ainsi le passage de la bande V à la bande Ka à l'aller et de la bande Ka à la bande Q sur la voie du retour. Les fonctions de filtrage au niveau de ces équipements s'avèrent être un point critique et les technologies adoptées pour des bandes de fréquence plus basses rencontrent leurs limites avec la montée en fréquence. Le but du présent projet est de développer des technologies novatrices et performantes permettant de répondre aux besoins de filtrage en bande Q et V à moyen et long terme.

Aux fréquences adressées, les besoins en termes de filtrage sont :

- L'intégrabilité dans des circuits majoritairement planaires.
- Les performances électriques matérialisées par un facteur de qualité élevé.
- Une faible sensibilité aux tolérances de fabrication.
- Des solutions de post-réglages pour corriger les éventuelles erreurs dues aux tolérances de fabrication.

Les solutions de filtrages développées pour les applications en bandes C (6-4GHz), X (8-7.5 GHz) et Ku (18-14/12-11 GHz) sont majoritairement basées sur des technologies planaires, du type microruban. Avec la montée en fréquence, cette technologie rencontre ses limites notamment à cause de son faible facteur de qualité, sa forte sensibilité à son environnement et sa tendance à rayonner. Pour les fréquences élevées, la technologie LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics) émerge. Cette technologie offre une souplesse de conception ouvrant la voie à des formes 3D où l'intégration de composants se fait à la fois horizontalement et verticalement. La réalisation de dispositifs LTCC reste néanmoins assez difficile et coûteuse. La technologie SIW (Substrate Integrated Waveguide) permet de répondre à la fois aux besoins de performances et d'intégrabilité. Cette technologie, tout en

gardant les mêmes procédés de fabrication que ceux utilisés par exemple en microruban, permet d'obtenir des facteurs de qualité importants, par le biais de cavités enterrées au sein du substrat. Dans le projet ANR-FILIPPIX (2008 - 2011), il a été démontré que les structures SIW utilisées en bandes C et Ku, bien que volumineuses, présentaient des facteurs de qualité deux fois plus importants que ceux obtenus avec des topologies planaires. Pour les bandes Q et V, le problème de la taille ne se pose plus. A ces fréquences, le choix de la technologie SIW est justifié.

Les filtres développés dans le cadre de cette thèse sont des filtres SIW sur substrat d'alumine ($\epsilon_r = 9,9$; $\tan\delta = 10^{-4}$; $h = 635\mu\text{m}$), de silice fondue ($\epsilon_r = 3,8$; $\tan\delta = 3.10^{-4}$; $h = 500\mu\text{m}$) et de COP ($\epsilon_r = 2.32$; $\tan\delta = 3.2 \cdot 10^{-4}$; $h = 2 \text{ mm}$). L'alumine est communément utilisée dans le cadre des applications spatiales. Il s'agit de matériaux très largement plébiscités dans ce cadre, car caractérisés par un très bon compromis sur les aspects électrique, mécanique et thermique. Ils sont de ce fait facilement qualifiables et par ailleurs, les techniques de fabrication des substrats et de leur métallisation par des procédés couche mince sont très bien maîtrisées. La silice fondue présente des tangentes de pertes équivalentes à celles de l'alumine mais a une permittivité inférieure. Ceci a permis d'obtenir des structures plus grandes, l'objectif étant de diminuer la sensibilité aux tolérances de fabrication. Pour des contraintes de réalisation (ablation et perçage laser), les solutions alumine et silice fondue ne peuvent pas avoir des épaisseurs de substrats supérieures respectivement à $635 \mu\text{m}$ et $500 \mu\text{m}$. La solution polymère COC/COP (Cyclo-Oléfine Copolymère et Cyclo-Oléfine Polymère) réalisée par moulage permet de considérer des substrats plus épais et ainsi d'obtenir de meilleurs facteurs de qualité.

Ce manuscrit comporte trois chapitres qui s'organisent comme suit :

Le premier chapitre rappelle le contexte général de ce travail de thèse et présente un bref état de l'art des technologies et des topologies de filtrage existantes avant de s'intéresser aux besoins de filtrage en bande Q et V permettant de justifier le choix de la technologie SIW et de déduire les contraintes de conception et de réalisation des structures de filtrage proposées.

Les étapes de réalisation des filtres proposés ; mise en forme du substrat et métallisation, sont présentées dans le chapitre II. Ces étapes dépendent notamment du choix du substrat qui est par ailleurs amplement justifié dans ce chapitre. Pour les filtres sur substrat d'alumine et de silice fondue, il s'agit d'un procédé d'ablation et de perçage laser pour la mise

en forme du substrat suivi d'étapes de photolithographie et de gravure pour la définition des motifs métallique et de croissance électrolytique pour la métallisation. Pour les filtres plastiques COP, il s'agit de procédé de moulage polymère suivi d'étapes de pulvérisation cathodique et de croissance auto-catalytique pour la métallisation.

Les étapes de conception sont quant à elles présentées dans le chapitre III. Des formes 3D sont imaginées afin de répondre à la fois aux besoins de performances (facteurs de qualité élevés) et d'intégrabilité dans un environnement planaire avec comme moyen d'interconnexion un câblage filaire de type « *bonding* ». Ce chapitre commence par rappeler les contraintes de conception pour ensuite faire le point sur la synthèse des filtres et introduire une nouvelle transition 3D entre une ligne microruban et un guide SIW permettant d'assurer le compromis performances – intégrabilité ciblé.

Les résultats de mesures des différentes solutions proposées sont présentés et interprétés à la fin du chapitre III.

Un bilan de ce travail est présenté en conclusion du manuscrit. Des perspectives sont par ailleurs proposées afin d'assurer la continuité de ce travail de recherche.

Chapitre I:

Contexte général de l'étude

I.1. Introduction

Pour les futurs satellites de télécommunications (Q/V), les convertisseurs de fréquence doivent assurer les transpositions de fréquence entre la bande Ka et les bandes Q et V. Au sein des convertisseurs de fréquence, les filtres post-mélangeurs présentent un point critique et les solutions de filtrage utilisées pour des bandes de fréquence plus basses rencontrent ici leurs limites.

Les besoins de filtrage identifiés en bandes Q et V sont des besoins de performance (facteur de qualité élevé), de précision de fabrication (10 μm serait un objectif satisfaisant), de stabilité en fréquence et d'intégration aisée dans un module RF. Parmi les solutions existantes la technologie SIW présente le meilleur compromis intégrabilité-performance.

Pour les filtres SIW, l'épaisseur de substrat est un paramètre important. Son augmentation améliore le facteur de qualité de ses cavités mais s'accompagne de différentes contraintes notamment lors de son report dans le module RF.

La première partie de ce chapitre précise le contexte général de l'étude faite dans le cadre de cette thèse. L'architecture d'un satellite de télécommunications ainsi que celle des convertisseurs de fréquence nouvelle génération sont par la suite présentées.

Dans la suite, nous nous intéressons à la fonction de filtrage Tx post-mélangeur des charges utiles de type Q/V en introduisant les différents paramètres d'un gabarit de filtrage ainsi que les critères de performance et le facteur de qualité à vide de ses résonateurs, le facteur de qualité étant un critère de choix de la technologie SIW.

La technologie SIW ainsi que les technologies planaires et volumiques sont présentées dans le paragraphe suivant. Pour les différentes technologies, nous présentons une liste non exhaustive des topologies utilisés dans les applications spatiales avant de les comparer en fonction des besoins cités plus haut.

La dernière partie de ce chapitre présente de manière succincte les différents tests de qualification d'un satellite en insistant sur ceux portant sur les cartes électroniques au niveau de la charge utile et à l'échelle du composant.

I.2. Le très Haut débit en France

I.2.1 La fracture numérique entre les villes et les zones rurales

Face à l'évolution des usages (web, Internet vidéo sur PC ou TV, voix IP, communication vidéo, jeux en ligne, téléchargement P2P...) et à la croissance du besoin en termes de très haut débit, le gouvernement a défini en février 2013 le plan France Très Haut Débit qui vise à déployer le très haut débit sur tout le territoire pour 2022. La fibre optique est au cœur de ce programme. Elle permet, en effet, d'accéder à des débits de 100 Mbps et plus. Cependant, le coût de son déploiement augmente avec la dispersion de la population. La logique économique va ainsi privilégier les zones denses accentuant paradoxalement la fracture numérique qui existe entre les villes et les zones rurales. Dans l'exemple du département du Finistère (cf. figure I.1), le très haut débit à 30 Mbit/s et plus concerne 40 % de la population avec une concentration aux centres des villes comme la ville de Brest qui profite du très haut débit à 100 Mbits/s et plus à 96 % assuré par une forte infrastructure en fibre optique [1].

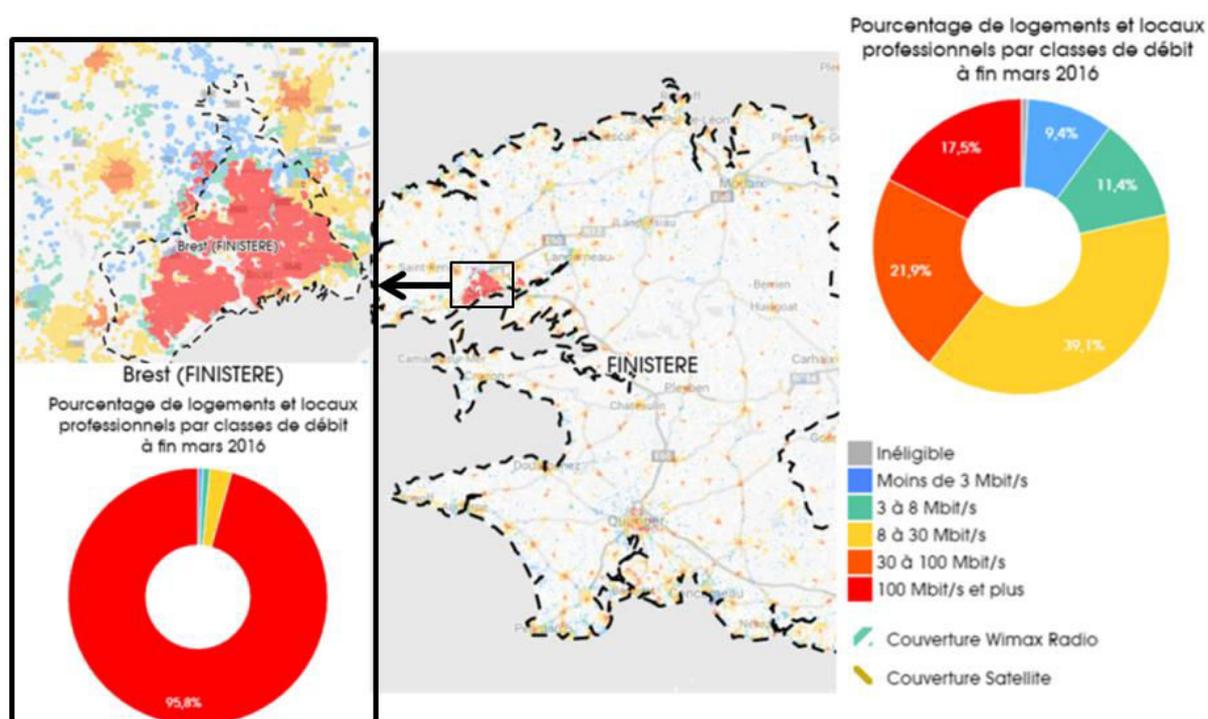


Figure I.1 : La couverture en Très Haut Débit du Finistère [1].

I.2.2 Les solutions technologiques pour l'internet en zones rurales

À des débits bien inférieurs au 30 Mbps exigible pour le très haut débit, plusieurs solutions technologiques sont proposées pour assurer la couverture internet des zones dites « blanches ». Parmi ces solutions, il existe la technologie ADSL reposant sur l'utilisation des lignes téléphoniques. La principale limitation de cette technologie concerne les distances à parcourir. Il est, en effet, indispensable d'être assez proche d'un central téléphonique pour avoir une qualité de signal correcte. Comme l'illustre la figure I.2 [2], les débits ADSL peuvent atteindre 20 Mbps, voire plus mais à des distances inférieures à 1 km. A mesure de l'éloignement du central téléphonique, le débit maximal accessible diminue fortement pour descendre en dessous de 512 kbps. Contrairement à l'ADSL, les solutions hertziennes de type WiMax sont accessibles à de longues distances grâce à des antennes qui émettent des ondes radios sur un rayon de plusieurs kilomètres. Le débit maximal accessible reste néanmoins inférieur à 10 Mbps et est très faible, comparé aux 100 Mbps et plus atteints par les connexions fibre optique. Pour une couverture plus étendue à des coûts indépendants de la densité des zones couvertes, l'internet par satellite est à l'heure actuelle l'unique solution technologique possible. Si les débits atteints par les solutions satellitaires restent inférieurs à 10 Mbps, les travaux de recherche et développement sur le très haut débit satellitaire sont d'actualité et sont soutenus par l'état dans le cadre du programme national « économie numérique » et des investissements d'avenir.

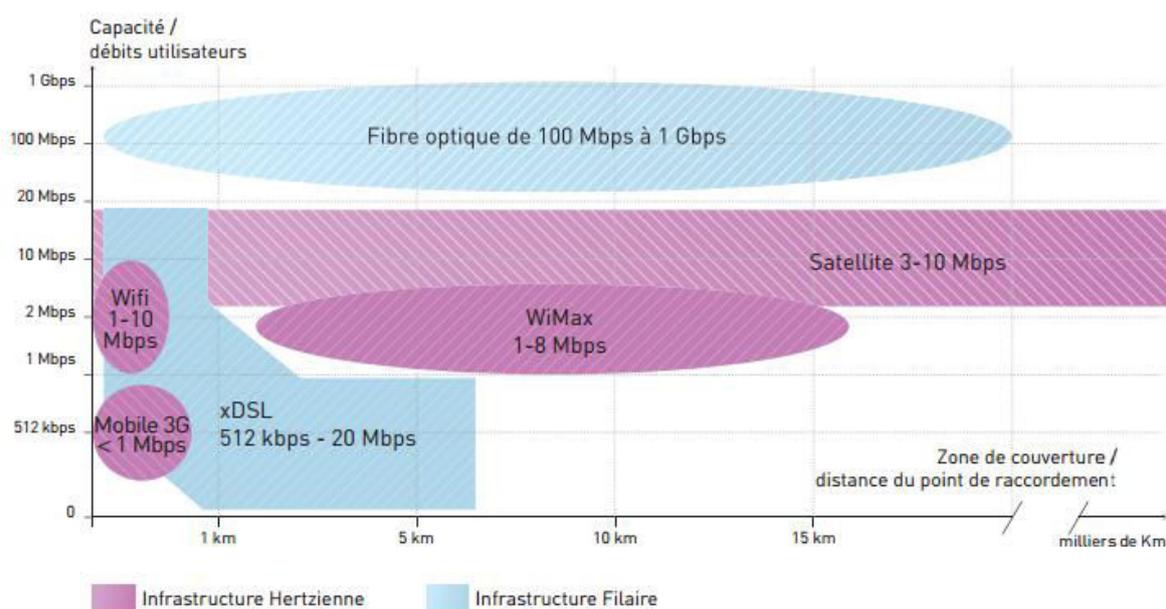


Figure I.2: Panorama des solutions technologiques pour l'Internet très haut débit [2].

1.3. Le très haut débit par satellite

1.3.1 Le satellite Ka-Sat

Premier satellite à grande capacité en Europe, le satellite Ka-Sat positionné à la latitude 9° Est sur l'orbite géostationnaire et couplé à dix stations au sol réparties dans toutes l'Europe prévoyait le raccordement de plus d'un million de foyers. Contrairement aux anciennes générations de satellites conçues pour couvrir une large zone avec un seul faisceau, le satellite Ka-Sat utilise la plateforme Eurostar E3000 d'Astrium basée sur 82 faisceaux étroits de 250 Km de diamètre exclusivement en bande Ka. Chaque faisceau est doté d'une capacité de près de 1 Gbps permettant la réutilisation d'une même bande de fréquence jusqu'à 20 fois portant ainsi jusqu'à 70 Gbps la capacité totale en bande passante du satellite [3]. Le service grand public Tooway™ assure aux usagers un débit équivalent à celui de l'ADSL (jusqu'à 22 Mbps en réception et 6 Mbps en émission).

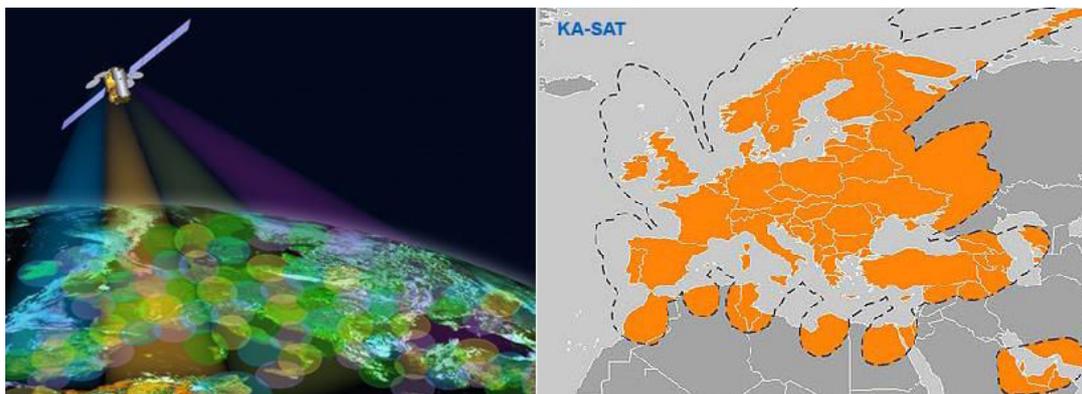


Figure I.3 : Couverture du satellite Ka-Sat d'Eutelsat [3].

Seulement quatre ans après son lancement en 2011, Ka-Sat arrive à saturation sur deux des onze faisceaux couvrant la France métropolitaine. Loin des prédictions annoncées par l'opérateur, ce satellite ne desservait en décembre 2014 que 175000 abonnés. Ceci est principalement dû à l'élévation de la demande en termes de débit. À une capacité de 70 Gbps, l'augmentation du nombre d'abonnés signifie une diminution du débit accessible pour chacun. Ne souhaitant pas sacrifier la qualité pour la quantité, Eutelsat décide de suspendre son service Tooway™ dans 28 départements.

1.3.2 La proposition du CNES : le projet THD-Sat

La proposition du CNES pour accéder au très haut débit par satellite repose sur l'utilisation des bandes Q et V en plus de l'utilisation de la bande Ka. Le satellite dédié à cette mission utiliserait des antennes multifaisceaux de faible diamètre pour couvrir la totalité du

territoire français. Afin de rester compatible avec le prochain déploiement des terminaux utilisateurs, le lien avec le satellite se fait en bande Ka. De façon à libérer de la ressource sur cette bande, les liaisons avec les stations au sol s'opèrent en bandes Q et V.

D'un point de vue technique, le lien entre le satellite et les terminaux utilisateurs s'opère dans un premier temps en bande Ka, autour de 30 GHz en voie montante et de 20 GHz en voie descendante. Le lien entre le satellite et les stations au sol s'opère en bande Q, autour de 40 GHz, à l'allée vers la station et en bande V, autour de 50 GHz, au retour libérant ainsi de la bande passante en bande Ka communément utilisée par les satellites multimédia de première génération.

Les convertisseurs de fréquence constituent ainsi un élément clé des charges utiles pour les satellites de télécommunications de type « Q/V ». Dans le cadre du projet THD-sat proposé par le CNES, ces équipements réalisent en particulier la transposition de fréquence de 50 GHz vers 20 GHz dans le sens station au sol vers utilisateur et la conversion de 30 GHz vers 40 GHz dans le sens utilisateur vers station au sol.

Le but du projet THD-sat, coordonné par le CNES, est de développer des briques technologiques nécessaires au développement du très haut débit par satellite. Dans cet objectif, il supporte les activités de recherches s'intéressant au développement d'équipements innovants pour les charges utiles des futurs satellites de télécommunications.

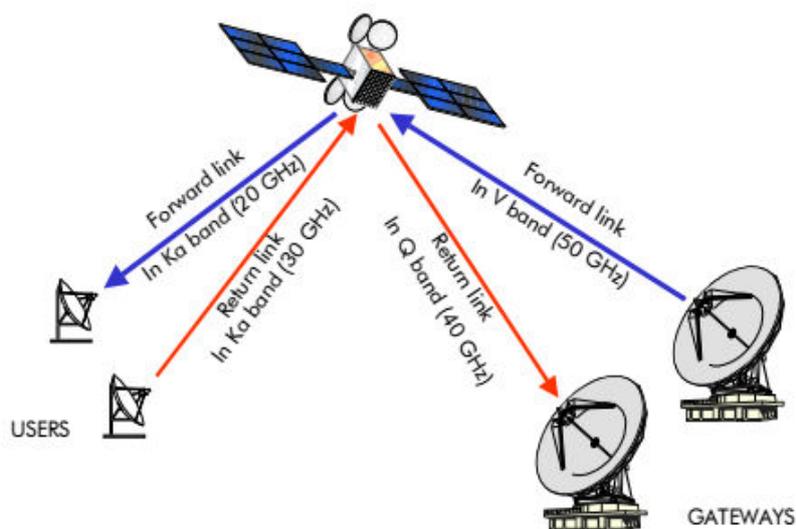


Figure I.4 : Illustration de la proposition du CNES pour le très haut débit par satellite [4].

1.3.3 Les constellations de satellites en orbite basse

Un des avantages majeurs des satellites en orbites basses ou satellites LEO (altitude entre 500 et 1500 Km) est le faible taux de latence permettant de traiter plus d'information en moins de temps et par conséquent d'accéder à de meilleurs débits que ceux obtenus par les satellites en orbite géostationnaire (altitude de 36000 Km). Cependant, vu leur proximité de la terre, ces satellites ont des périodes de révolution beaucoup plus importantes et ne peuvent pas couvrir une même région assez longtemps. Ainsi, pour une région donnée, il est indispensable d'avoir une succession de satellites LEO qui se relaient de façon synchronisée. Il s'agit de constellation de satellites.

Afin d'offrir des services Internet très haut débit à faible taux de latence, Thales Alenia Space travaille sur la constellation en orbite basse IRIDIUM NEXT (à 780 Km de la terre). Un des scénarios envisagés par Thales consiste à utiliser la bande V (autour de 55 GHz) pour assurer les liaisons inter-satellites. Les liaisons entre le satellite et la station de surveillance se feraient en bande Ka. Il s'agit dans ce cas de faire la conversion de fréquence Ka vers V.

1.4. Architecture d'un satellite de télécommunications

L'architecture d'un satellite dépend de la mission à laquelle il est dédié. Les satellites de télécommunications adoptent tous une architecture similaire. Ils sont constitués de deux modules : la plateforme et la charge utile.

1.4.1 La plateforme

La plateforme réunit les éléments qui fournissent l'énergie, assurent la régulation thermique et permettent le positionnement, le pointage et le contrôle du satellite. Elle comporte :

- des capteurs solaires : permettant d'informer le sol de la position du satellite pour le maintenir en poste.
- un système de propulsion : permettant le pilotage du satellite. La propulsion de celui-ci est assurée par des moteurs chimiques ou tuyères de maintien à poste qui sont alimentées par des réservoirs à carburant.
- des cellules photovoltaïques : assurant l'alimentation en énergie électrique.

- des batteries rechargeables : assurant l'alimentation du satellite dans les zones d'ombre.
- des panneaux de surface radiative et des panneaux de carbone : évacuant la chaleur dégagée par les circuits électroniques.
- des protections thermiques externes : isolant du milieu environnant.

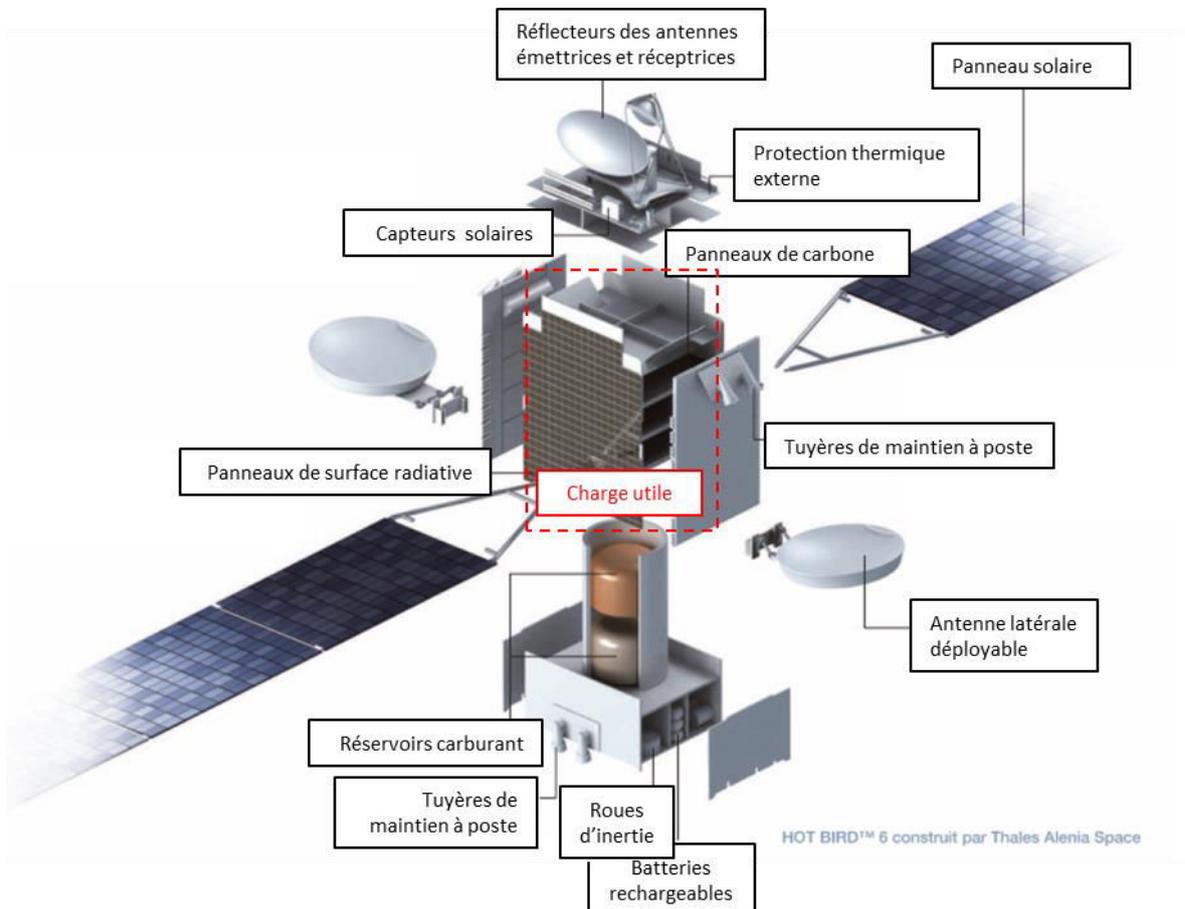


Figure I.5 : Architecture du satellite HOT BIRD™ 6 d'Eutelsat construit par Thales Alenia Space [5].

1.4.2 La charge utile

La charge utile désigne la partie du satellite qui lui permet de remplir sa mission. Pour un satellite de télécommunications, il s'agit de l'équipement qui permet la réception, le traitement et la réémission du signal vers la terre. Elle comprend notamment les antennes émettrices et réceptrices et les répéteurs du satellite.

- Les antennes sont dimensionnées en fonction des zones de couvertures et des puissances souhaitées au sol.
- Le répéteur constitue l'unité de capacité du satellite. Il reçoit un signal sur un canal fréquentiel bien déterminé, transpose sa fréquence et le réémet vers le sol après

l'avoir amplifié. Dans un même satellite, il peut y avoir une dizaine de répéteurs chacun pouvant supporter un ou plusieurs canaux de transmission.

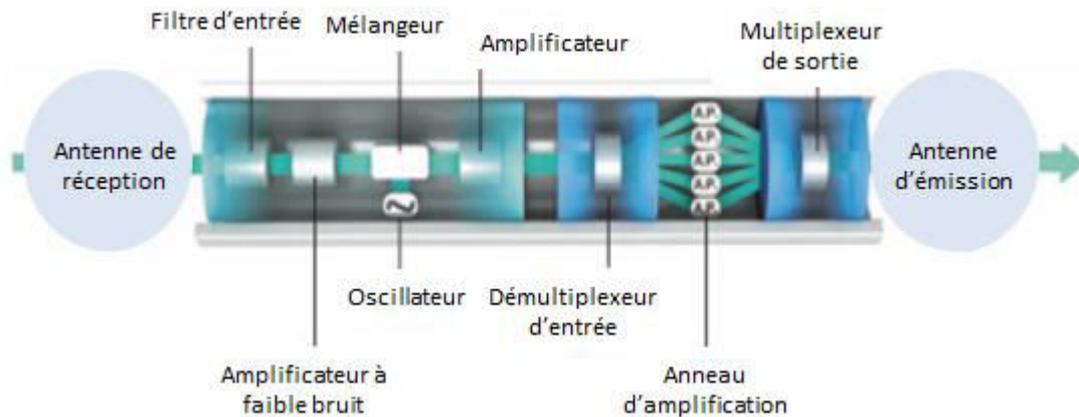


Figure I.6 : Architecture d'une charge utile [5].

I.5. Les convertisseurs de fréquence nouvelle génération

Pour les futurs satellites de télécommunications, les convertisseurs de fréquence doivent assurer la transposition de fréquence de la bande Ka vers la bande Q et de la bande V vers la bande Ka pour la mission type THD-sat (cf. figure I.7 (a)). Dans le cadre des futures constellations de satellite, les liaisons inter-satellites se feront en bande V et les liaisons avec les stations de surveillance se feront en bande Ka. Les convertisseurs de fréquence assurent dans ce cas la transposition de fréquence de la bande Ka vers la bande V (cf. figure I.7 (b)).

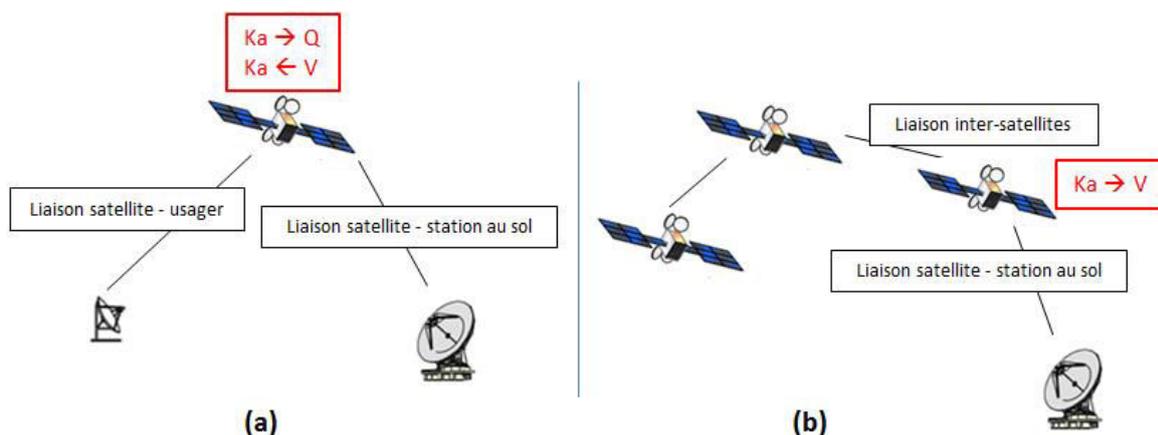


Figure I.7 : Les transpositions de fréquence au niveau des satellites nouvelle génération :
 (a) Mission THD-sat
 (b) Mission constellation de satellites

La figure I.8 présente la chaîne RF des convertisseurs de fréquence dédiés aux futurs satellites de télécommunication. Les fonctions de filtrage au niveau de la chaîne se situent avant (filtre Rx) et après (filtre Tx) la transposition de fréquence assurée par le mélangeur. Le filtre Rx a pour rôle de rejeter la bande Tx. Le filtre Tx doit quant à lui assurer la rejection de

la bande Rx mais surtout une forte réjection des produits de mélanges. Avec la montée en fréquence, les spécifications des filtres post-mélangeurs deviennent très strictes. Le projet ATOMIQ vise à développer des solutions de filtrage innovantes pour répondre aux besoins de performance croissants des récepteurs satellites en bandes Q et V. Les convertisseurs de fréquence considérés dans ce projet sont ceux permettant les conversions de la bande Ka vers les bandes Q et V. Il s'agit de répondre aux besoins de filtrage Tx en Bande Q (autour de 40 GHz) et V (autour de 55 GHz).

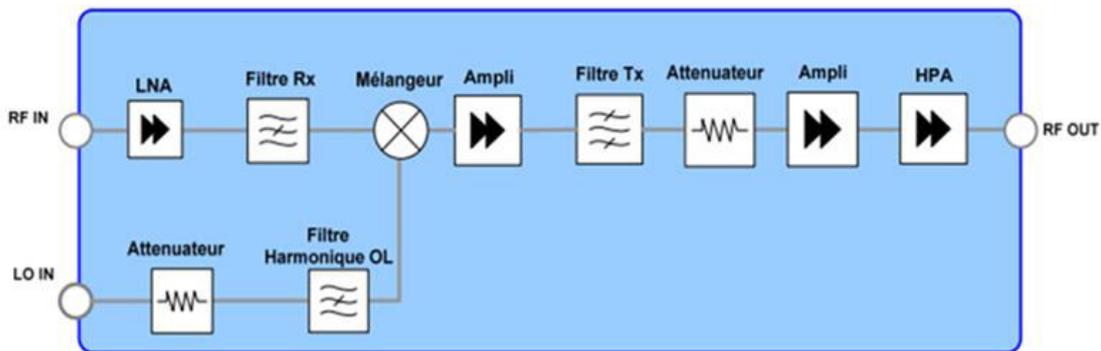


Figure I.8 : Chaîne RF du convertisseur de fréquence pour les satellites nouvelle génération.

I.6. Généralités sur le filtrage Tx

Dans les récepteurs de télécommunications, le filtre Tx est un filtre passe-bande généralement de faible ondulation d'amplitude, de faibles pertes d'insertion et de fortes réjections proche de la bande passante.

La figure I.9 présente la réponse d'un filtre passe-bande. Sur cette réponse, les paramètres à relever sont :

- La bande passante et la fréquence centrale f_0 : La bande passante correspond à la différence entre les fréquences de coupure haute et basse f_1 et f_2 . La fréquence centrale f_0 correspond au milieu du segment $[f_1, f_2]$. La bande passante relative correspond au rapport de la bande passante et de la fréquence centrale, la valeur étant généralement donnée en pourcentage.
- Les pertes d'insertion (IL : Insertion Losses) et l'ondulation : Les pertes d'insertion correspondent à l'atténuation du paramètre S_{12} dans la bande passante du filtre. L'ondulation correspond à la variation du paramètre S_{12} dans la bande.

- Le facteur de qualité à vide : Les pertes d'insertion et les performances du filtre dépendent du facteur de qualité à vide de ses résonateurs. Avec la montée en fréquence, les gabarits de filtrage deviennent très stricts nécessitant des bandes passantes plus faibles et des réjections plus importantes. Le principal critère de performance d'un filtre passe bande est le facteur de qualité à vide de ses résonateurs.

Le facteur de qualité à vide d'un résonateur est défini par :

$$Q = \omega_r \frac{W}{P_d} \quad \text{Eq I.1}$$

ω_r est la fréquence de résonance du résonateur, W et P_d correspondent respectivement à l'énergie emmagasinée et à la puissance dissipée par le résonateur pendant une période à la résonance.

- La bande atténuée et les réjections : La bande atténuée ou rejetée correspond à la bande pour laquelle le filtre devient bloquant. La réjection correspond à l'atténuation du paramètre S_{12} à une fréquence donnée (fréquence d'une harmonique à rejeter). Sur la figure I.9, A_s correspond à la réjection à la fréquence f_{s1} .
- L'adaptation : Elle exprime la quantité de puissance réfléchie dans la bande. Elle correspond au niveau maximal du paramètre S_{11} dans la bande passante du filtre. Une adaptation égale à 0 dB signifie une réflexion totale de l'onde EM et une adaptation infinie signifie un transfert total du signal.

Ces paramètres servent de critères de performance lors de l'étape de spécification. La réponse du filtre proposée doit rentrer dans un gabarit délimité par ces paramètres. En plus du respect des gabarits de filtrage, il existe d'autres spécifications concernant la forme du filtre, son intégration au sein de l'équipement et les procédés technologiques utilisés pour sa fabrication et son report.

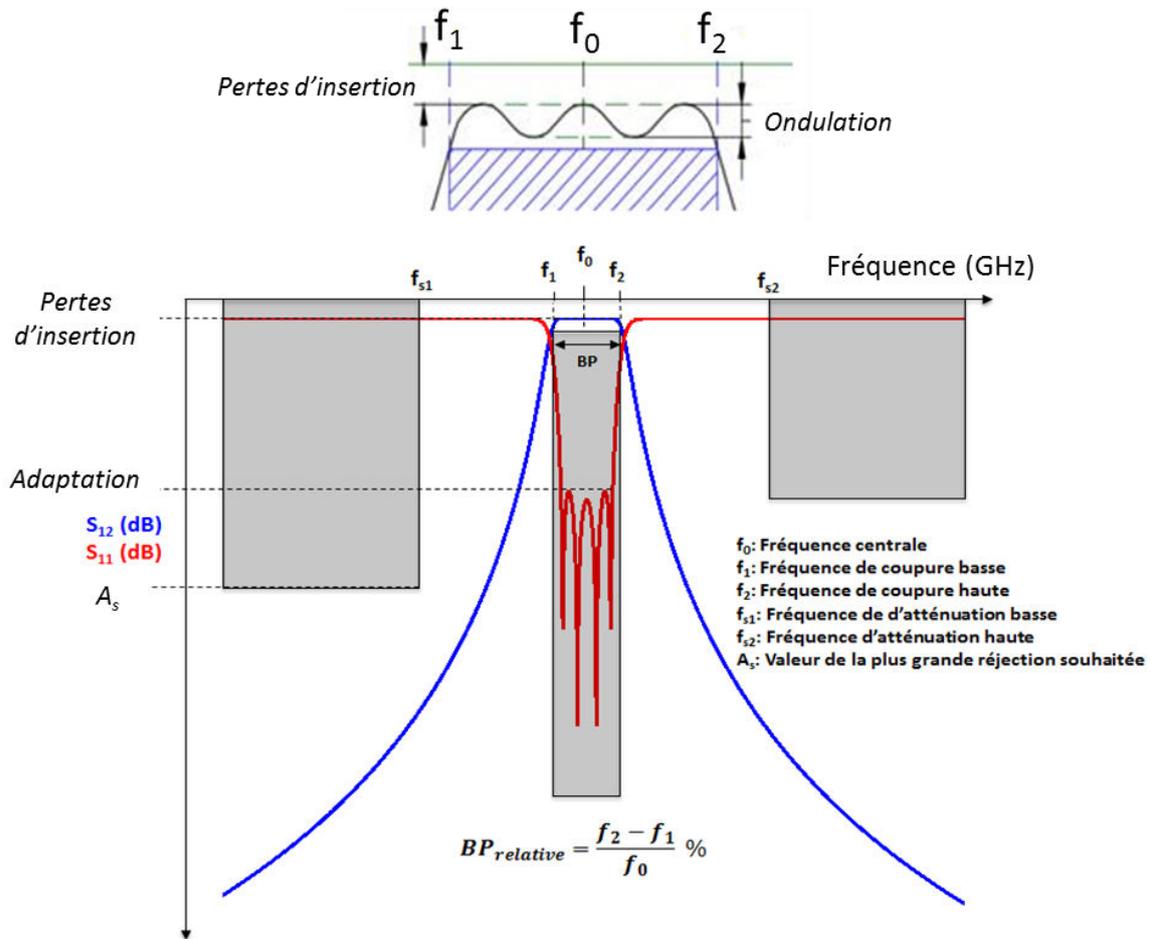


Figure I.9 : Réponse d'un filtre passe-bande.

1.7. Etat de l'art des solutions de filtrage utilisées pour des applications spatiales

1.7.1 Filtres planaires

1.7.1.1 Les principales technologies planaires

Les lignes de transmission planaires sont largement présentes dans les circuits hybrides pour assurer notamment le transport du signal entre les différents composants actifs et passifs. Elles sont large bande et permettent la réalisation de circuits compacts et légers. Il existe différentes technologies de lignes planaires utilisées dans les circuits intégrés microondes dont les principales sont :

- La ligne microruban « microstrip » :

La ligne microruban est constituée d'un ruban métallique faisant office de conducteur gravé sur la face supérieure d'un substrat diélectrique et d'un plan de masse placé sur la face opposée (cf. figure I.10). Les lignes de champs dans une telle structure sont principalement concentrées dans le substrat entre le conducteur et le

plan de masse. Cependant une petite partie du champ électromagnétique se trouve à l'extérieur du diélectrique. Dans ce cas, le mode qui se propage n'est pas un mode TEM pur mais un mode quasi-TEM peu dispersif.

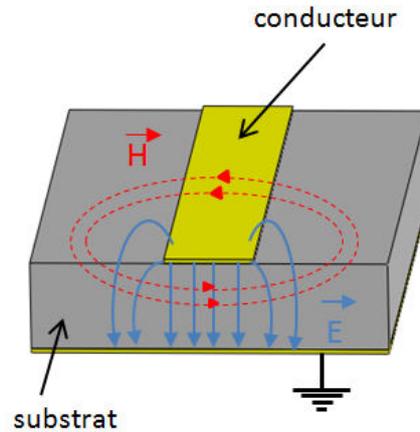


Figure I.10 : La ligne microruban.

Du fait de la simplicité du procédé de gravure qui lui est associé, la ligne microruban est la technologie planaire la plus utilisée dans la réalisation des différents dispositifs hyperfréquences. Elle permet un montage simple des éléments en série. Le report des éléments en parallèle nécessite la mise en place de trous métallisés entre le conducteur et le plan de masse amenant des effets parasites, ce qui constitue un inconvénient de cette technologie.

Dans le cas de la ligne microruban, la longueur d'onde dans le substrat est donnée par :

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\varepsilon_{eff}} \quad \text{Eq I.2}$$

λ_0 est la longueur d'onde dans le vide et ε_{eff} est la permittivité effective qui dépend de la permittivité relative ε_r du substrat, de la largeur w du conducteur et de la hauteur h du diélectrique (cf. Eq I.3 et Eq I.4) [6].

$$\frac{w}{h} < 1 : \quad \text{Eq I.3}$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{(\varepsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\varepsilon_r - 1)}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{w}\right)}} + 0.04 \left(1 - \left(\frac{w}{h}\right)\right)^2 \right]$$

$$\frac{w}{h} > 1 :$$

Eq I.4

$$\varepsilon_{eff} = \frac{(\varepsilon_r + 1)}{2} + \left[\frac{(\varepsilon_r - 1)}{2\sqrt{1 + 12\left(\frac{h}{w}\right)}} \right]$$

L'impédance caractéristique de la ligne microruban est définie à partir de la permittivité effective et des dimensions w et h (cf. Eq I.5 et Eq I.6).

$$\frac{w}{h} < 1 :$$

Eq I.5

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \ln \left(8 \left(\frac{h}{w} \right) + 0.25 \left(\frac{w}{h} \right) \right)$$

$$\frac{w}{h} > 1 :$$

Eq I.6

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}} \left[\frac{w}{h} + 1.393 + \frac{2}{3} \ln \left(\frac{w}{h} + 1.444 \right) \right]}$$

La figure I.11 [7] présente l'évolution de cette impédance caractéristique en fonction de la largeur de la ligne normalisée par rapport à l'épaisseur de substrat pour différentes valeurs de permittivité relative. Pour une valeur d'impédance caractéristique de 50Ω , la largeur de la ligne microruban est plus importante pour des valeurs de permittivité faibles.

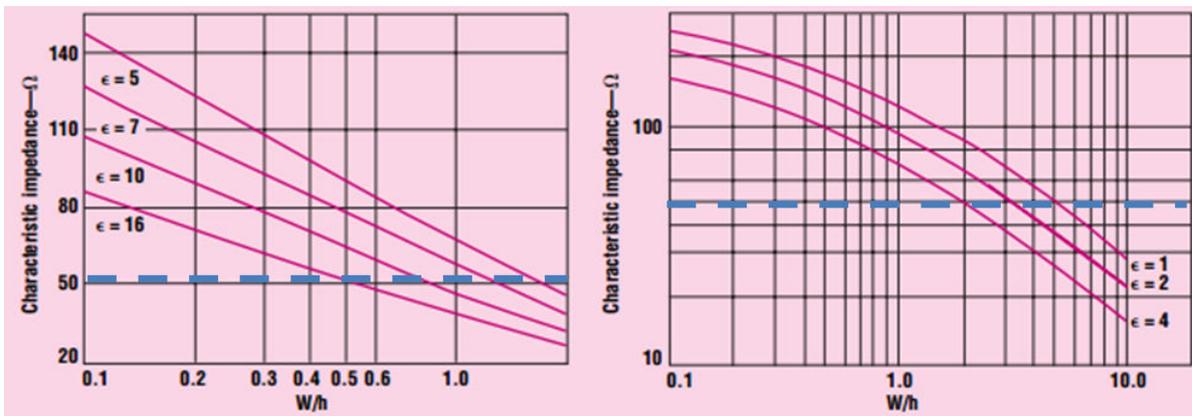


Figure I.11 : Evolution de l'impédance caractéristique de la ligne microruban en fonction du rapport w/h pour différentes constantes diélectriques [7].

La figure I.12 [8] présente un exemple de diagramme de dispersion du mode quasi-TEM et des deux modes hybrides supérieurs susceptibles de se propager dans une structure microruban.

Le mode quasi-TEM est le mode hybride fondamental HE_0 de fréquence de coupure nulle. Avec la montée en fréquence, les modes hybrides d'ordres supérieurs peuvent se propager dans le guide microruban. Leur propagation est facilitée par l'augmentation de l'épaisseur de substrat. Afin d'éviter l'apparition et la propagation de ces modes parasites, il est donc indispensable d'avoir des épaisseurs de substrat faibles à hautes fréquences. Il est par ailleurs à noter que pour des faibles valeurs de permittivité les structures microruban sont plus susceptibles de rayonner aux fréquences élevées. De la même manière, le rayonnement peut être réduit par la réduction de l'épaisseur de substrat.

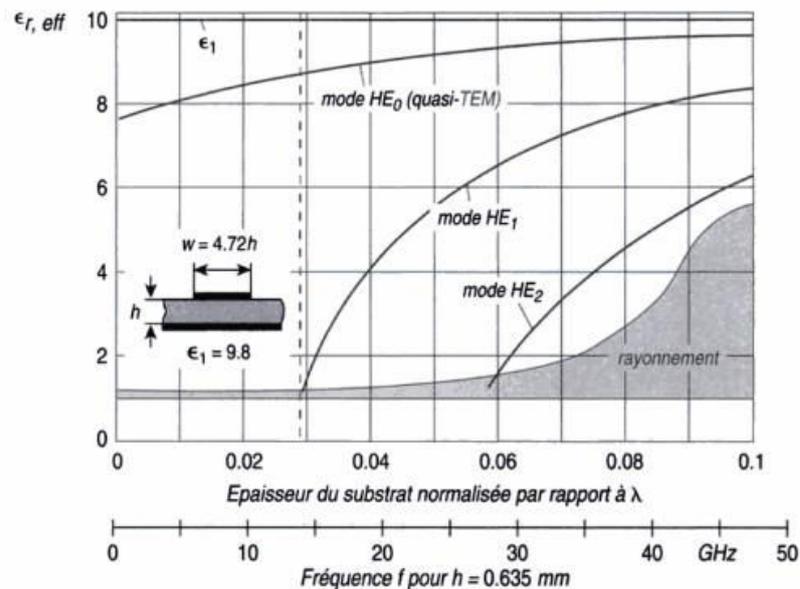


Figure I.12 : Exemple de diagramme de dispersion du mode quasi-TEM et des deux premiers modes hybrides supérieurs d'une ligne microruban [8].

- Le guide coplanaire « coplanar waveguide » :

Le guide coplanaire est constituée de deux plans de masses séparés par un conducteur le tout gravé sur la face supérieure du diélectrique. Les trois rubans métalliques sont séparés par des fentes de même largeur. Ce guide supporte deux modes :

- Le mode quasi-TEM qui est un mode impair peu dispersif (cf. figure I.13 (a)).
- Le mode TE qui un mode pair dispersif (cf. figure I.13 (b)).

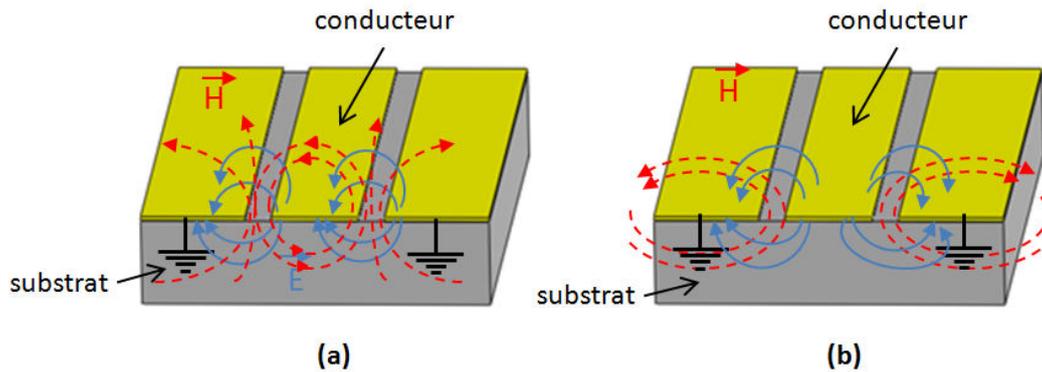


Figure I.13 : Guide coplanaire « coplanar waveguide » : (a) Mode quasi-TEM (b) Mode TE.

Du fait de la présence des plans de masse du même côté que le conducteur, le report des éléments en parallèle est plus facile dans le cas du guide coplanaire. Cependant, la présence du mode TE dispersif est gênante pour la propagation du mode quasi-TEM. Afin d'éliminer ce mode, l'usage est de relier les deux plans de masse par des fils de « *bonding* » ou bien par un pont à air pour les mettre au même potentiel.

- La ligne tri-plaque « *stripline* » :

Dans le cas de la technologie tri-plaque, la ligne est noyée dans un substrat délimité par deux plans de masse. Cette configuration permet la propagation du mode TEM non-dispersif. Comme dans le cas du guide coplanaire, un mode parasite est susceptible de se propager. Son élimination est assurée par la mise au même potentiel des deux plans de masse en ajoutant des trous métallisés pour les relier. Un des avantages majeurs de la ligne tri-plaque est la réduction notable des pertes par rayonnement. Cependant, cette technologie reste très couteuse et le report de composants sur ce type de structure n'est pas facile.

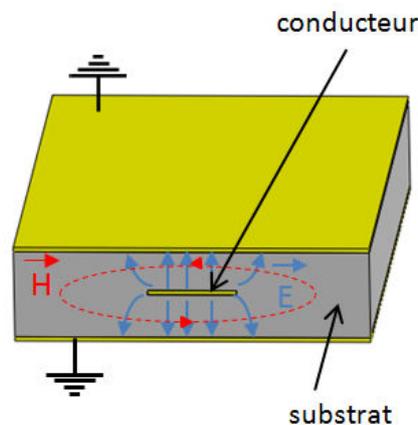


Figure I.14 : Ligne tri-plaque « *stripline* ».

- La ligne à fente «slotline» :

Dans le cas de la ligne à fente le diélectrique est recouvert sur une de ses surfaces par deux rubans métalliques séparés par une fente : un ruban correspondant au plan de masse et l'autre au conducteur. (cf. figure I.15).

Le mode se propageant le long d'une ligne à fente est un mode quasi-TE. Il se différencie du mode quasi-TEM principalement par : une concentration du champ au niveau de la fente, une extension latérale du champ dépendant de la fréquence avec une dispersion qui diminue aux fréquences élevées. Ces lignes sont souvent utilisées en complémentarité avec les lignes microruban. Elles permettent en effet d'obtenir des structures difficiles à réaliser en technologie microruban comme un court-circuit ou encore une ligne à haute impédance.

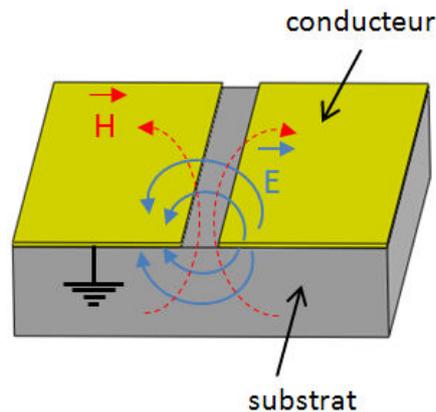


Figure I.15 : Ligne à fente "slotline".

1.7.1.2 Les principales topologies planaires

1.7.1.2.1 Filtres à lignes couplées

Il s'agit des topologies références en technologie planaire du fait de leur simple conception et de la facilité de leur réglage. Ils sont constitués de résonateur quart d'onde $\lambda/4$ couplés soit en parallèle soit en série (cf. figure I.16). Ces topologies sont utilisées pour réaliser des fonctions de filtrage avec des bandes passantes relatives inférieures à 20%. Les bandes passantes sont fixées à partir des couplages inter-résonateurs qui se traduisent physiquement par les largeurs S des fentes entre les lignes. La fréquence centrale est quant à elle fixée à partir de la longueur des tronçons de ligne. La principale limitation de la topologie des résonateurs en série réside dans les faibles couplages entre les résonateurs. La topologie en parallèle permet d'obtenir des couplages plus forts et d'aboutir ainsi à des bandes passantes

plus larges. La synthèse du filtre à lignes couplées avec les deux types de topologies est détaillée dans [9].

La figure I.17 [10] présente l'exemple d'un filtre à lignes couplées en parallèle conçu pour avoir une fréquence centrale à 60 GHz. Le substrat utilisé est le Rogers 5880 Duroid de permittivité $\epsilon_r = 2,2$. Une épaisseur de substrat relativement faible (254 μm) est privilégiée afin de réduire les pertes par rayonnement et éviter la propagation des modes parasites d'ordres supérieurs. La réponse du filtre mesurée montre des performances limitées notamment en termes de pertes par insertion (aux alentours de 2 dB). Un décalage fréquentiel important est par ailleurs observé. Ce décalage est dû à une forte sensibilité aux tolérances de fabrication aux fréquences millimétriques.

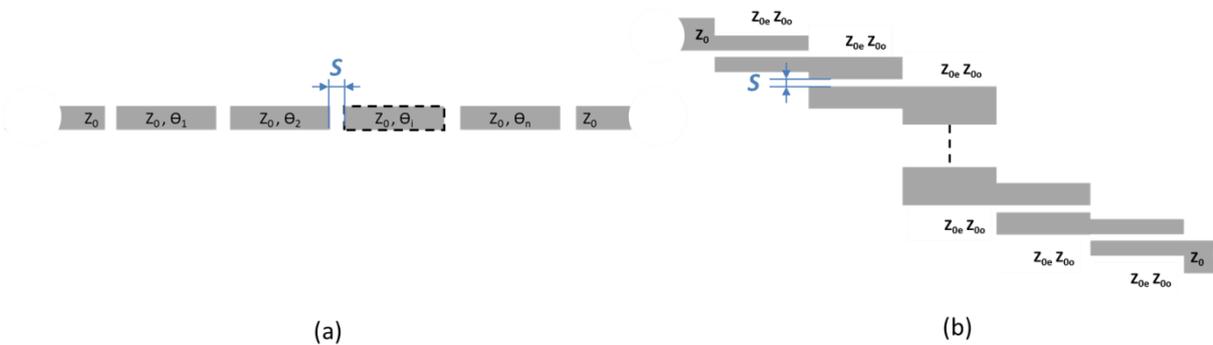


Figure I.16 : Filtre à lignes couplées : (a) résonateurs en série (b) résonateurs en parallèle

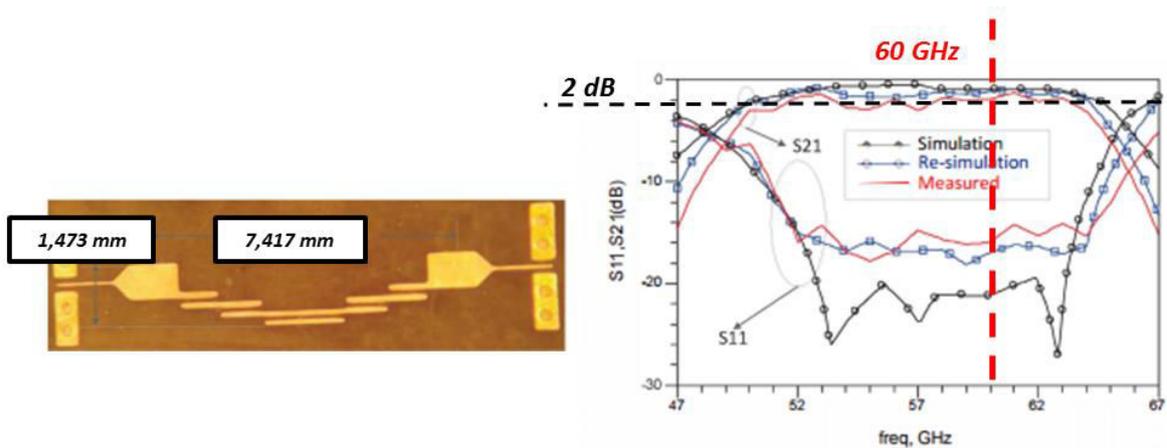


Figure I.17 : Exemple de filtre à lignes couplées en parallèle fonctionnant en bande V [10].

1.7.1.2.2 Filtre « Hairpin »

Pour des ordres de filtre importants, la topologie à lignes couplées devient assez encombrante. Afin de miniaturiser ces structures, Cristal et Frankel ont imaginé une topologie avec un moindre encombrement qui consiste à replier les résonateurs en forme de « U » (cf. figure I.18). Il s'agit des résonateurs « Hairpin » ou « épingle à cheveux » [11].



Figure I.18 : Filtre à résonateurs "Hairpin".

La figure I.19 [12] présente l'exemple d'un filtre « Hairpin » fonctionnant à 41 GHz. Le filtre est également réalisé sur le Rogers 5880 Duroid ($\epsilon_r = 2,2$ et $\tan \delta = 0,0009$) et d'une épaisseur de 137 μm . Les pertes d'insertion pour deux prototypes réalisés sont supérieures à 3 dB (3,5 dB pour le premier et 3,9 dB pour le deuxième). La bande passante du filtre est élargie de 1 GHz par rapport à la réponse simulée décalant la fréquence centrale à 41,5 GHz.

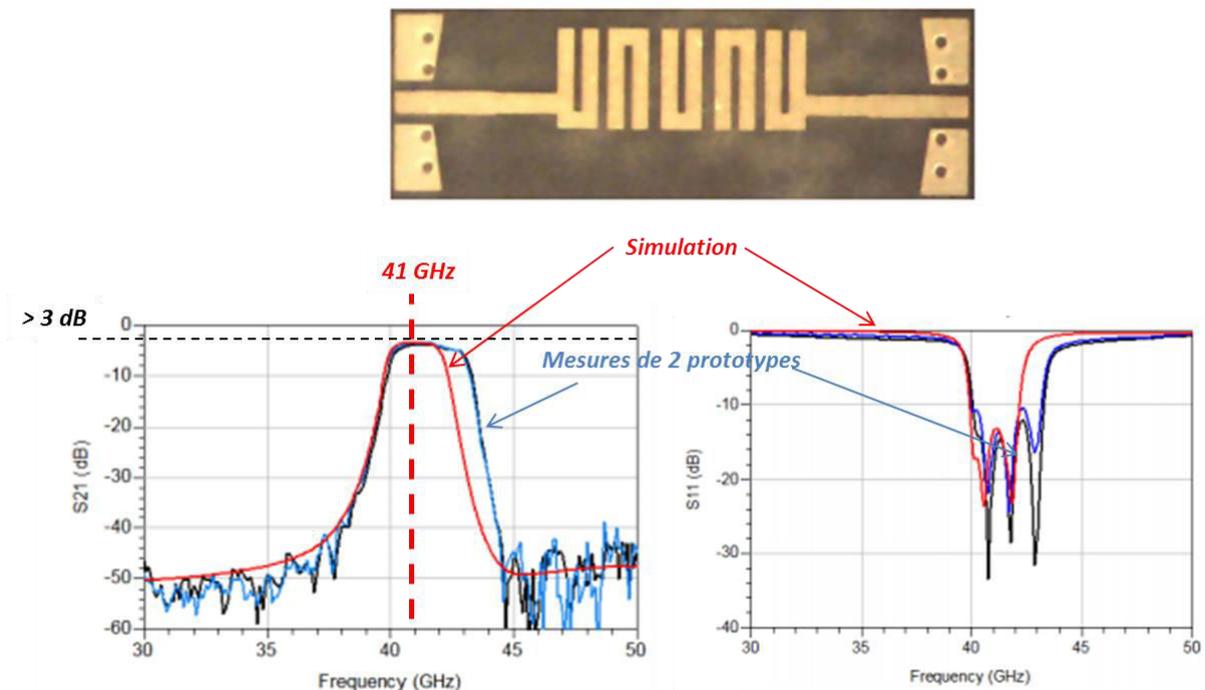


Figure I.19 : Exemple de filtre "Hairpin" fonctionnant en bande Q [12].

1.7.1.2.3 Filtre DBR «Dual Behavior Resonator»

Le filtre DBR « Dual Behavior Resonator » développé par Quendo et al [13] est basé sur un comportement dual qui permet de contrôler séparément la bande passante et la bande

atténuée. Chaque résonateur exploite la recombinaison constructive entre deux stubs coupe-bande introduisant deux zéros de transmission de part et d'autre de la résonance. Les couplages inter-résonateurs sont assurés par des lignes quart d'onde (cf. figure I.20). La principale limitation des structures DBR est la génération de remontées hors-bande. Une méthode permettant la suppression de ses remontées parasites consiste à intégrer des filtres passe-bas entre deux résonateurs. La fonction de filtrage passe-bas est réalisée grâce à un stub terminé par un circuit-ouvert. La figure I.21 [14] présente les structures du filtre DBR initial et celle avec les segments passe-bas.



Figure I.20 : Filtre DBR "Dual Behavior Resonator".

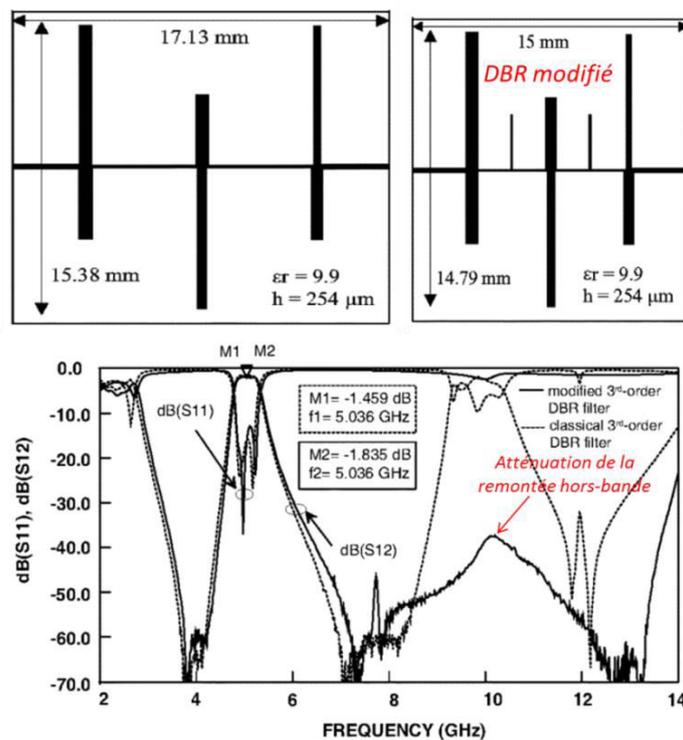


Figure I.21 : Exemple de filtre DBR avec des segments passe-bas pour la suppression de remontées hors-bande [14].

I.7.2 Filtres volumiques

Les faibles facteurs de qualité des technologies planaires limitent leurs performances en bandes centimétriques et millimétriques. Les structures volumiques profitent de très bons facteurs de qualité offrant ainsi des performances électriques appréciées à hautes fréquences raison pour laquelle ils sont largement utilisés pour des applications spatiales. Ces structures présentent néanmoins des tailles et des masses qui les rendent encombrantes et difficiles à embarquer dans les charges utiles des satellites. Plusieurs travaux se sont intéressés à la réduction de leurs poids comme par exemple la substitution de matériaux lourds comme l'aluminium par du Kevlar plus léger [15]. Parmi les structures de filtrage volumiques utilisées dans les satellites, il y a :

- Les filtres à cavités métalliques : Il s'agit d'un guide dont les cavités (rectangulaires ou cylindriques) sont délimitées par des iris assurant un couplage inductif inter-résonateurs. Au cours de la conception, il faut envisager des solutions de post-réglages pour à la fois la bande passante et la fréquence centrale du filtre. Le réglage se fait séparément sur chaque cavité souvent en insérant des vis au centre de celles-ci (cf. figure I.22 [16]).

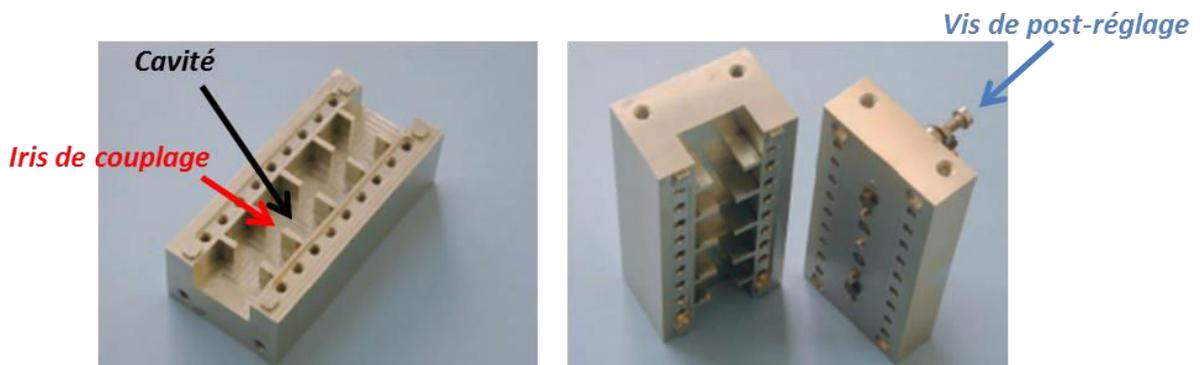


Figure I.22 : Exemple de filtre à cavités métalliques rectangulaires développé à l'ESA [16].

- Les filtres Plan E : Les filtres Plan E dont le schéma de principe est représenté sur la figure I.23 emploie des inserts métalliques (discontinuité à plan E) au milieu d'un guide d'onde classique pour établir les couplages inter-résonateurs. Ces structures sont abondamment utilisées dans les bandes microonde et millimétrique du fait de leur simple réalisation. Il suffit en effet de réaliser deux blocs identiques et de les assembler en introduisant l'insert métallique entre les deux.

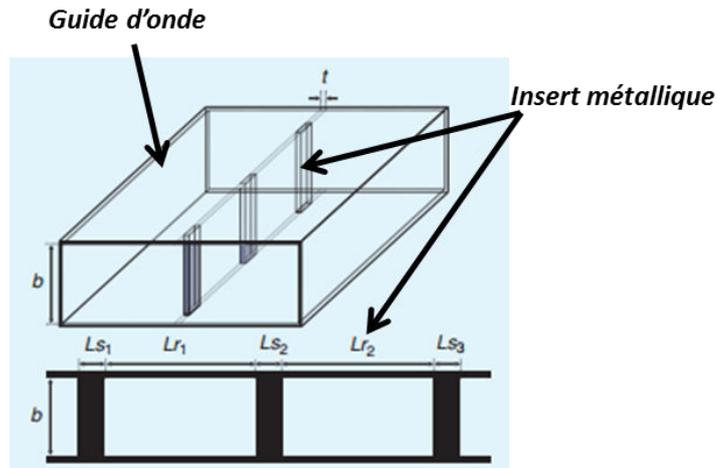
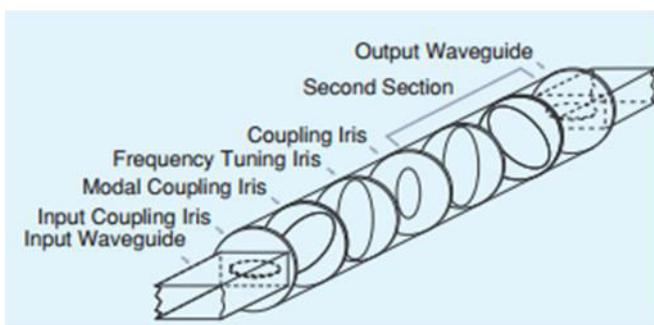


Figure I.23 : Schéma de principe du filtre Plan E [16].

- Les filtres à cavités bi-modes : Dans ces structures, chaque résonateur supporte deux modes dégénérés divisant ainsi par deux le nombre de cavités d'un filtre monomode standard. La figure I.24 [16] présente l'exemple d'un filtre d'ordre 4 ayant deux cavités bi-modes. Le couplage entre les cavités est fait par l'intermédiaire d'un iris. Au sein de chaque cavité deux autres iris sont utilisés : un pour le couplage modal et un pour le réglage de la fréquence de résonance. Le post-réglage sur ces structures est délicat affectant souvent leur tenue en puissance et leurs performances.



(a)



(b)

Figure I.24 : Filtre à cavités bi-modes (a) Schéma de principe pour un guide circulaire (b) Photographie du filtre [16].

I.7.3 Filtres SIW

Malgré les efforts faits pour réduire l'encombrement des structures volumiques. Leur intégration dans des circuits hybrides majoritairement planaires reste compliquée. Les guides SIW « Substrate Integrated Waveguide » ont été proposés par Ke Wu et Deslandes [17]. Il s'agit d'intégrer des guides d'onde dans des substrats planaires. L'objectif est de profiter de cavités enterrées dans des substrats classiques, pour obtenir des facteurs de qualités élevés tout en gardant une compatibilité avec les autres circuits planaires d'un système, pour en faciliter les interconnexions. Les guides SIW sont classiquement réalisés par une rangée de trous métallisés enterrés dans un substrat couvert par deux plans métalliques confinant l'onde électromagnétique. Les diamètres ainsi que l'espacement des trous métallisés sont définis afin de se rapprocher le plus possible d'un mur électrique parfait empêchant les fuites EM (cf. figure I.25 [18]). Cette configuration est à privilégier dans le cas des circuits MMIC où les différents dispositifs sont réalisés sur le même substrat. Pour un circuit hybride MIC, les rangées de vias peuvent être remplacées par de simples plans métalliques sur les faces latérales du substrat.

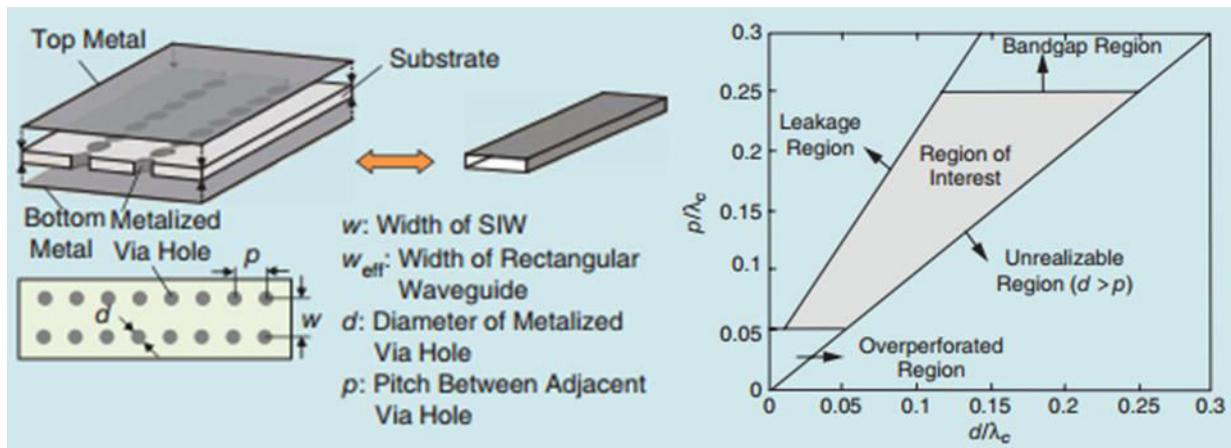


Figure I.25 : Dimensionnement d'un guide SIW [18].

Les figures I.26 [19] et I.27 [20] présentent deux filtres SIW développés au Lab-STICC. Le premier est un filtre en bande Ku réalisé avec des cavités circulaires. Le couplage entre les résonateurs est fait grâce à des iris. Un couplage croisé de nature électrique est introduit entre les deux cavités aux accès par l'intermédiaire d'une ligne coplanaire. Ce couplage permet de rajouter un zéro de transmission améliorant la réjection hors-bande. Le deuxième filtre est un filtre à plots inductifs en bande C. Il est replié de telle sorte à simplifier les couplages croisés entre les cavités non-adjacentes. Bien que compact, ce filtre reste très

encombrant aux faibles fréquences. Dans [21], la miniaturisation est assurée par l'usage d'une céramique à forte permittivité ($\epsilon_r = 90$) (cf. figure I.28).

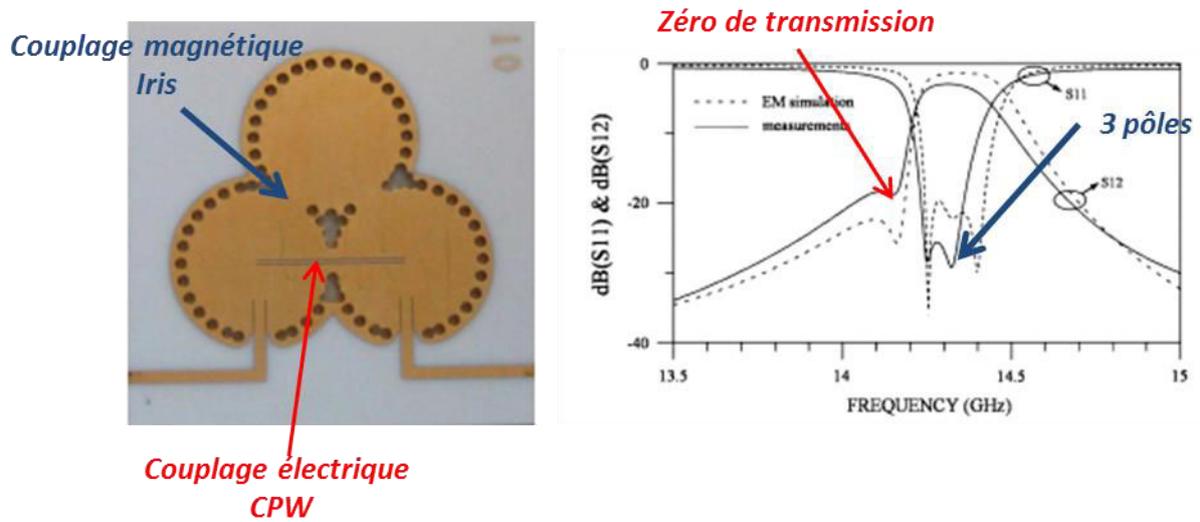


Figure I.26 : Filtre SIW en bande Ku avec une topologie à cavités cylindriques [19].

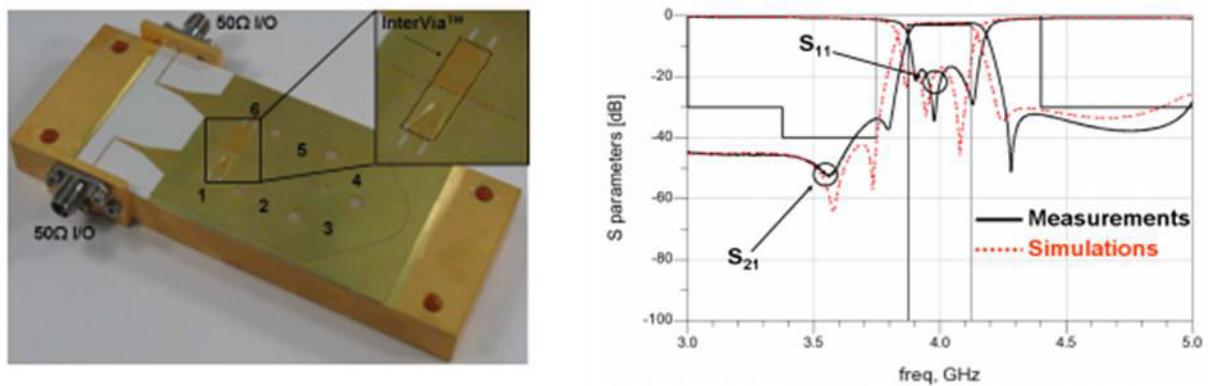


Figure I.27 : Filtre SIW à plots inductifs replié [20].

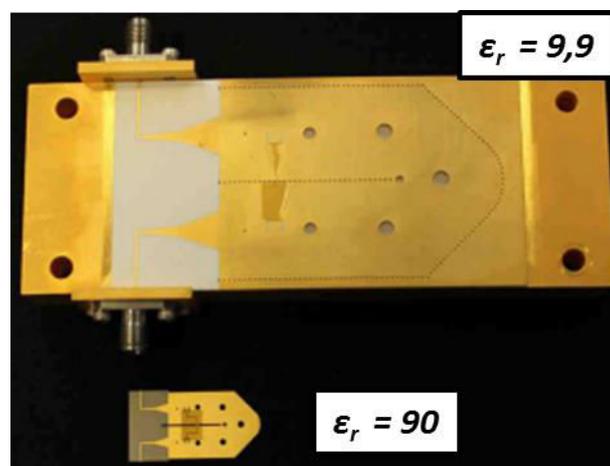


Figure I.28 : Miniaturisation du Filtre SIW en bande C en utilisant un substrat à forte permittivité [21].

La transition à base de taper microruban [22] est souvent utilisée pour l'intégration des structures SIW dans des circuits planaires et ceci pour différentes raisons : l'usage fréquent des lignes microruban pour assurer l'interconnexion entre les différents dispositifs d'un circuit hyperfréquence, la largeur de bande assurée par cette transition en comparaison avec les autres transitions et la simplicité de son design et de sa réalisation. Elle permet le passage du mode quasi-TEM se propageant le long de la ligne microruban au mode fondamental TE_{10} du guide SIW (cf. figure I.29 [22]). Les paramètres w et l de la transition sont définis de telle sorte à assurer l'adaptation d'impédance entre l'impédance de la ligne microruban et l'impédance du mode TE_{10} dans le guide. La longueur l est fixée à $\lambda/4$ afin de minimiser les pertes par réflexion. La valeur de w optimale est obtenue par la résolution de l'équation Eq I.7 [22].

$$\frac{120\pi}{377h \left(\frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{w}{h} + 1.444 \right) \right)} = \frac{4.38}{a_e} e^{-\frac{0.627\varepsilon_r}{\varepsilon_{eff}}} \quad \text{Eq I.7}$$

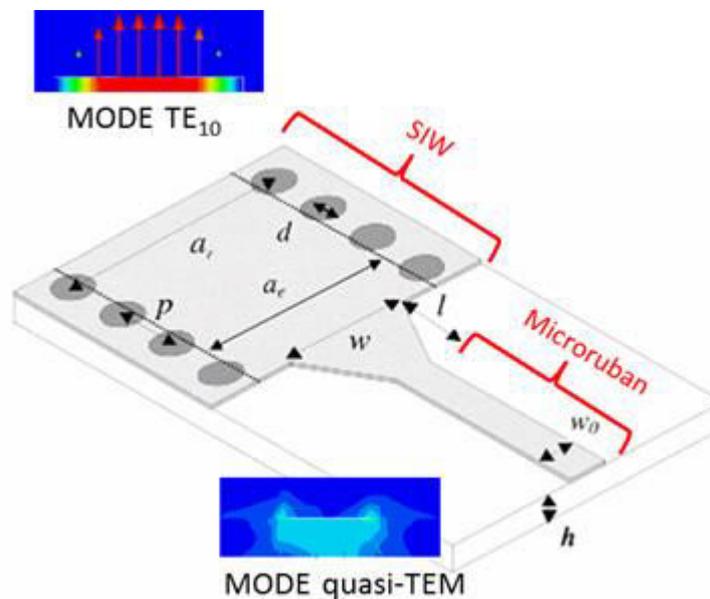


Figure I.29 : Transition conventionnelle à base de taper [22] .

Le paramètre limitant pour la transition conventionnelle de la figure I.29 comme pour la technologie microruban est l'épaisseur de substrat. Pour les cavités SIW, ce paramètre est important quant à leurs performances.

Dans [23], les variations du facteur de qualité du mode TE_{101} résonant dans une cavité SIW en fonction des caractéristiques du substrat (hauteur, tangente de perte, permittivité) sont présentées. Le facteur de qualité est déterminé grâce à une technique de couplage en réflexion présentée dans [24] pour une résonance du mode TE_{101} à 25 GHz simulée sous HFSSTM. La figure I.30 présente la variation du facteur de qualité en fonction de l'épaisseur du substrat pour deux tangentes de pertes différentes ($\epsilon_r = 2,2$) d'une part (a) et pour deux valeurs de permittivité différentes d'autre part (b). Ces courbes sont ensuite comparées à celle obtenue pour une cavité métallique (c) et à celle obtenue pour un résonateur microruban (d).

Ces graphes montrent que contrairement à un résonateur microruban, le facteur de qualité d'une cavité SIW augmente avec l'épaisseur de substrat. De plus, à des fréquences relativement élevées, il faut choisir des substrats de faibles tangentes de pertes et de faibles constantes diélectriques pour obtenir de meilleures performances.

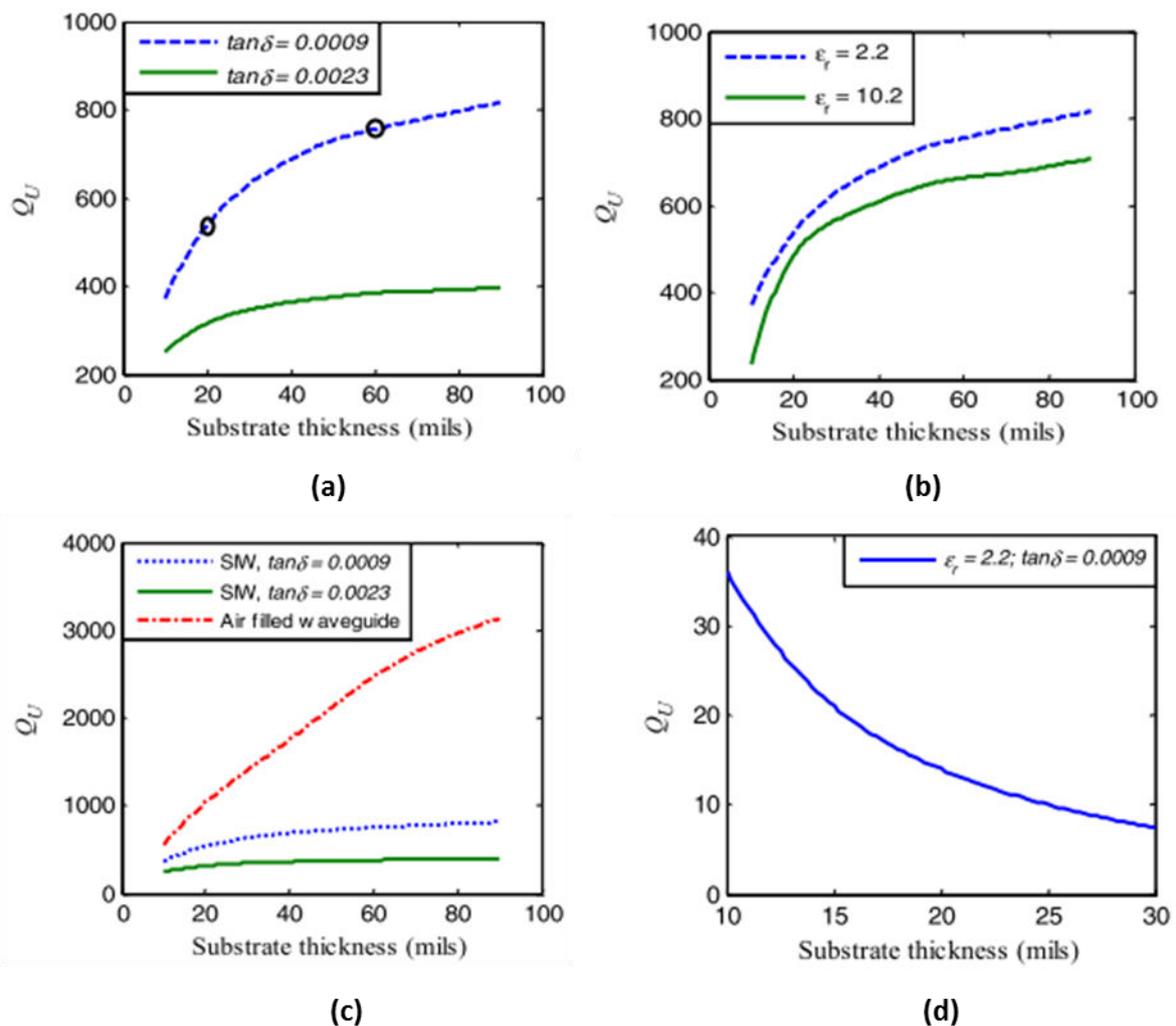


Figure I.30 : Evolution du facteur de qualité à 25 GHz en fonction de l'épaisseur de substrat pour : (a) une cavité SIW avec différentes tangentes de pertes, (b) une cavité SIW avec différentes permittivités du substrat, (c) des cavités SIW et une cavité métallique, (d) une ligne microruban [23].

I.8 Les besoins de filtrage identifiés en bandes Q et V

Pour les prochaines générations des convertisseurs de fréquence, les besoins de filtrage identifiés sont les suivants :

I.8.1 Facteur de qualité élevé

La figure I.31 [18] présente les ordres de grandeur de facteurs de qualité pour différents types de résonateurs évalués à 5 GHz. Les résonateurs planaires (microruban) présentent des facteurs de qualités faibles ($Q = 50 - 200$) se traduisant par de fortes pertes d'insertions sur la réponse du filtre. Ces technologies ne permettent pas de répondre aux besoins accrues de performances des solutions de filtrage envisagées. Les résonateurs volumiques (résonateurs diélectriques ou guides d'ondes) présentent des facteurs de qualité élevés ($Q > 1000$). Ils ont néanmoins l'inconvénient d'être encombrants et difficilement intégrables dans des environnements majoritairement planaires.

La technologie SIW « Substrate Integrated Waveguide » a été proposée par Deslandes et al [17] afin d'assurer un compromis entre intégrabilité et performances. Le principe de base du SIW est d'intégrer un guide volumique dans un substrat planaire ce qui permet de profiter à la fois des bons facteurs de qualité des modes volumiques se propageant dans le substrat et d'une intégrabilité facile dans des circuits planaires. Les structures SIW peuvent atteindre des facteurs de qualité de l'ordre de 1000 soit cinq fois le facteur de qualité atteignable par un dispositif microruban.

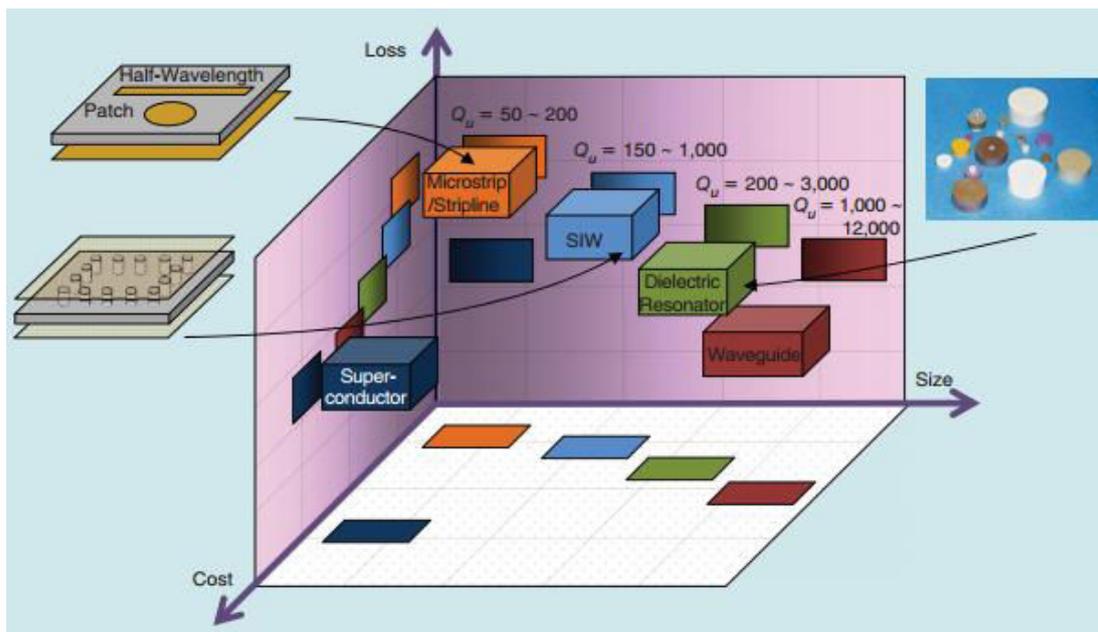


Figure I.31 : Ordres de grandeur de facteurs de qualités pour différents types de résonateurs hyperfréquences [18].

1.8.2 Intégrabilité dans un circuit intégré microonde

La charge utile d'un satellite de télécommunications regroupe un certain nombre de modules RF devant être intégrés dans un même circuit. Les circuits *MIC* « *Microwave Integrated Circuit* » et les *MMIC* « *Monolithic Microwave Integrated Circuit* » sont communément utilisés dans les applications spatiales. Ils coexistent au sein de systèmes hybrides permettant une intégration peu encombrante et des reports simples des différents modules. Les *MIC* sont constitués de lignes de transmission gravées sur le substrat support sur lesquelles des composants actifs et passifs de différents substrats sont reportés. Pour les *MMIC*, plus coûteux, les composants actifs et passifs et les interconnexions sont réalisés sur un même substrat semi-conducteur présentant de meilleures performances.

1.8.2.1 Circuits intégrés en technologie hybride

L'intégration hybride consiste à assembler sur un même support un ensemble de composants montés avec différentes techniques d'intégration. Elle se fait grâce à des lignes de transmission planaires gravées sur un substrat, généralement une céramique, sur lequel les composants actifs et passifs sont soit gravés, soit reportés par des techniques de brasage ou de collage suivies de câblage filaire « *wire bonding* ». La figure I.32 présente un exemple d'intégration d'amplificateurs *MMIC* dans un circuit hybride [25]. Les amplificateurs sont liés à leur accès à des lignes microruban d'impédance caractéristique $50\ \Omega$ par l'intermédiaire de 2 fils de « *bonding* ». L'impédance caractéristique de $50\ \Omega$ est choisie comme standard par les concepteurs de circuits afin de réaliser les lignes permettant le guidage du signal entre les différents composants. Les pads situés aux accès des lignes microruban servent de motifs de compensation des fils de « *bonding* ».

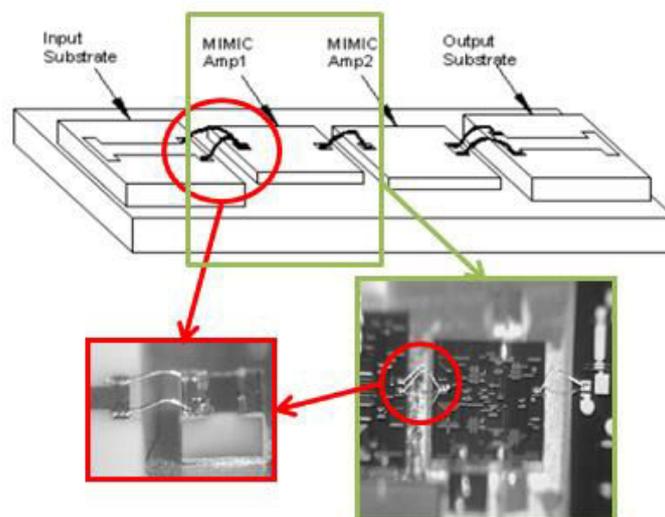


Figure I.32 : Exemple d'intégration de composants dans un circuit hybride [25].

Il existe deux familles de circuits hybrides :

- Les circuits hybrides à couches épaisses :

Ces circuits présentent de bonnes performances pour des fréquences allant jusqu'à 10 GHz. Ils sont réalisés par des techniques de sérigraphie suivies de traitements thermiques. Les motifs de métallisation utilisés pour ce type de technologie sont relativement épais (10 à 50 μm) d'où l'appellation couches épaisses.

- Les circuits hybrides à couches minces :

Utilisés pour les fréquences millimétriques, ces circuits sont plus répandus dans les applications spatiales.

Pour ce type de technologie, le substrat utilisé traditionnellement est l'alumine Al_2O_3 à 99%. D'autres matériaux peuvent être utilisés comme la Silice fondue SiO_2 ou encore le Quartz. Les couches de métallisation minces dans ce cas (quelques micromètres) sont déposées le plus souvent par pulvérisation cathodique. Pour des couches plus épaisses, il est nécessaire par la suite de passer par une étape de croissance soit par électrolyse soit par autocatalyse grâce à un processus chimique. Ces étapes technologiques sont plus amplement expliquées dans le chapitre II.

La figure I.33 présente un exemple de motifs réalisés par une technique couches minces [26].

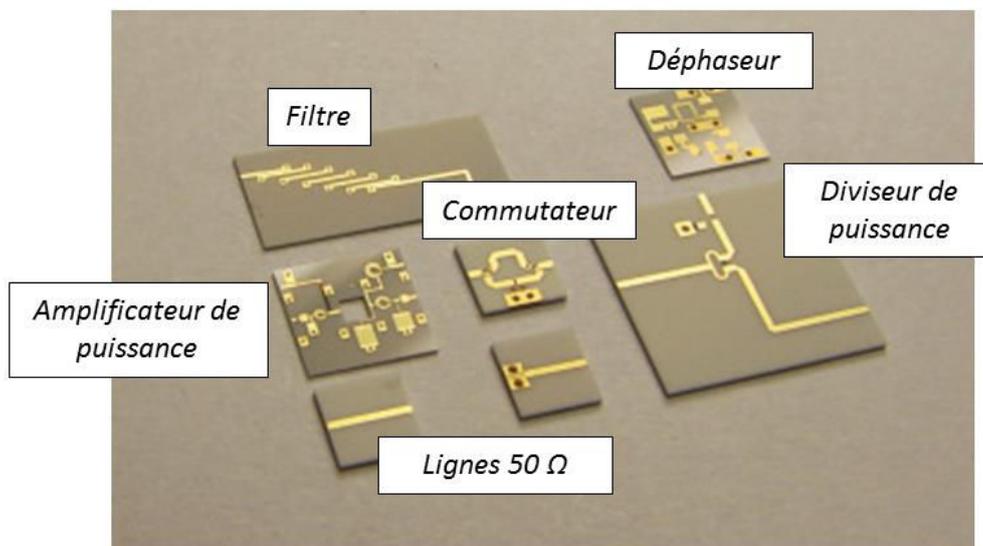


Figure I.33 : Exemples de motifs réalisés par une technique couches minces [26].

1.8.2.2 Interconnexions par fils de « bonding »

Le câblage filaire « *wire bonding* » est une technique d'interconnexion largement utilisée dans les circuits intégrés hybrides. Sa popularité est due à son faible coût et la flexibilité de son usage. Avec la montée en fréquence, les fortes inductances des fils de « *bonding* » entraînent des effets parasites importants ainsi que des problèmes d'adaptation d'impédance. La figure I.35 [27] présente l'exemple d'un câblage type « *bonding* ». Le fil en or considéré a un diamètre égal à $25\ \mu\text{m}$ et une longueur minimale de $480\ \mu\text{m}$. La valeur de l'inductance parasite augmente avec à la fois l'élévation de la fréquence et le rallongement du fil.

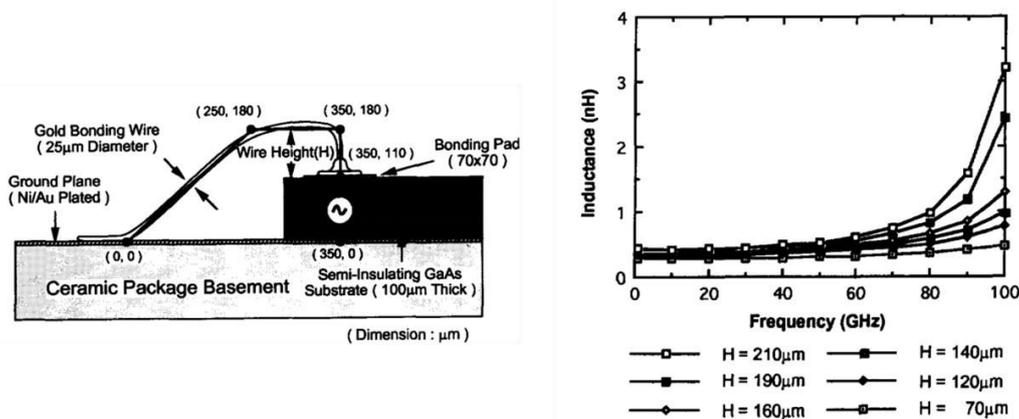


Figure I.35 : Exemple de câblage filaire type "bonding" et évolution de l'inductance parasite associée [27].

Plusieurs méthodes permettent de diminuer les effets inductifs parasites liés aux interconnexions de « *bonding* ». Parmi ces méthodes, l'usage de plusieurs fils est la plus répandue.

La figure I.36 (b) [28] permet de constater une diminution notable des réflexions indésirables pour des interconnexions à deux fils de « *bonding* ». Pour ce type d'interconnexion, plus l'espacement entre les fils se rapproche de la largeur de la ligne microruban sur laquelle ils sont reportés plus leur inductance mutuelle diminue (cf. figure I.36 (c)). Une autre méthode consiste à rapprocher les différents circuits afin d'utiliser des fils moins longs avec des inductances plus faibles et plus faciles à compenser.

La compensation se fait généralement à l'extrémité des lignes d'accès par l'intermédiaire de pads capacitifs. L'ensemble {fils + pads de compensation + lignes d'accès} peut être modélisé par le circuit de la figure I.37. La compensation par des capacités permet de former un filtre passe bas avec l'inductance du « *bonding* ». La valeur de la capacité est

choisie de telle sorte à avoir la fréquence de coupure la plus haute possible. Dans [29], des lignes interconnectées par deux fils de « bonding » espacés de 100 μm sont simulés avec le logiciel EMDS d'Agilent pour différentes longueurs de câblage (cf. figure I.38). Ce résultat justifie la nécessité de raccourcir les fils afin de réaliser une compensation efficace avec un simple pad capacitif. Ceci est d'autant plus important que les fréquences de travail sont élevées.

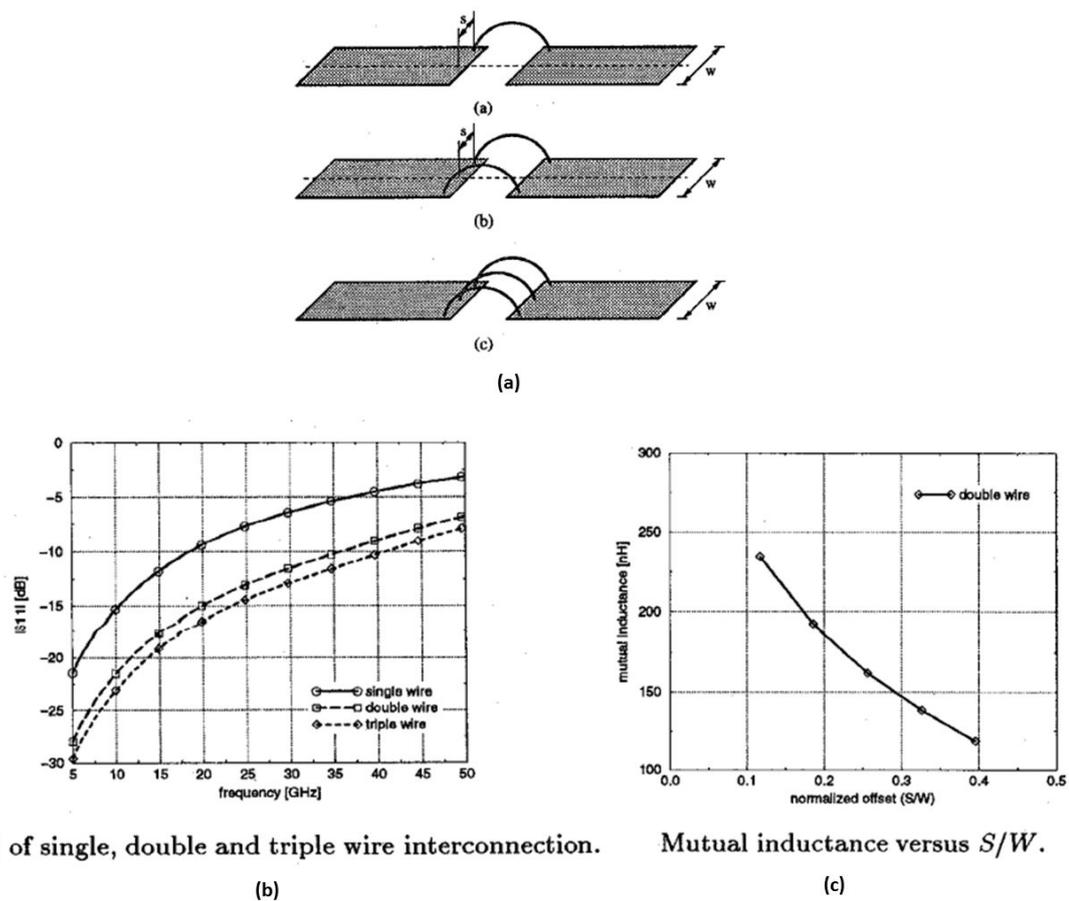


Figure I.36 : [28] (a) Câblages de type « bonding » à 1, 2 et 3 fils
 (b) Paramètres S11 des câblages à 1,2 et 3 fils
 (c) Evolution de l'inductance mutuelle pour un câblage à 2 fils en fonction du rapport espacement des fils / largeur de la ligne microruban

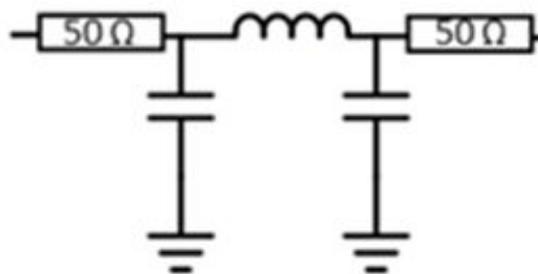


Figure I.37 : Circuit équivalent de l'ensemble {fils de "bonding"+ pads de compensations + lignes d'accès} représenté sur le logiciel ADS d'Agilent.

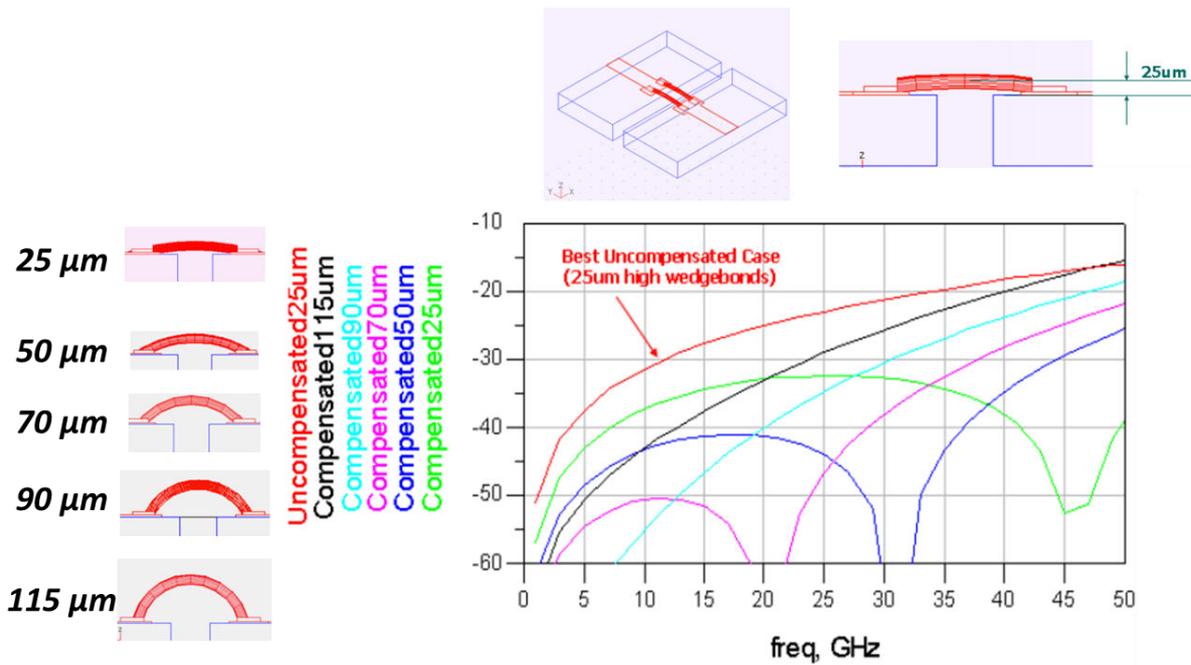


Figure I.38 : Simulations EMDS (Agilent) de deux lignes microruban interconnectées par un câblage à 2 fils de "bonding" [29].

1.8.3 Stabilité en fréquence et précision de fabrication

La stabilité en fréquence et la précision de fabrication sont liées au choix du substrat et au choix des procédés adoptés pour la réalisation. Ils sont d'autant plus importants que la taille de la structure est petite. Les substrats utilisés doivent avoir des propriétés diélectriques stables en fréquence et en température pour ne pas affecter la réponse du filtre. L'alumine Al_2O_3 est largement utilisée dans les applications spatiales. En plus de ses propriétés électriques et thermiques intéressantes, elle présente une bonne stabilité en température aux fréquences millimétriques.

Les procédés de fabrication doivent avoir des résolutions suffisamment petites pour respecter au mieux les détails géométriques de la structure de filtrage à réaliser. Les écarts dimensionnels lors de la fabrication affectent la réponse du filtre. Les tolérances définies à l'étape de conception sont étroitement liées aux longueurs d'ondes adressées et aux topologies de filtrage. Elles définissent les précisions à avoir lors de l'étape de réalisation du circuit. Plusieurs méthodes permettent de fixer les écarts de fabrication n'affectant pas la réponse du filtre. La méthode la plus simple consiste à considérer lors de l'étape de conception des écarts sur les différentes dimensions de la structure et à évaluer l'impact de ces écarts sur la réponse du filtre. Les écarts admissibles sont ceux qui permettent de garder une réponse de filtrage répondant au cahier des charges mis en place lors de la définition du besoin.

La figure I.39 [30] présente les résultats d'une analyse de sensibilité réalisée sur un filtre SIW (a) et un filtre à lignes couplées (b) aux performances comparables. Les courbes de simulation sont obtenues pour des écarts dimensionnels de $\pm 50 \mu m$ sur les positions des iris de couplage dans le cas du filtre SIW et sur les fentes interlignes dans le cas du filtre à lignes couplées. La forte sensibilité aux marges dimensionnelles constitue un inconvénient des structures planaires les rendant peu attrayantes pour des applications à des fréquences millimétriques.

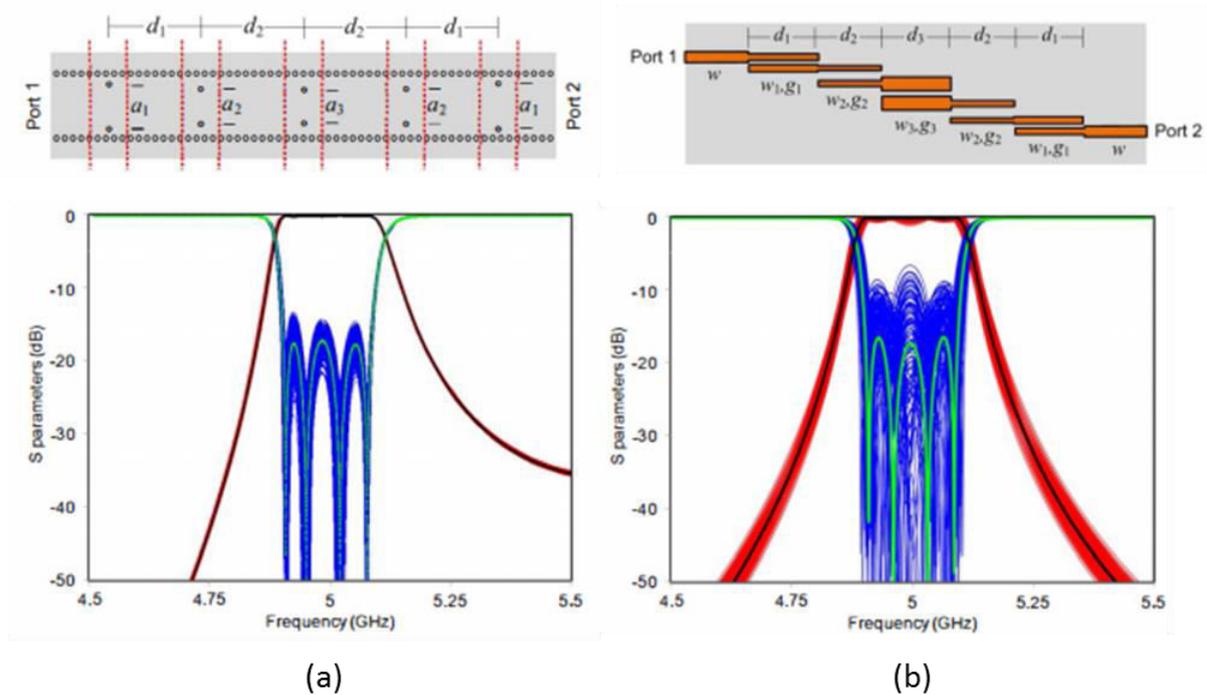


Figure I.39 : Analyse de sensibilité (a) filtre SIW à iris inductifs (b) filtre à lignes couplées [30].

1.9 Tests de qualification d'un satellite

Avant la mise en orbite, un satellite est soumis à un ensemble de tests de qualification pour assurer sa capacité de survie lors du lancement, du déploiement et de la réalisation de sa mission à long terme. Ces tests englobent des tests de vibrations, des tests thermiques ainsi que des tests d'intégration et de compatibilités électrique et électromagnétique des équipements. De même, tout composant électronique utilisé dans les équipements doit faire l'objet de tests de qualification.

1.9.1 Tests de vibrations et de chocs mécaniques

Pour un satellite, les sollicitations mécaniques se produisent lors de son lancement puis de sa mise en orbite et pendant toute sa durée de vie. Il existe différents environnements

mécaniques (Vibrations, chocs, accélérations, bruit). Les tests de qualification ont en particulier pour but de vérifier la robustesse de l'équipement face à ces différents environnements. Parmi les tests de vibrations les tests plus courants sont :

- les tests d'accélérations constantes : Ces tests simulent les accélérations induites par la poussée.
- les tests de vibrations dites « sinus » : Ces tests simulent l'effet POGO responsable de la destruction de plusieurs fusées et satellites. Cet effet est dû aux oscillations de poussée du moteur qui engendrent des vibrations au niveau des pompes et des réservoirs à carburant liquide se répercutant sur l'alimentation du moteur. Ces tests sont effectués sur des plages fréquentielles à des fréquences inférieures à 100 Hz.
- les tests de vibrations aléatoires : Ces tests simulent les effets des ondes acoustiques se propagent dans les équipements. Le satellite est sujet à des excitations simultanées à toutes les fréquences dans une bande passante donnée pour des fréquences inférieures à 2000 Hz.
- les tests de vibrations acoustiques : Ces tests simulent les phénomènes vibratoires dus au bruit du moteur et à l'écoulement aérodynamique.
- les tests de chocs mécaniques : Ces tests simulent les régimes transitoires produits par l'allumage des propulseurs et des différents éléments pyrotechniques. L'évaluation des chocs se fait à l'aide d'un spectre de réponse au choc ou SRS (« Shock Response Spectrum »). La forme de choc classiquement utilisée est une demi-sinusoïde d'amplitude et de durée bien déterminées.

À l'échelle du composant électronique, les tests mécaniques portent essentiellement sur le mode de report (colle ou brasure) du composant et sur la résistance des matériaux utilisés aux contraintes vibratoires et aux chocs. En ce qui concerne le mode de report, les tests de qualification se font sur un sous-ensemble de composants montés sur un circuit appelé véhicule test. Ce circuit subit des sollicitations mécaniques et thermomécaniques.

- Les sollicitations mécaniques : Dans ce cas le véhicule test subit des vibrations à différentes fréquences avec une accélération crête de 50 g typiquement pour les axes (x, y) parallèles au plan de report et de 110 g pour l'axe perpendiculaire (z). En plus des vibrations, le circuit subit des chocs avec des

accélérations allant de 150 g à 3000 g pendant 0,5 ms suivant les 3 axes (g étant l'accélération de la pesanteur).

- Les sollicitations thermodynamiques : il s'agit de qualifier les déformations subies par le montage suite à une variation rapide de la température entre froid et chaud, typiquement entre -55°C et 125°C . Ceci se fait en plusieurs cycles (entre 200 et 500) et s'attaquent essentiellement aux déformations aux niveaux du collage, de l'adhérence de métallisation et du câblage filaire.

Le tableau (b) de la figure I.40 [31] présente un exemple de sollicitations basses fréquences appliquées pour deux types de report différents.

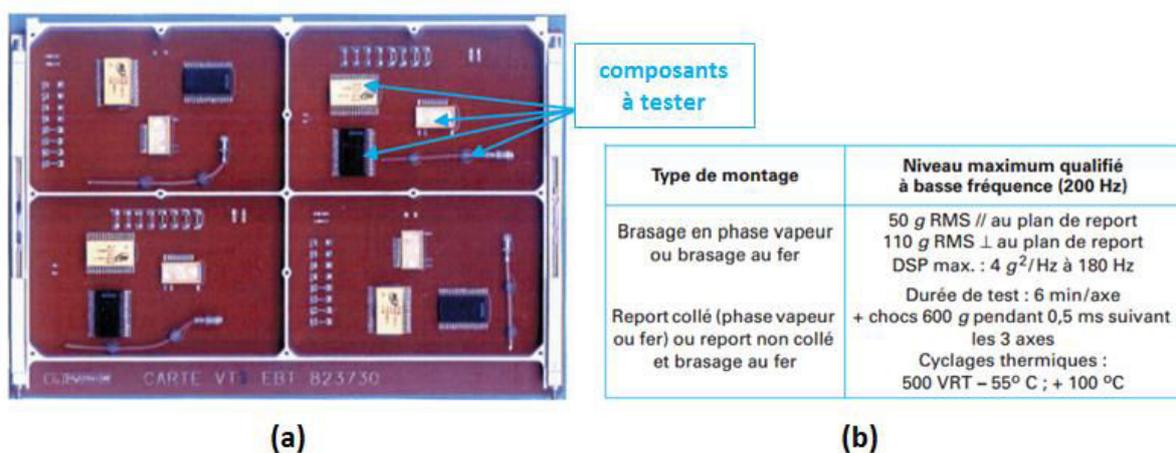


Figure I.40 : Sollicitations mécaniques appliquées aux composants électroniques [31] :
(a) Exemple de véhicule test
(b) Exemple de test de qualification de montages dans des environnements mécanique et thermomécanique

I.9.2 Analyses thermiques

L'analyse thermique a pour but de vérifier les spécifications de température des différents équipements du satellite et de prévoir une architecture optimale pour la dissipation de la chaleur ainsi que des solutions de contrôle thermique pour maintenir un équilibre adiabatique des équipements avec leur environnement aussi bien interne qu'externe au satellite.

À l'échelle des cartes électroniques situées au niveau de la charge utile, les flux thermiques doivent être dissipés (par conduction ou par rayonnement) pour éviter la dégradation et le vieillissement des différents composants. L'analyse thermique visant à

trouver une architecture de carte favorisant la dissipation de chaleur doit tenir compte de différents paramètres, notamment :

- les résistances thermiques des composants et des différents procédés de report : Pour chaque système {composant, report} est associé un modèle de résistance thermique. Ce modèle permet de prévoir le comportement thermique des cartes électroniques et de prédire le flux de chaleur traversant chaque composant. La figure I.41 [31] présente un exemple de système électronique et le modèle de résistances thermiques équivalent.

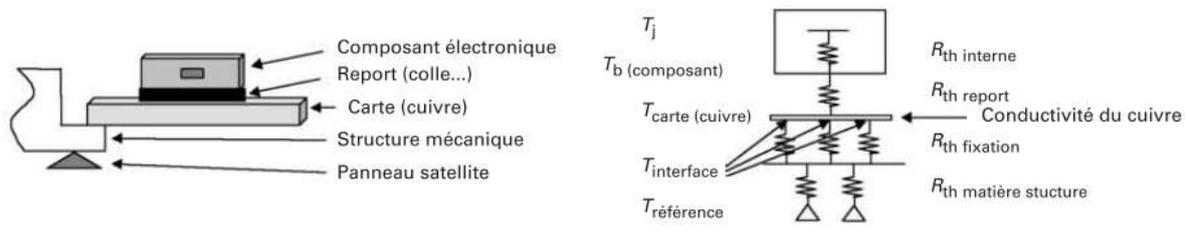


Figure I.41 : Modèle de résistance thermique pour un système électronique spatialisable [31].

- caractéristiques thermiques des matériaux :

Une carte électronique comporte plusieurs matériaux utilisés pour la fabrication et le report de ses composants. Le tableau I.1 [32] présente les caractéristiques thermiques typiques de quelques matériaux utilisés en microélectronique.

Lors des choix des matériaux utilisés pour le montage des composants électroniques et la réalisation des solutions d'encapsulation hermétique des circuits, un compromis entre conductivité thermique, coefficient de dilatation et masse volumique doit être trouvé.

Pour isoler les cartes électroniques du milieu extérieur, Thales Alenia Space utilise des boîtiers basés sur une céramique multicouches brasée sur un drain thermique souvent en cuivre ou en aluminium et couverts par des capots métalliques.

Le cuivre et l'aluminium ont des conductivités thermiques importantes et permettent une bonne dissipation de la chaleur vers les parois du satellite.

A des masses volumiques moins importantes que celle du Kovar souvent utilisé dans la réalisation des boîtiers hermétiques, les céramiques et plus particulièrement l'alumine ont, en plus de leurs propriétés électriques et diélectriques intéressantes, une bonne résistance aux chocs thermiques et permettent une bonne isolation thermique des circuits hybrides. Elles ont en effet des coefficients de dilatation thermique relativement faibles et favorables à la réalisation des boîtiers. Elles sont aussi utilisées comme substrat pour les composants à fortes puissances. Ceci permet de réduire les dispersions des coefficients de dilatation thermique avec le reste des composants montés sur le même circuit imprimé.

Tableau I.1 : Caractéristiques thermiques de matériaux utilisés en microélectronique [32].

Matériau	Conductivité thermique [W/(m · K)]	Coefficient de dilatation (en $10^{-6}/K$)	Masse volumique (en 10^3 kg/m ³)
Al 35 % + SiC 65 %	180	6,6	3
Alumine 96 %	21 à 33	7,1 à 7,8	3,8
Aluminium	237	23,2	2,7
AsGa	29 à 58	6,5	5,3
Brasure Au80/Sn20	60	16,5	14,5
Cu/W 85/15	255	6,5	16,4
Cuivre (Oxygen Free High Conductivity OFHC)	391	18,3	8,9
Diamant naturel	2 000	1,02	3,5
Kovar	16,7	5,7 à 6,2	8,3
Molybdène	155	5,7	10,3
Or	315	14,2	19,3
Oxyde de béryllium	272	6,3	2,9
Silicium	148	2,62	2,3

- placement des composants sur la carte électronique :

L'architecture des cartes électroniques au niveau des charges utiles des satellites doit être mise en place en fonction des profils de températures et des modes de dissipation (conduction ou rayonnement) des composants les constituant. Pour assurer une bonne gestion des flux thermiques au niveau des circuits, il faut positionner les éléments à fortes puissances près des panneaux de surface radiative et utiliser pour leur montage des reports de faible résistance thermique (cf. exemple figure I.42 (b)). Les composants montés sur un drain thermique favorisant la dissipation de chaleur par conduction doivent être placés vers le bas de l'équipement contrairement aux composants rayonnants qui doivent être placés vers le haut.

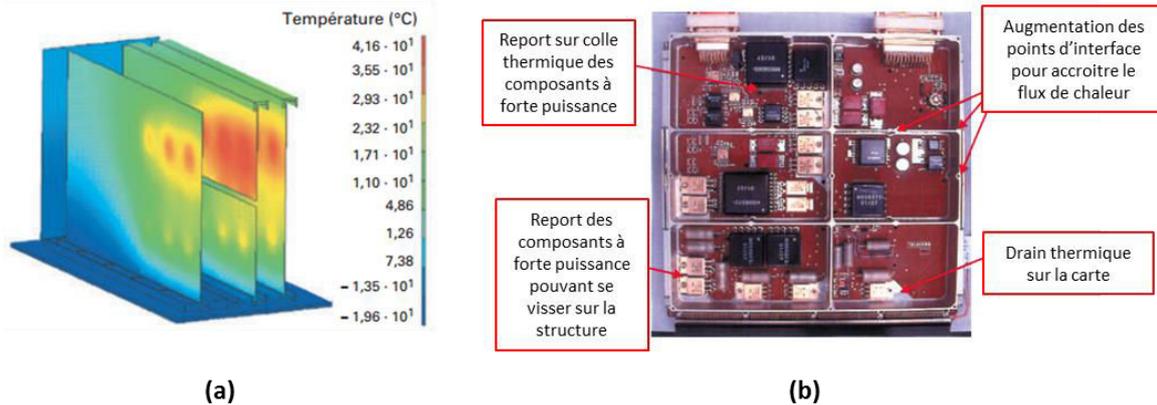


Figure I.42 : Exemple de placement de composants électroniques dans une carte spatialisable [31] :
 (a) Exemple de simulation de profil de température d'un équipement
 (b) Exemple de carte électronique

1.9.3 Compatibilité électromagnétique

Un satellite une fois lancé est sujet à des champs électromagnétiques parasites produits soit par l'environnement dans lequel il gravite soit par ses propres équipements confinés dans un espace restreint. Pour assurer une bonne compatibilité électromagnétique de l'engin spatial, il faut tenir compte des rayonnements occasionnés par son environnement externe ainsi que des couplages électromagnétiques se produisant entre les différents équipements qu'il transporte. Dans ce paragraphe nous nous intéressons uniquement à la compatibilité intra-système de la charge utile du satellite.

Un satellite de télécommunication comporte un ensemble de répéteurs avec des émetteurs de fortes puissances rayonnées et des récepteurs large bande de grande susceptibilité tous confinés dans le compartiment de la charge utile. Les essais de compatibilité électromagnétique intra-système consistent à vérifier que les champs rayonnés par les composants et les couplages parasites engendrés par les fuites RF au niveau des interfaces n'altèrent pas le fonctionnement des différents équipements, notamment les équipements de faibles puissances (récepteur, filtres, commutateur RF et amplificateurs de canaux). Il faut spécifier à ce niveau les valeurs des perturbations maximales pouvant être émises par les composants à fortes puissances et admises par les composants à fortes susceptibilités.

Il existe plusieurs concepts permettant de définir les niveaux de compatibilité au sein de la charge utile d'un satellite. Un des concepts développé à Thales Alenia Space est basé sur l'assimilation du comportement RF du module de communication à celui d'une cavité

surdimensionnée [34]. Le champ au sein de cette cavité est considéré comme homogène et isotrope. Ainsi, pour un couplage donné, seules les fréquences des ondes rayonnées et la surtension de la cavité sont à prendre en compte. Pour analyser l'auto-compatibilité du module de communication de la charge utile il suffit alors d'évaluer le champ électrique total rayonné au niveau du répéteur et à partir de là évaluer le rapport signal/parasites en considérant le signal parasite reçu par chaque composant [33].

A l'échelle du composant, il faut vérifier l'impact des rayonnements à l'intérieur du boîtier et la capacité du composant à fonctionner sous l'effet de ses propres perturbations. Lors de la conception du composant, il faut adopter une architecture limitant les rayonnements et les couplages parasites amplifiés par la présence de boîtier et des fuites RF au niveau des interconnexions.

1.9.4 Test de validation électrique

La validation électrique du satellite consiste à vérifier les interfaces électriques entre ses différents modules lorsque ceux-ci fonctionnent simultanément. Il s'agit d'assembler et de désassembler les différents modules et de vérifier précisément les différentes connexions notamment lors du couplage de la plateforme et de la charge utile.

1.10 Conclusion

A partir des éléments présentés dans ce chapitre, nous pouvons d'ores et déjà justifier le choix de la technologie SIW pour la réalisation des solutions de filtrage dédiées aux futurs convertisseurs de fréquence de type Q/V. Elle représente en effet le meilleur compromis performance – intégrabilité dans des modules RF majoritairement planaires.

La transition conventionnelle à base de « *taper* » présentée est largement utilisée dans le cadre des dispositifs SIW pour assurer la transformation de mode, du quasi-TEM du côté microruban au mode TE_{10} du côté guide. Elle est appropriée pour des faibles épaisseurs de substrat mais se heurte à deux principales limitations avec l'augmentation de l'épaisseur de substrat :

- la différence de hauteur entre le filtre et son environnement hybride rallonge inévitablement les fils de « *bonding* » rajoutant des effets parasites mal maîtrisés et pas toujours faciles à compenser.

- l'élargissement physique de la ligne d'impédance caractéristique 50Ω aux accès implique une plus grande discontinuité au niveau de l'interconnexion avec les fils de « *bonding* » et l'excitation des modes hybrides supérieurs.

L'utilisation d'épaisseurs de substrat importantes étant requise pour obtenir des facteurs de qualité suffisants, il est nécessaire de concevoir une transition permettant le passage d'une faible épaisseur au niveau de l'accès microruban à une épaisseur plus importante au niveau du cœur RF de la solution de filtrage. Ceci signifie qu'il s'agit d'imaginer une forme 3D dont la réalisation serait plus sophistiquée que celle d'un circuit planaire. Les étapes de réalisation des filtres développés dans cette thèse sont détaillées dans le chapitre II. Les choix des substrats sont par ailleurs justifiés dans ce chapitre.

Bibliographie du Chapitre I

- [1] *Le plan France Très Haut Débit [en ligne]. République Française [consulté le 04 Juillet 2017].* <https://observatoire.francethd.fr/>
- [2] *Jean-Luc Koch, L'internet par satellite : Le haut débit des zones rurales. Livre blanc, Bièvres : Carvea consulting à l'initiative d'Eutelsat communications, 2010, p61.*
- [3] *Le satellite EUTELSAT KA-SAT [en ligne]. Eutelsat [consulté le 04 Juillet 2017].* <http://www.eutelsat.com/fr/satellites/flotte/EUTELSAT-KA-SAT.html>
- [4] *Le projet THD-sat [en ligne]. CNES [consulté le 04 Juillet 2017].* <https://thdsat.cnes.fr/fr/projet-thd-sat>
- [5] *Le guide du satellite de télécommunication. Eutelsat [consulté le 04 Juillet 2017].* http://www.eutelsat.com/fr/news/media_library/brochures/guide-du-satellite.pdf
- [6] *J. Bahl and D. K. Trivedi, "A Designer's Guide to Microstrip Line", Microwaves, May 1977, pp. 174-182.*
- [7] *Leo G. Malortsky, « Reviewing the basics of microstrip lines ». Microwaves & RF, March 2000.*
- [8] *André Vander Vorst, Danielle Vanhoenacker-Janvier, « Base de l'ingénierie micro-onde ». De Boeck Supérieur, 1996.*
- [9] *G.L Matthaei, L. Young, and E.M.T. Jones, « Design of Microwave Networks, Impedance Matching Networks, and Coupling Structures ». New York: McGraw-Hill, 1964.*
- [10] *Xingjian Shu, Jincui Wen and Lingling Sun, "Design of 60 GHz parallel coupled-line bandpass filters," 2015 IEEE 16th International Conference on Communication Technology (ICCT), Hangzhou, 2015, pp. 244-247.*
- [11] *E.Cristal and S. Frankel, "Hairpin-line and hybrid hairpin line/ half wave parallel coupled line filters," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 20, pp. 719–728, November 1972.*
- [12] *A. S. M. Marzuki, A. Naemat, S. Selamat, A. T. M. A. Tee, K. Khalil and Y. C. Lee, "Design and fabrication of 40 GHz hairpin filter using Printed Circuit Board," 2013 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM), Penang, 2013, pp. 156-160.*
- [13] *C. Quendo, E. Rius and C. Person, "An original topology of dual-band filter with transmission zeros," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2003, Philadelphia, PA, USA, 2003, pp. 1093-1096 vol.2.*

- [14] Manchec, C. Quendo, E. Rius, C. Person and J. F. Favennec, "Synthesis of dual behavior resonator (DBR) filters with integrated low-pass structures for spurious responses suppression," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 16, no. 1, pp. 4-6, Jan. 2006.
- [15] C. Kudsia, E.J. Cameron, and W.-C. Tang, "Innovations in microwave filters and multiplexing networks for communications satellite systems," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.40, no.6, pp. 1133-1149, June 1992.
- [16] V. E. Boria and B. Gimeno, "Waveguide filters for satellites," in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 8, no. 5, pp. 60-70, Oct. 2007.
- [17] D. Deslandes, K.Wu, « *Integrated Microstrip and Rectangular Waveguide in Planar Form*», *IEEE Microwave Wireless Component Letters*, vol. 11, no. 2, pp. 68-70, Feb 2001.
- [18] X. P. Chen and K. Wu, "Substrate Integrated Waveguide Filters: Practical Aspects and Design Considerations," in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 15, no. 7, pp. 75-83, Nov.-Dec. 2014.
- [19] B. Potelon, J. F. Favennec, C. Quendo, E. Rius, C. Person and J. C. Bohorquez, "Design of a Substrate Integrated Waveguide (SIW) Filter Using a Novel Topology of Coupling," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 9, pp. 596-598, Sept. 2008.
- [20] El Mostrah, B. Potelon, E. Rius, C. Quendo and J. F. Favennec, "C-band cross-coupled SIW filter using a novel topology of electric coupling," *The 40th European Microwave Conference, Paris, 2010*, pp. 188-191.
- [21] M. Le Coq et al., "Miniaturized C-Band SIW Filters Using High-Permittivity Ceramic Substrates," in *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 5, no. 5, pp. 620-626, May 2015.
- [22] D. Deslandes, "Design equations for tapered microstrip-to-Substrate Integrated Waveguide transitions," *2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Anaheim, CA, 2010*, pp. 704-707.
- [23] Arani Ali Khan, Mrinal Kanti Mandal and S. Sanyal, "Unloaded quality factor of a substrate integrated waveguide resonator and its variation with the substrate parameters," *2013 International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP), Dhanbad, 2013*, pp. 1-4.
- [24] R. S. Kwok and Ji-Fuh Liang, "Characterization of high-Q resonators for microwave filter applications," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 1, pp. 111-114, Jan 1999.

- [25] S. John Lehtonen and Craig R. Moore, "Constant Length Wire bonding for Microwave Multichip Modules", *International Microelectronics and Packaging Society*, 2000, p110.
- [26] Kyung-Whan Yeom. *Microwave Circuit Design: A Practical Approach Using ADS (1st ed.)*. Prentice Hall Press, Upper Saddle River, NJ, USA, 2015.
- [27] Hai-Young Lee, "Wideband characterization of a typical bonding wire for microwave and millimeter-wave integrated circuits," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 43, no. 1, pp. 63-68, Jan 1995.
- [28] F. Alimenti, P. Mezzanotte, L. Roselli and R. Sorrentino, "Multi-wire Microstrip Interconnections: a Systematic Analysis for the Extraction of an Equivalent Circuit," 51st ARFTG Conference Digest, Baltimore, MD, USA, 1998, pp. 167-170.
- [29] Dean Nicholson and Hee Soo Lee, "Characterization and modeling of bond wires for high-frequency applications", *Microwave Engineering Europe*, August/September 2006.
- [30] B. Alaya, M. Bozzi, L. Perregrini, N. Raveu and K. Wu, "Comparison of fabrication tolerance sensitivity between substrate integrated waveguide and microstrip circuits," 2015 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Phoenix, AZ, 2015, pp. 1-3.
- [31] Claude DREVON, José ALDEGUER, *Conception de cartes pour équipements spatialisables*, *Technique de l'ingénieur*, Août 2005.
- [32] Augustin COELLO-VERA, Claude DREVON, *Circuits hybrides : conception*, *Techniques de l'ingénieur*, Mars 1995.
- [33] J.P. CATANI, *La compatibilité électromagnétique appliquée aux engins spatiaux*, *RRE N°1*, Janvier 1998, p65.
- [34] J.C. Pourtau, M. Terral, *Méthode d'analyse et d'essais de la CEM rayonnée intra-système appliquée aux répéteurs d'un satellite de télécommunication*, *REE N°1*, Janvier 2002, p94.

Chapitre II:

Techniques de fabrication de circuits 3D en alumine, silice fondue et thermoplastiques COC/COP

II.1. Introduction

Les besoins de filtrage identifiés en bande Q et V sont fondamentalement des besoins de performances, d'intégrabilité et de stabilité en fréquence de la réponse du filtre. Les structures SIW permettent de répondre aux besoins de performance et d'intégrabilité. La conception de ces filtres nécessite néanmoins des considérations particulières. En effet, il faut augmenter l'épaisseur de substrat au niveau du cœur RF afin d'accéder à de meilleurs facteurs de qualité d'une part et d'amincir les accès microruban afin de faciliter le report par câblage filaire de type « bonding » et éviter un maximum de parasites d'autre part (cf. chapitre I). Des formes 3D sont dès lors imaginées (cf. figure II.43).

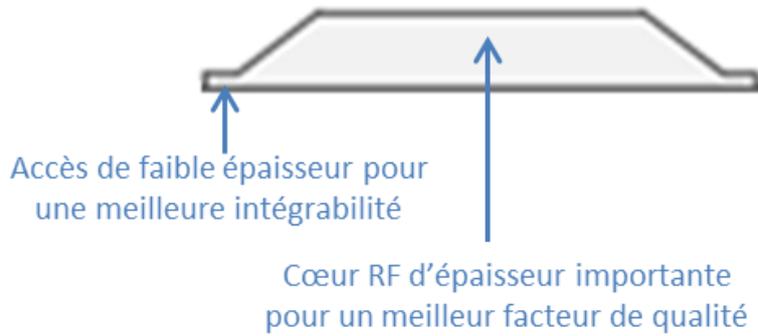


Figure II.43 : Forme 3D des structures de filtrage.

La mise en forme et la métallisation de substrats 3D nécessitent l'application de différentes techniques de réalisation couches minces, couches épaisses, multicouches et massives. Le choix du procédé de fabrication repose sur différents critères notamment la précision de fabrication et les caractéristiques du substrat.

Avec la montée en fréquence, des précisions de fabrication plus importantes sont nécessaires à la réalisation du filtre. Au début de l'étude, un objectif de 10 μm a été jugé satisfaisant.

Les caractéristiques du substrat notamment sa permittivité, ses pertes diélectriques et ses caractéristiques thermiques et mécaniques conditionnent les étapes de fabrication et influent fortement sur la taille et les performances du filtre SIW. Pour les structures de filtrage développées dans cette thèse, nous avons choisi des substrats d'alumine, de silice fondue et de polymère thermoplastique ; le COP 480R (Cyclo Oléfine Polymère) est utilisé dans notre cas. Ces choix sont justifiés en première partie de ce chapitre.

La deuxième partie du chapitre consiste en un bref état de l'art des techniques de mise en forme et de métallisation des substrats utilisées pour la fabrication des différentes solutions de filtrage proposées (cf. figure II.44) et dont la conception est détaillée dans le chapitre III. L'enchaînement des étapes de réalisation des filtres est explicité dans la suite de ce chapitre.

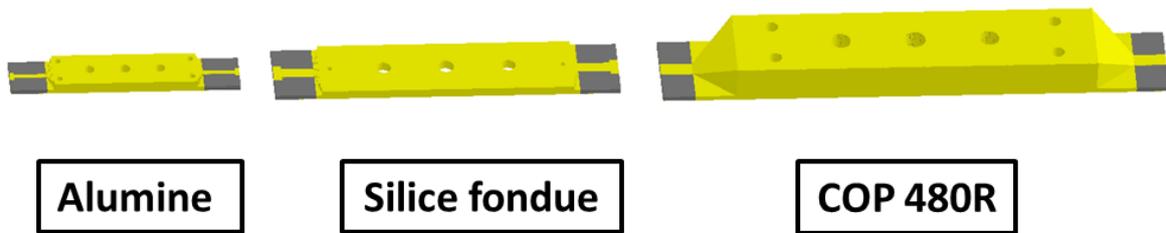


Figure II.44 : Vue 3D des structures de filtrage à réaliser.

Pour les structures en alumine et en silice fondue, la mise en forme du substrat est basée sur une technique d'ablation laser pour diminuer localement les épaisseurs du substrat et pour la réalisation des vias. L'obtention des motifs métalliques a été réalisée à l'aide de techniques de photolithographie et de croissance électrolytique.

La réalisation du filtre COP est encore exploratoire. Plusieurs pistes ont été explorées en interne au Lab-STICC et sous forme de prestations dans d'autres laboratoires. Nous avons pu profiter aussi de l'existence d'équipements à l'Open Factory UBO (Fablab de l'Université) pour certaines étapes de la réalisation. La mise en forme du substrat est faite par injection (moulage) ce qui permet d'accéder à des épaisseurs plus importantes que celles obtenues avec la première technique (ablation laser) et d'adresser des facteurs de qualités plus importants. Pour le perçage des substrats COP nous avons opté pour un perçage mécanique dans un premier temps avant d'envisager un perçage laser UV permettant plus de flexibilité. Finalement, pour la métallisation, nous avons opté pour les techniques de pulvérisation cathodique et de croissance auto-catalytique ou électrolytique.

II.2. Choix du matériau pour le substrat diélectrique

II.2.1 Critères de choix d'un substrat

Le choix du substrat impacte fortement les performances électriques du filtre, sa tenue en température et sa résistance aux chocs mécaniques. Afin de faire un choix judicieux, plusieurs paramètres sont à prendre en compte. La figure II.45 [1] résume les relations qui existent entre les différentes propriétés du substrat et les performances d'un filtre SIW.

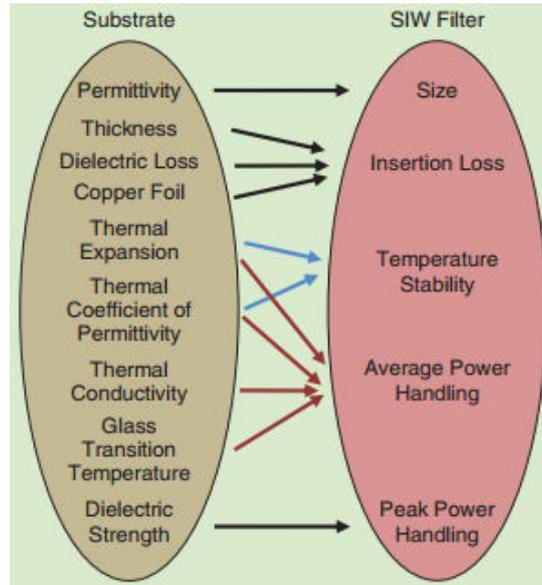


Figure II.45: Relations entre les propriétés du substrat et les performances d'un filtre SIW [1].

Les propriétés du substrat conditionnent :

- la taille du filtre : La racine carrée de la permittivité du substrat est inversement proportionnelle aux dimensions du filtre (cf. Eq II.1 valable pour des matériaux non magnétiques). À des fréquences relativement faibles, la miniaturisation des structures de filtrage est assurée par le choix de substrats à fortes permittivités. À fréquence élevée, des substrats de faibles permittivités ont été privilégiés dans notre cas pour ne pas être aux limites des tolérances de fabrication accessibles aujourd'hui pour la réalisation de structures en 3D.

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{Eq II.1}$$

λ : la longueur d'onde dans le substrat
 c : la célérité de la lumière dans le vide
 f : la fréquence de résonance du mode excité
 ϵ_r : la permittivité du substrat

- ses pertes par insertion : Pour le filtre SIW, les pertes par insertion sont liées à la tangente de pertes, à l'épaisseur du substrat ainsi qu'à l'épaisseur de métallisation. Pour réduire les pertes par insertion, il faut privilégier des substrats épais de faibles tangentes de pertes et des couches de métallisation relativement épaisses.
- la stabilité de sa réponse en température : Le substrat utilisé pour la réalisation du filtre doit avoir un faible coefficient d'expansion thermique des dimensions selon les trois axes et une permittivité diélectrique peu sensible aux variations de la température. La variation en température de la fréquence de résonance du mode TE_{101} au sein d'une cavité SIW peut être modélisée par l'équation Eq II.2 [1].

$$\tau_f(TE_{101}) = \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial T} = -\left(\frac{1}{2} \frac{1}{\varepsilon_r} \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial T} + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial T}\right) \quad \text{Eq II.2}$$

$\frac{\partial \alpha}{\partial T}$: Coefficient d'expansion thermique

$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial T}$: Coefficient thermique de la permittivité

- sa capacité à dissiper la chaleur : L'accumulation de la chaleur au sein du filtre engendre un décalage fréquentiel de sa réponse, une dégradation de ses performances, une déformation voire même une détérioration. En plus d'un faible coefficient de dilatation thermique et d'un faible coefficient thermique de la permittivité, le substrat doit avoir une forte conductivité thermique et une température de transition vitreuse élevée pour les polymères amorphes et les verres. Pour les céramiques, il est nécessaire d'avoir une température de fusion élevée ce qui est généralement le cas.
- sa tenue en puissance : La rigidité diélectrique du substrat représente l'intensité maximale de champ électrique que le substrat peut supporter avant de provoquer un arc électrique. Elle doit par conséquent être la plus élevée possible afin d'éviter le court-circuit, voire le claquage donc la dégradation du matériau.
- le procédé de fabrication : La méthode de réalisation du filtre dépend notamment du choix du matériau, de la forme du circuit (ou dispositif) à réaliser, de la résolution attendue et des dimensions. L'ablation laser est par

exemple appropriée pour l'alumine qui est le matériau céramique utilisé dans notre étude. L'impression 3D et le moulage sont des techniques appropriées pour la mise en forme des thermoplastiques.

II.2.2 Les céramiques

Les céramiques sont des matériaux inorganiques poly-cristallins caractérisés par une forte tenue en température, une relative bonne stabilité thermique des propriétés physiques, une bonne résistance à l'usure et aux produits chimiques mais sont souvent des matériaux fragiles.

Il existe différents types de céramiques couvrant différents domaines d'applications. Contrairement aux céramiques traditionnelles qui sont dédiées à l'art et à l'artisanat, Les céramiques dites techniques sont développées pour des applications industrielles [2]. Elles existent sous plusieurs structurations chimiques : les céramiques d'oxydes, les carbures et les produits à base de carbone, les borures, les nitrures, les fluorures, les siliciures, les sulfures,...., et sous différentes formes, matériaux massifs, fibres céramiques, nanotubes,...., couches minces, nanoparticules,... et peuvent être classées en deux familles :

- Les céramiques structurales : Ce sont des céramiques dédiées aux applications thermiques et mécaniques. Elles sont utilisées pour les écrans thermiques, les boîtiers de capteurs, les composants de moteurs à combustion ou encore pour les implants dentaires.

- Les céramiques fonctionnelles : Ce sont des céramiques dédiées à des applications électriques et électroniques. Le tableau II.2 présente une liste non exhaustive des usages des céramiques fonctionnelles [3]. Parmi les céramiques utilisées comme substrats, les oxydes principaux : l'alumine Al_2O_3 et la silice SiO_2 , présentent des propriétés diélectriques intéressantes en plus d'une bonne résistivité et d'une forte conductivité thermique ce qui explique leur utilisation fréquente en hyperfréquences.

Tableau II.2 : Exemples d'applications pour les céramiques fonctionnelles [3].

Fonction	Matériau	Propriétés utilisées dans la fonction composant	Applications
Capacitive	SrTiO ₃ MgTiO ₃ CaTiO ₃	Permittivité Pertes diélectriques Résistivité coefficient thermique de la permittivité	Condensateur type I
	BaTiO ₃	Semi-conduction du matériau + ré-oxydation superficielle	Condensateur type II
	TiO ₂	Semi-conductions n et p couches d'arrêt aux joints de grains	Condensateur type III
Diélectriques pour hyperfréquences	Zr _{1-x} Sn _x TiO ₄	Fréquence de résonance Stabilité en température $\epsilon_r = 30$ à 40 $Q \gg 40000$	Résonateurs diélectriques pour hyperfréquences
	(Ba, Sr)O-TiO ₂ -Sm ₂ O ₃	Fréquence de résonance Stabilité en température $\epsilon_r = 75$ à 80 $Q \gg 10000$	
Magnétique	Zr _{1-x} M _x OFe ₂ O ₃ M=Ni, Mn ou Cu	Perméabilité initiale pertes cycle d'hystérésis	Ferrites doux : pots pour filtres, noyaux pour transformateurs ou alimentation à découpage ...
	Y ₃ Fe _{5-y} Al _y O ₁₂ Y _{3-x} Ca _x Fe _{5-x} Zr _x O ₁₂	Aimantation à saturation Fonction de la fréquence Faible largeur de raie de gyrorésonance Pertes négligeables	Circulateurs hyperfréquences Isolateurs hyperfréquences
Piézoélectricité Pyroélectrique Ferroélectrique Electro-optique	PZT : Pb(Zr _x Ti _{1-x})O ₃	Constantes piézoélectriques ferroélectriques pyroélectriques	Transducteurs pour filtres, lignes à retard, Oscillateurs ou détecteurs infrarouges ...
Substrats Interconnexions	Al₂O₃	Résistivité Conductivité thermique Propriétés diélectriques	Substrats pour circuits hybrides Encapsulation Interconnexion pour circuits intégrés Applications basses et moyennes fréquences (et souvent hyperfréquences)
	SiO₂	Résistivité Propriétés diélectriques	Substrats pour interconnexion en hyperfréquences
	BeO	Résistivité Conductivité thermique Propriétés diélectriques	Substrats pour circuits hybrides de puissance ou de forte densité Report de composants de puissance

D'une manière générale et, en l'occurrence pour les céramiques, les procédés de mise en forme dépendent des propriétés à privilégier pour chaque usage et de la finition de la pièce réalisée. La figure II.46 donne un exemple de mise en forme de céramiques avec différentes techniques : pressage, extrusion, coulage, moulage, on peut aussi citer l'impression 3D céramique.

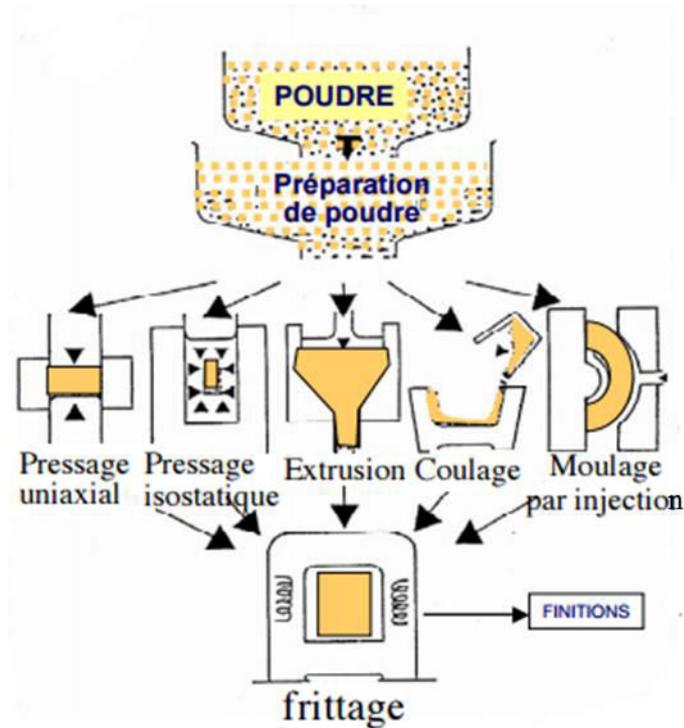


Figure II.46 : Exemples de techniques de réalisation d'une pièce céramique.

II.2.3 Les polymères

Les polymères sont des matériaux organiques constitués de macromolécules. Ils peuvent être classés en trois grandes familles selon leur comportement vis-à-vis de la température.

- Les thermoplastiques : Au-dessus d'une certaine température (transition vitreuse T_g), ces matériaux ramollissent (état caoutchouteux) et redeviennent plus rigides (état vitreux) en dessous de la T_g ce qui les rend intéressants pour des procédés de mise en forme tels que le moulage ou encore l'impression 3D.
- Les thermodurcissables : Contrairement aux thermoplastiques, les thermodurcissables ne sont pas réversibles une fois mis en forme. Ces matériaux deviennent non fusibles (stabilité thermique) et non solubles (stabilité chimique).

- Les élastomères (ou caoutchoucs) : Ils se placent entre les deux catégories précédentes. Ils sont moins rigides que les thermodurcissables grâce à un plus faible degré de polymérisation.

Les polymères (thermoplastiques et thermodurcissables) sont de plus en plus utilisés dans le domaine des hyperfréquences pour certaines applications (cf. tableau II.3) où ils remplacent les céramiques tels que l'alumine et la silice du fait d'une mise en forme plus aisée dans la plupart des cas (laminage, moulage, impression 3D ...), d'un coût souvent plus faible et de la grande diversité des polymères et par conséquent de l'accès à une grande diversité de propriétés physico-chimiques. Le tableau II.3 résume les exemples d'usages des polymères dans le domaine des hyperfréquences présentés dans [4].

Tableau II.3 : Exemples d'usages des polymères dans le domaine des hyperfréquences [4].

Applications	Propriétés utilisées pour les composants	Polymère
Condensateur	Faibles permittivités → Films minces de hautes qualités.	Basse tension (75 V à 400 V en continu) : films polyester (PET, Mylar) Haute tension (2 kV) et haute température (120°C) : polypropylène (PP).
Connecteurs	Résistance à la température Faibles permittivité → connecteurs hautes fréquences.	Câbles coaxiaux : polyéthylène plein, polyéthylène poreux, PTFE plein, PTFE basse densité.
Circuits imprimés	Température de transition vitreuse élevée (Tg = 150°C pour le FR4) → Augmenter la température d'utilisation.	Résine thermodurcissables: époxy renforcés de fibres de verre (FR4).
Modules Multi-Chips MMC	Faibles permittivités → plus haute densité d'intégration, plus grandes vitesses de transmission et plus faibles consommations de puissance.	Polymères thermostables : Polymides, BCB.
Substrats	Faibles permittivité et faibles pertes diélectriques	PTFE Composites avec fibres de verre ou des particules de Quartz.
Boîtiers et encapsulation	Étanchéité Isolation électrique Dissipation thermique	Polycarbonate Polystyrène ABS

II.2.4 Caractéristiques électriques et thermiques des substrats alumine, silice fondue et polymère COP

Afin de justifier le choix des différents substrats, ce paragraphe reprend les caractéristiques intéressantes des substrats alumine, silice fondue et polymère COP.

L'alumine est largement utilisée dans le domaine spatial notamment pour ses faibles tangentes de pertes en bande millimétrique et sa stabilité en température. De plus, elle possède une conductivité thermique élevée et une température de fusion de l'ordre de 2050°C.

Pour une tangente de perte similaire à celle de l'alumine, la solution silice fondue présente une permittivité plus faible et permet ainsi d'avoir des structures de plus grandes tailles aux fréquences adressées ici. Ce qui signifie une moindre sensibilité aux tolérances de fabrication.

La mise en forme des substrats alumine et silice fondue est réalisée grâce au procédé d'ablation laser. Néanmoins une limitation de cette technique concerne l'ablation et le perçage sur des épaisseurs importantes ($\frac{d}{h} \leq 0,5$ avec d le diamètre du via et h l'épaisseur du substrat).

L'épaisseur de substrat étant un paramètre important pour atteindre des facteurs de qualité élevés, la solution thermoplastique COP mis en forme par moulage permet de s'affranchir de cette contrainte. Le COP 480R de chez Zeonex®, choisi dans le cadre de cette thèse présente des propriétés électriques intéressantes aux fréquences millimétriques, faible permittivité et faible tangente de pertes.

Le tableau II.4 résume les caractéristiques électriques et thermiques des substrats alumine, silice fondue et COP 480R utilisés pour la réalisation des différentes structures de filtrage proposées dans cette thèse.

L'inconvénient des substrats en silice fondue et en COP concerne leurs conductivités thermiques qui restent très faibles en comparaison avec la solution en alumine. Bien que plus importants (voire beaucoup plus importants pour le cas COP) que ceux de l'alumine, leurs coefficients d'expansion thermique restent corrects. De plus, le COP présente une température de transition vitreuse relativement élevée (138 °C) ce qui lui donne une bonne stabilité thermomécanique comparée à beaucoup de polymères thermoplastiques.

Tableau II.4 : Caractéristiques électriques et thermiques des substrats : Alumine, Silice fondue et COP 480R.

Propriétés	Alumine (Thin Film substrates, Chine)	Silice fondue (Valley Design corp., USA)	COP 480R (Zeonex® , Japan)
Permittivité	9,9	3,8	2,32
Tangente de pertes	2.10^{-4}	3.10^{-4}	$3,2. 10^{-4}$
Rigidité diélectrique (kV/mm)	14,6	30	40
Coefficient d'expansion thermique (x/y/z,ppm/K)	7,2.10-6 @ 25-300°C 7,4.10-6 @ 25-600°C 8,2.10-6 @ 25-800°C	0,52.10-6 @ 5-35°C 0,57.10-6 @ 0-200°C 0,48.10-6 @ -100-200°C	60.10-6 à 70.10-6
Conductivité thermique (W/mK)	33 @ 25°C 30 @ 300°C 25 @ 500°C	1,38	0,14 @ 50°C 0,19 @ 150°C 0,22 @ 250°C

II.3 Les conducteurs pour les hyperfréquences

En hyperfréquence, le choix du conducteur repose sur plusieurs critères notamment ses conductivités électrique et thermique, sa densité et son coût mais aussi sa capacité à résister à certains produits chimiques et à l'oxydation. D'un point de vue électrique, l'or est un moins bon conducteur ($\sigma = 45,2 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$) que le cuivre ($\sigma = 59,6 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$), mais il ne s'oxyde pas et résiste aux acides usuels. Dans les applications électroniques, le cuivre est souvent couvert d'une fine couche d'or afin d'éviter son oxydation. Par ailleurs, souvent la difficulté rencontrée est l'adhérence du métal sur le substrat. Afin d'améliorer l'adhérence, une couche intermédiaire peut être utilisée (chrome, promoteur d'adhérence, ...).

II.4 Etat de l'art des techniques de mise en forme de substrat 3D

Ce paragraphe introduit un bref état de l'art des solutions utilisées pour la mise en forme des substrats des filtres 3D développés dans le cadre de cette thèse ainsi que des objets 3D ayant servis lors des différentes étapes de réalisation de ces filtres (Support pour le perçage, masquage à l'étape de métallisation ...).

II.4.1 L'ablation laser

L'ablation laser est un outil qui peut servir pour le dépôt ou pour la gravure d'un matériau.

Dans le cas de l'application dépôt couche mince, un laser pulsé de très forte puissance est utilisée pour arracher de la matière à une cible et la déposer sur le substrat placé en face dans une chambre à vide [5].

Dans la suite, nous allons utiliser le terme d'ablation laser uniquement pour parler de gravure [6], [7] et [8]. L'ablation laser permet d'atteindre des résolutions et des précisions largement inférieures à celles atteignables par les techniques de micro-usinage mécaniques. Ceci lui confère un avantage pour la réalisation de dispositifs fonctionnant en bande millimétrique. Les matériaux à ablater ne nécessitent pas de traitements particuliers avant ablation. En plus, l'absence de contact autorise l'usinage de surfaces fragiles telles que l'alumine. Néanmoins, en fonction de la nature du laser utilisé, il peut y avoir des interactions laser – matière non souhaitées pouvant affecter la qualité de l'ablation ainsi que celle du substrat ciblé. Il est par conséquent indispensable de bien choisir le laser avant ablation.

Il existe différents types de laser pouvant être classés par durée d'impulsion (de 1 fs à quelques μ s) et par processus d'opération sur la matière (cf. figure II.47 [9]).

Les lasers infrarouges IR généralement avec des impulsions largement supérieurs à *Ips* opèrent par processus thermique sur la matière (diffusion thermique, fusion, vaporisation). Ce type de laser est souvent utilisé pour la découpe des métaux mais il est à éviter pour des applications d'ablation sur les polymères par exemple, dont l'intégrité et les propriétés sont affectées par la chaleur.

Pour ce type de matériaux, les lasers Ultra-Violet UV sont à privilégier. Dans ce cas, l'enlèvement de matière se fait par une décomposition photochimique. L'énergie d'un photon UV est suffisante pour casser une liaison covalente. Après plusieurs impulsions, plusieurs liaisons covalentes sont cassées et la matière finit par être évaporée. Pour que l'opération du laser soit efficace, le polymère ou le matériau ciblé doit avoir une bande d'absorption importante à la longueur d'onde du laser. La figure II.48 présente un exemple de perçage laser IR (a) et d'un perçage laser UV (b) réalisés chez la société μ UL.

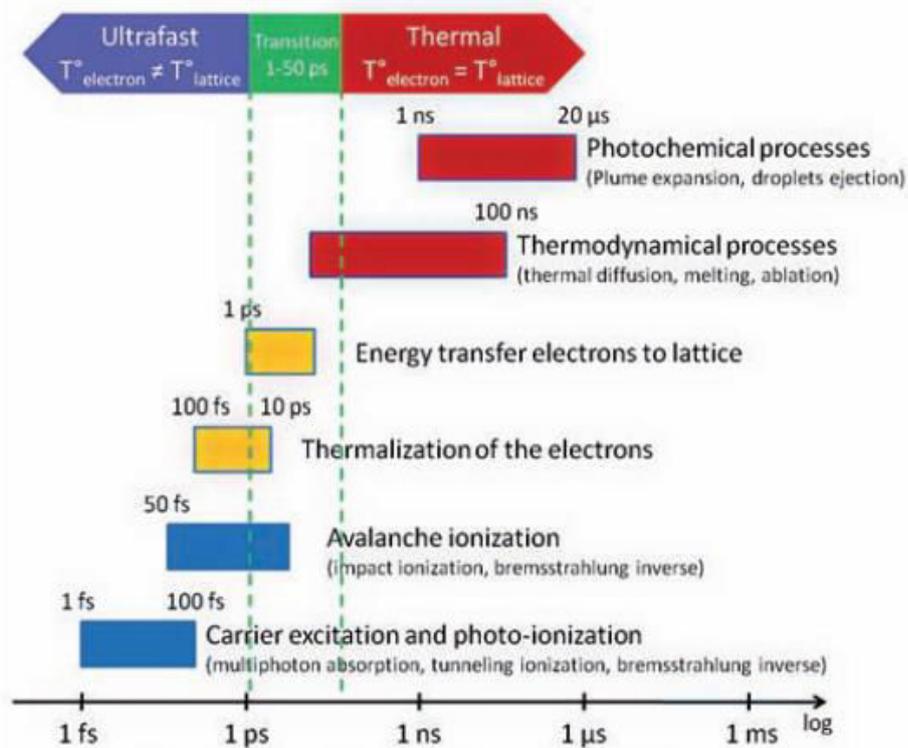


Figure II.47 : Chronologie de l'interaction laser – matière [9].

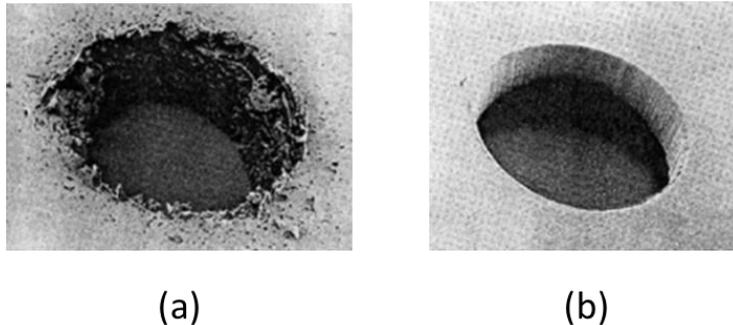


Figure II.48 : Perçage par laser : (a) IR assisté par le gaz CO2 (b) UV YAG (société μUL).

II.4.2 Le micro-usinage mécanique

Il s'agit d'un procédé d'usinage par enlèvement de matière. Les micro-usineuses mécaniques assistées par ordinateur sont généralement utilisées pour la gravure de circuits électroniques basse fréquence (jusqu'à quelques GHz). Elles ont l'avantage d'être relativement accessibles et simples à utiliser. Elles permettent un prototypage rapide et peuvent, pour certaines, aller à des résolutions de fraisage et de perçage de $100 \mu\text{m}$ avec des précisions de positionnement de l'ordre de $1 \mu\text{m}$. Les techniques de fraisage et de perçage sont représentées sur la figure II.49. La figure II.50 présente l'exemple d'un circuit gravé à l'aide d'une micro-usineuse LPKF Protomat S103.

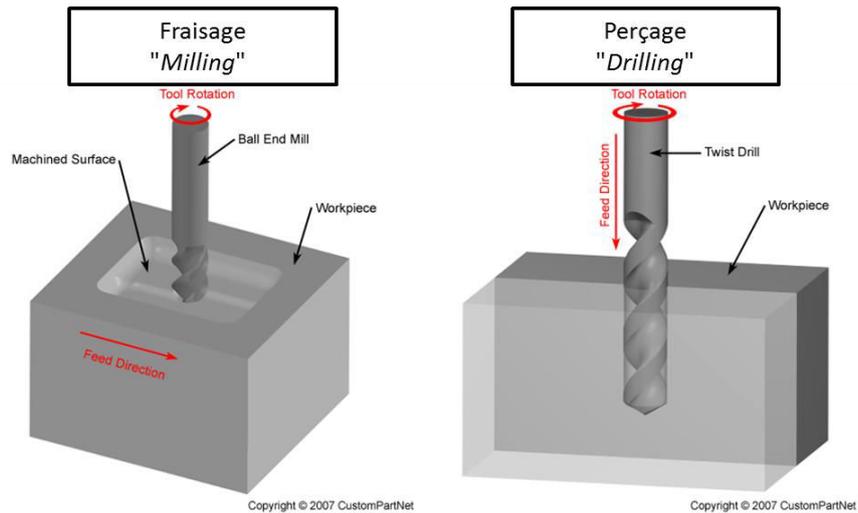


Figure II.49 : Schéma de principe des techniques de fraisage (à gauche) et de perçage mécanique (à droite).

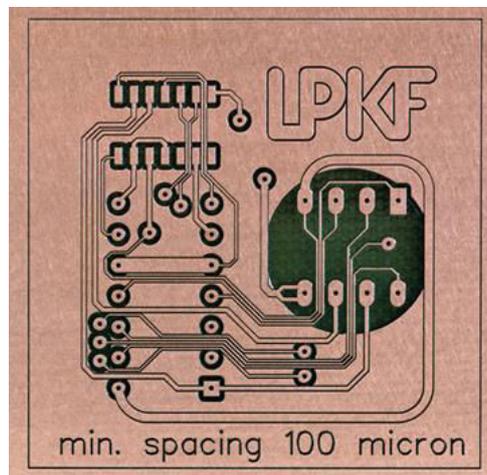


Figure II.50 : Circuit gravé à l'aide de la micro-usineuse Protomat S103 de la société LPKF.

Dans notre cas, cette technique a été utilisée pour avoir une autre voie que le laser pour la réalisation du perçage des substrats polymère. Nonobstant un manque de précision par rapport au laser, cette technique a l'avantage d'être facilement accessible au laboratoire.

II.4.3 L'impression 3D

L'impression 3D est une technique de mise en forme de matériaux de plus en plus utilisée. Cette technique permet aujourd'hui le dépôt de divers matériaux (métaux, céramiques, polymères, composites,...) et, son évolution en termes de variétés de matériaux imprimables et de résolution est très rapide.

Dans notre étude, nous avons utilisé les techniques d'impression 3D par dépôt de fil fondu pour la mise en forme d'un absorbant électromagnétique (cf. chapitre III) et par

stéréolithographie pour réaliser un support de perçage et des masques pour la métallisation (présentés dans la suite de ce chapitre).

II.4.3.1 Impression 3D par dépôt de fil fondu

L'impression 3D par dépôt de fil fondu ou *FDM* (*Fused Deposition Modelling*) permet généralement la mise en forme de matériaux polymères ou composites à matrices polymères [10].

L'imprimante comporte une buse chauffante (allant jusqu'à 200°C pour les machines standards). Un filament (ou fil) du matériau à déposer est acheminé à l'aide d'un extrudeur vers la buse dont les diamètres pouvant aller au minimum jusqu'à 200 µm (cf. figure II.51). Une fois le filament « fondu » le dépôt se fait sur un plateau appelé lit. La construction de l'objet 3D se fait couche par couche avec des pas en z réglables.

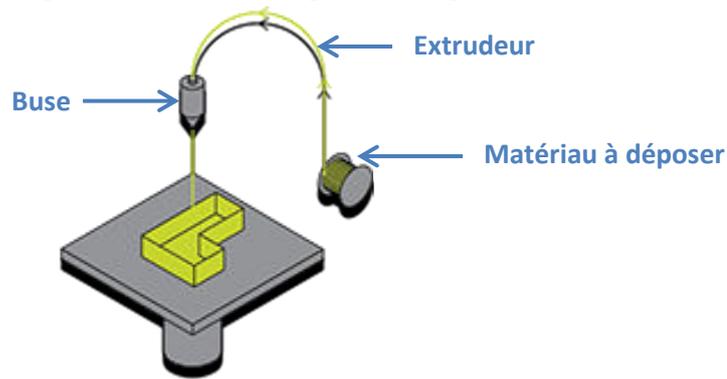


Figure II.51 : Schéma de principe de l'impression par dépôt de fil fondu (FDM).

II.4.3.2 Impression 3D par stéréolithographie

Le procédé de stéréolithographie SLA est une technique de prototypage rapide qui consiste à imprimer des objets en utilisant le principe de photo-polymérisation. A l'origine, les résines utilisées pour ce type d'impression sont les polymères époxy. La SLA est néanmoins de plus en plus utilisée pour la mise en forme d'objet céramique (céramique mélangée à la résine) notamment dans le cadre des applications hyperfréquences (procédé 3DCRAM) [11] et [12].

Le principe de cette technique repose sur la solidification d'une résine liquide photosensible sous l'effet d'une lumière UV. Les formes des objets évoluent couche par couche et sont définies à l'aide d'un faisceau laser qui vient insoler une partie de la résine. Après impression, une étape de post-traitement consiste à immerger l'objet dans un solvant

afin d'enlever le résidu de résine non-polymérisée. Si nécessaire (cas des objets céramiques), l'objet est par la suite traité thermiquement pour déliantage et frittage.

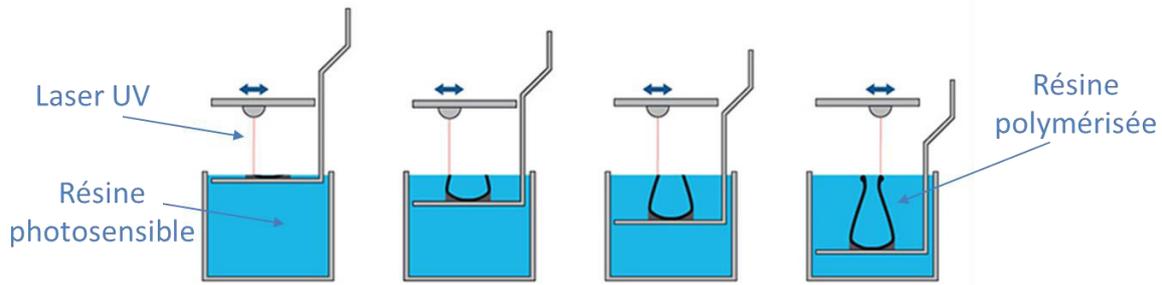


Figure II.52 : Schéma de principe de la SLA utilisée dans le cadre de cette étude.

II.3.4 Le moulage par injection

Le moulage par injection est un procédé très répandu aujourd'hui pour la mise en forme de polymères thermoplastiques. Il s'agit d'une technique de fabrication de grandes séries. Son principe est simple. La matière thermoplastique est chauffée au niveau de la buse d'injection à des températures suffisamment élevées pour rendre le matériau le plus liquide possible et ce sans dégradation de ce dernier. Ensuite, la matière est injectée dans le moule où elle est refroidie avant d'être éjectée (cf. figure II.53).

Malgré un prix important pour la réalisation d'un moule et bien que pour certaines applications notamment les petites séries et au niveau du développement, l'impression 3D commence à remplacer l'injection, cette dernière reste aujourd'hui un procédé de choix dans l'industrie. Par contre, de plus en plus les moules sont réalisés à l'aide de l'impression 3D métal réduisant ainsi leur coût et donnant accès à des designs de plus en plus complexes.

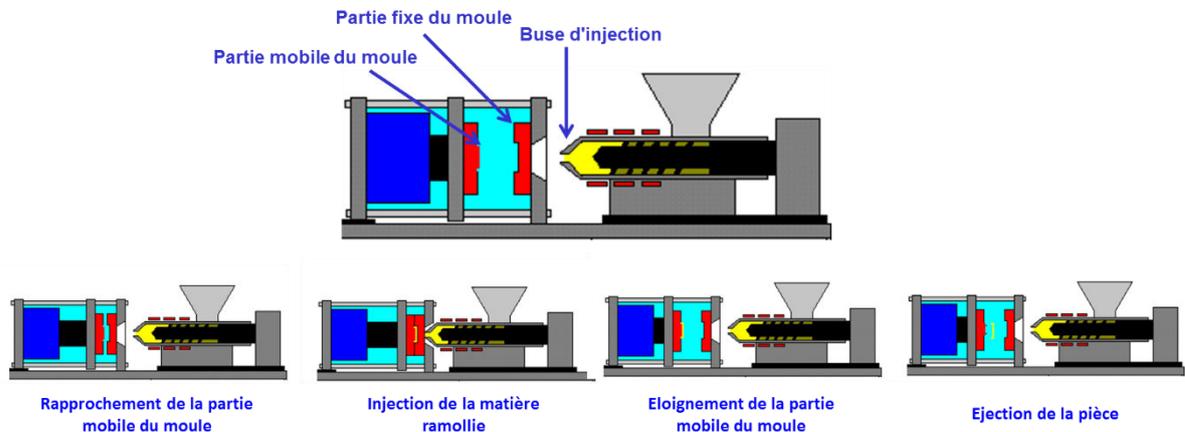


Figure II.53 : Schéma de principe du moulage polymère.

II.3.5 La technologie LTCC

La technologie LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic) est une technique multicouche qui consiste à empiler des sous-couches de céramique séparées par des plans métalliques connectés par l'intermédiaire de vias métallisés. Cette technologie permet une grande flexibilité topologique et un moindre encombrement, choses de plus en plus demandées pour la réalisation de circuits hybrides en bandes millimétriques et notamment dans les charges utiles des engins spatiaux. La figure II.54 présente l'exemple d'un filtre LTCC conçu au Lab-STICC et réalisé par l'entreprise VTT en Finlande. La topologie proposée permet la réduction de la taille du filtre en bande C en mettant 2 cavités par sous-couche [13]. Les cavités superposées sont couplées entre elles par l'intermédiaire de fentes gravées sur le conducteur qui les sépare.

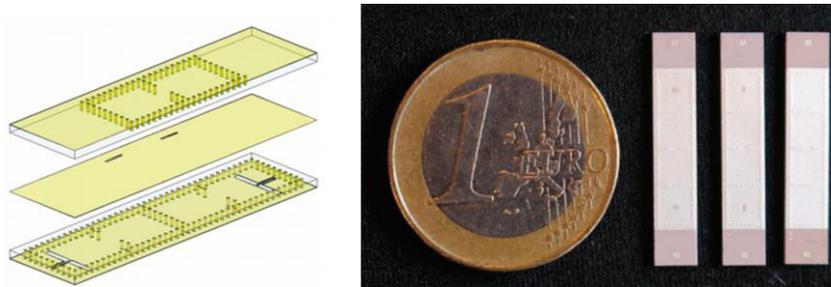


Figure II.54 : Exemple de filtre en bande C réalisé en technologie LTCC [13].

La figure II.55 présente schématiquement le procédé LTCC développé au Lab-STICC par l'équipe de l'IMT Atlantique [14]. Pour une température de recuit supérieure à 1000°C, on parle de technologie HTCC ou « *High Temperature Co-fired Ceramic* ».

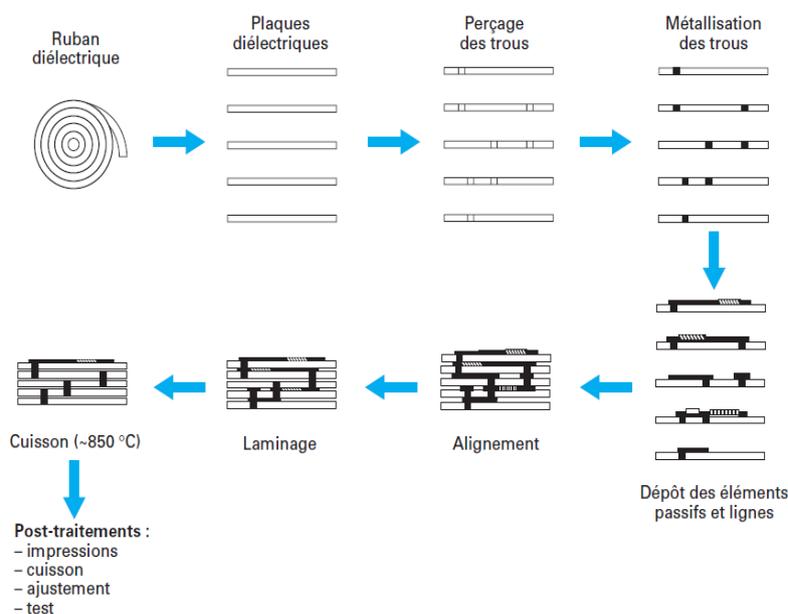


Figure II.55 : Schéma de principe du procédé LTCC développé au Lab-STICC par l'équipe de l'IMT [14].

II.5 Etat de l'art des techniques de métallisation de substrats 3D

Une fois le diélectrique mis en forme, il est important pour la réalisation d'un dispositif hyperfréquence notamment, de pouvoir définir des motifs métalliques en surface. Dans ce paragraphe sont présentées les techniques de métallisation et de définition de motif utilisées dans la fabrication des différents filtres et parmi lesquelles on distingue des techniques de fabrication couches épaisses et couches minces, planaires et 3D.

II.5.1 Le dépôt par sérigraphie

Il s'agit d'une technique de dépôt de couches épaisses. Elle est très répandue et est communément utilisée pour la réalisation de circuits imprimés planaires. La figure II.56 présente le procédé d'impression sérigraphique adopté par exemple par les chercheurs de NTU (Nanyang Technological University) de Singapour. Historiquement, cette technique issue des chinois pour l'impression sur la soie a été adaptée à différents supports dont les substrats pour l'électronique. Notons que les dépôts peuvent ne pas être nécessairement réalisés sur des supports plans. Le dépôt d'une encre se fait au travers d'un écran réalisé au préalable avec les motifs idoines. Des étapes de traitement thermique sont alors nécessaires par la suite pour le déliantage et l'homogénéisation du matériau déposé. L'encre est déposée à l'aide d'une racle. Dans le cas de circuits électroniques complexes cette étape peut être répétée afin d'imprimer les couches successives du circuit. Cette technique, généralement utilisée pour la définition de motifs métalliques en électronique peut aussi être utilisée pour réaliser des dépôts avec d'autres familles de matériaux tels que des céramiques, des verres, des résines,....

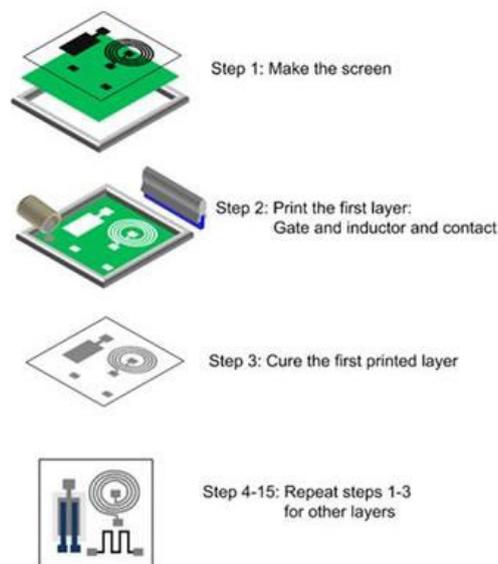


Figure II.56 : Représentation schématique des différentes étapes de la technique de sérigraphie.

II.5.2 La photolithographie

La technique de photolithographie permet de transférer sur un substrat l'image d'un masque sur lequel se trouvent des motifs dans une résine photosensible. La résine est généralement déposée sur le substrat à l'aide d'une tournette. Il existe deux types de résine photosensible : négative et positive. Lorsque la partie modifiée (par rayonnement ou bombardement) ne correspond pas à la partie restante après le développement, on parlera d'une résine positive (cf. figure II.57). Dans le cas contraire, on parlera d'une résine négative.

La photolithographie est généralement suivie d'étape de gravure (humide ou sèche) ou de dépôt (par exemple PVD, dépôts électrolytiques ou auto-catalytiques).

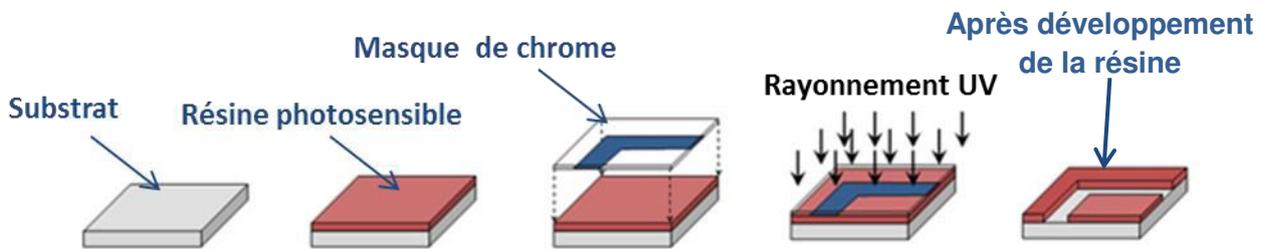


Figure II.57 : Schéma de principe de la photolithographie avec une résine photosensible positive.

II.5.3 Le laminage

Le laminage est un procédé industriel qui consiste à déformer un matériau en le faisant passer entre deux cylindres. Il peut être réalisé à chaud ou à froid en fonction de l'usage et de la nature du matériau à laminer. Il sert essentiellement à amincir un matériau ou à plaquer un matériau sur un autre. Dans notre cas, ce procédé a été utilisé pour plaquer des bandes de résines sur les substrats non planaires (cf. figure II.58).

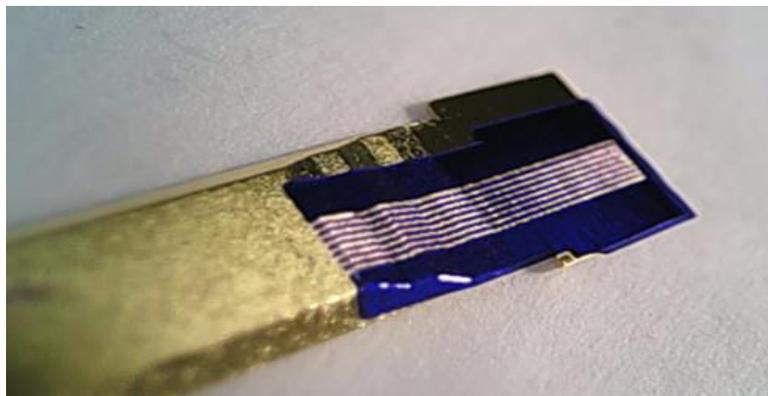


Figure II.58 : Plaquage d'un ruban de résine photosensible sur un substrat polymère 3D par laminage (TFP).

II.5.4 La gravure

La gravure vient généralement après l'étape de photolithographie. Elle consiste à éliminer les zones non protégées par la résine et à conserver celles qui le sont. Pour notre étude, la gravure est utilisée pour la définition des motifs métalliques.

Il existe principalement deux types de gravures :

- La gravure sèche: On peut citer ici la gravure plasma et la gravure laser. Dans le premier cas, une étape de définition des motifs est nécessaire au préalable. Tandis que pour l'ablation laser la définition des motifs se fait directement à l'aide du déplacement du faisceau dans les zones à graver. La gravure sèche peut être physique (bombardement d'éléments neutres à la surface de l'échantillon) ou chimique (gravure par réaction chimique).
- La gravure humide : Elle se fait en solution par attaque chimique isotrope de la surface à graver.

Selon l'usage, la gravure peut se faire de trois manières différentes : isotrope, anisotrope et quasi-anisotrope (cf. figure II.59).

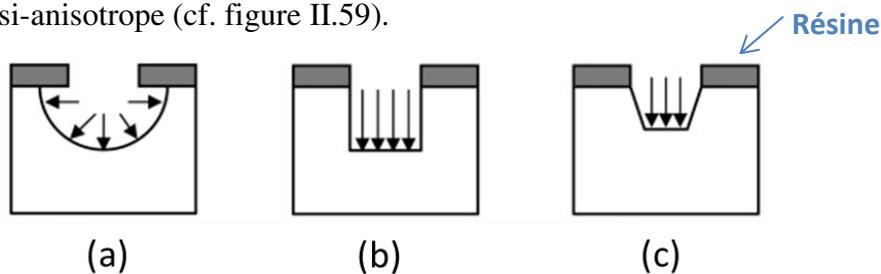


Figure II.59 : Gravure : (a) isotrope (b) anisotrope (c) quasi-isotrope.

II.5.5 Dépôt sous vide

Le dépôt sous vide est une technique de dépôt de couches minces. Il existe principalement deux méthodes de dépôt sous vide :

- Dépôt Physique en phase Vapeur (PVD) :

On peut distinguer deux grands types de dépôts PVD : l'évaporation et la pulvérisation cathodique auxquels peuvent ensuite être ajoutées des variantes (par ablation laser, par arc électrique,...). Dans notre cas, seule la pulvérisation cathodique a été utilisée.

Le système de dépôt par pulvérisation cathodique est composé de deux électrodes : une correspondant à la cible (cathode) et une au substrat sur lequel se fait le dépôt (anode) (cf. figure II.60 [15]). Une différence de potentiel appliquée aux deux électrodes provoque

l'ionisation d'un gaz (généralement l'Argon) formant ainsi un plasma. Les ions du plasma sont accélérés par le champ électrique vers la cathode et viennent arracher les atomes de la cible. Une grande partie de ces atomes est déposée à la surface du substrat sur lequel elle forme une couche de quelques nanomètres à plusieurs micromètres suivant le matériau déposé. Typiquement, la pulvérisation est réalisée dans des conditions de vide d'environ $5 \cdot 10^{-3}$ mbar. Dans notre cas, elle nous a servi à déposer des matériaux tels que le chrome ou le cuivre avec des épaisseurs allant de quelques nanomètres à une centaine de nanomètres. Ce pré-dépôt est suivi dans notre cas d'une étape de croissance (électrolytique ou auto-catalytique) afin d'obtenir des couches de quelques micromètres d'épaisseurs.

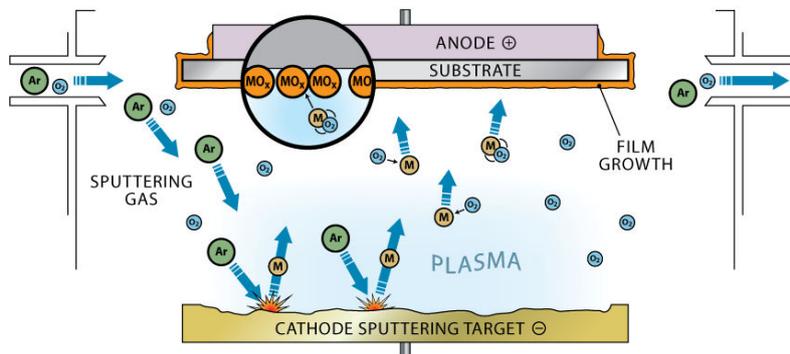


Figure II.60 : Schéma de principe du dépôt par pulvérisation cathodique [15].

- Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) :

Dans le cas de la CVD, le dépôt résulte de réactions chimiques se produisant à la surface du substrat générant le dépôt désiré. En effet, un précurseur arrive dans l'enceinte sous la forme d'un gaz qui se décompose ou réagit avec d'autres précurseurs pour créer une couche mince à la surface du substrat. Afin d'amorcer les réactions chimiques, le substrat est soumis à des températures généralement élevées (souvent entre 300 et 900°C). Les produits résiduels issus des réactions chimiques sont pompés et envoyés à l'extérieur de l'enceinte (cf. figure II.61 [16]).

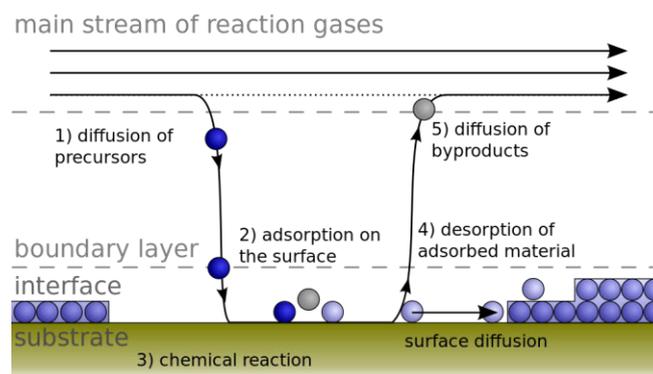
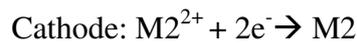
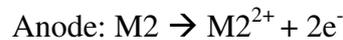


Figure II.61 : Schéma de principe du dépôt chimique en phase vapeur (CVD) [16].

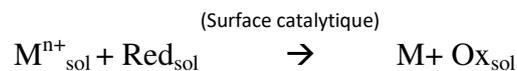
II.5.6 Croissance électrolytique et croissance auto-catalytique

Dans le cas de la croissance électrolytique, le dépôt se fait grâce à des réactions d'oxydoréduction non-spontanées. Ces réactions sont provoquées par un courant électrique externe appliqué aux électrodes plongées dans une solution électrolytique. L'échantillon à métalliser est placé au niveau de la cathode. Il existe deux manières d'avoir la source du métal à déposer ; soit le métal est en solution (cas de l'anode non soluble), soit l'anode est constituée du métal à déposer (cas de l'anode soluble). Dans le premier cas, les ions migrent à partir de la solution. Dans le second cas, les ions métalliques M^{n+} sont arrachés à l'anode et migrent vers la cathode où ils subissent une réaction de réduction se traduisant par un dépôt métallique. Sur l'exemple de la figure II.62, les réactions se produisant au niveau des électrodes sont les suivantes (cas de l'anode soluble) :



L'électrolyse a été utilisée pour l'obtention des filtres en alumine et silice fondue fabriqués par TFP et μ ul. Nous l'avons par ailleurs testé sur le substrat COP (IETR Rennes).

A la différence d'une croissance électrolytique, la croissance auto-catalytique ne nécessite pas de source de tension externe mais nécessite néanmoins une chimie complexe avec des réducteurs, des agents complexants, des agents stabilisants... et, surtout un catalyseur qui permet l'initiation de la réaction d'oxydoréduction. Sans tenir compte des réactions chimiques auxiliaires, la réaction lors du dépôt obtenu sur l'échantillon immergé dans la solution aqueuse peut être décrite par la réaction d'oxydoréduction suivante :



L'autocatalyse a été utilisée pour la réalisation des filtres en COP au Lab-STICC.

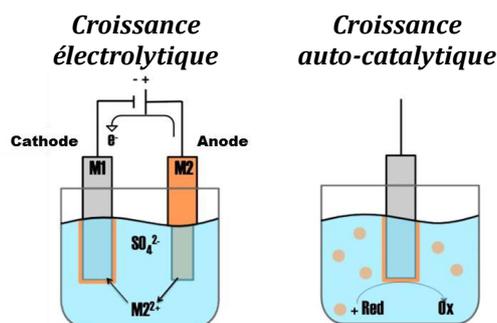


Figure II.62 : Schémas de principe de la croissance électrolytique et de la croissance auto-catalytique.

II.6 Procédé de fabrication des filtres SIW en alumine et en silice fondue

Les filtres SIW en alumine et en silice fondue sont réalisés par une technique d'ablation laser fonctionnant dans l'ultraviolet suivie de techniques de photolithographie et de croissance électrolytique pour la métallisation. Les sociétés TFP et μ UL collaborent pour la réalisation de ces filtres. TFP s'occupe du perçage et de la métallisation et μ UL s'occupe de l'ablation laser au niveau des accès et des marches de la transition 3D. La procédure adoptée est la suivante :

- Perçage des trous (vias) et des trous d'alignement chez TFP (cf. figure II.63)
- Ablation laser des marches chez μ UL.
- Définition des motifs par photolithographie et métallisation par croissance électrolytique chez TFP.

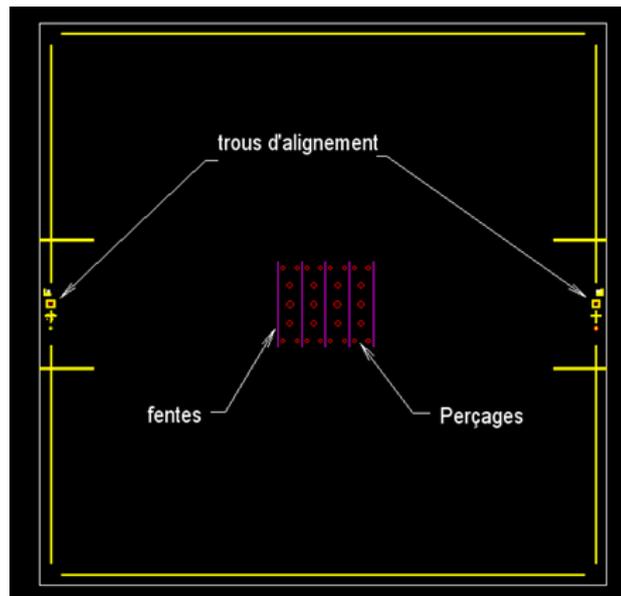


Figure II.63 : Masques de 4 filtres sur substrat d'alumine 2 pouces après perçages et délimitation par fente chez TFP.

La technique d'ablation laser doit être compatible à la fois avec les substrats alumine et silice fondue. Les caractéristiques thermiques étant moins bonnes dans le cas de la silice, il faut privilégier des solutions de découpe laser sans processus thermique ou à impulsion ultra-brève. La société μ UL utilise le laser Ultra-Violet UV émettant à 355 nm avec un diamètre de faisceau de 25 μ m pour l'ablation. Contrairement à l'Infrarouge IR, le laser UV induit bien moins d'échauffement et bien moins d'effets de bords dus à la fusion du matériau. Néanmoins, suite à l'étude de réalisabilité avec la silice fondue, la longueur d'onde du laser

utilisé chez μ UL s'est avérée non adaptée à l'ablation de la silice. Pour une ablation plus adaptée de ce matériau, nous nous sommes orientés vers l'équipe Equipex LEAF de l'IEMN Lille qui possède un laser fonctionnant à une longueur d'onde de l'ordre de 200 nm, logiquement mieux adaptée à la silice. Faute de temps, nous n'avons pas pu réaliser ces essais qui sont néanmoins envisagés dans les semaines qui viennent.

Après ablation des transitions et perçage des vias par laser, le filtre est métallisé par des motifs d'or de 5 μ m d'épaisseur. La métallisation des motifs est faite à l'aide du procédé de photolithographie combiné à une croissance électrolytique d'or (cf. figure II.64). Un premier dépôt d'une très fine couche d'or (quelques dizaines de nm) est effectué sous vide. Ensuite, l'étape de photolithographie permet de réaliser des motifs avec la résine photosensible, ces motifs servent de couches de masquage lors de l'étape suivante de la croissance électrolytique de l'or. Pour la photolithographie, rappelons qu'en raison des grandes difficultés à effectuer un dépôt correct avec une résine photosensible liquide par des techniques telles que la tournette ou l'immersion sur des substrats 3D, la société TFP a opté pour des résines en bande plaquée sur la surface du substrat par une technique proche du laminage (cf. figure II.58). A la fin, une gravure de la résine puis celle de l'or inter-motif sont réalisées.

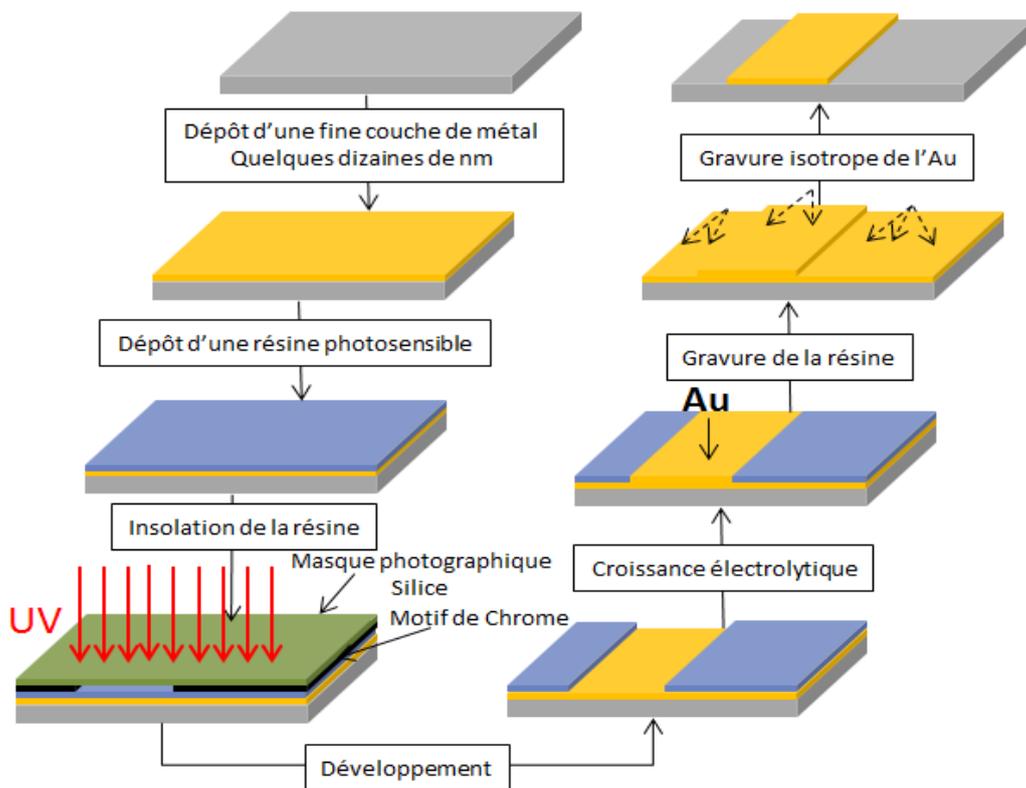


Figure II.64 : Procédé de métallisation des filtres alumine et silice fondue (TFP).

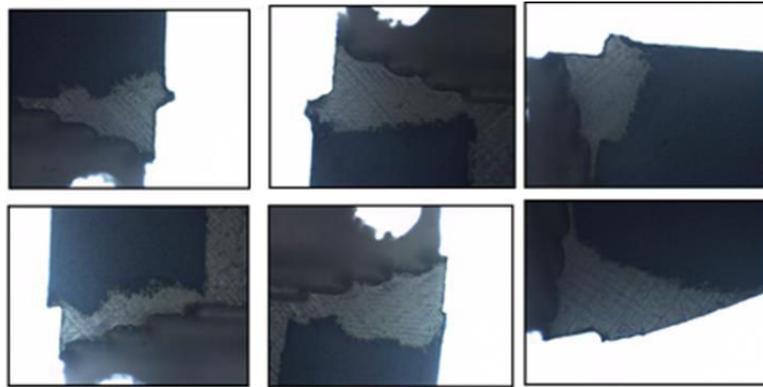
La figure II.65 présente les premiers prototypes réalisés en alumine. Sur ces structures, on relève principalement deux défauts :

- La forme des trous: Ce défaut est due au fait que les diamètres adressés sont proches de la limite de la technologie.
- Les bavures de métallisation au niveau des accès : Après ablation laser, la rugosité de la surface est dix fois plus importante que celle du substrat initial, soit une valeur de $1,5 \mu\text{m}$. Cette rugosité permet une meilleure adhérence du métal sur les marches de la transition mais entraîne un mauvais dépôt métallique pour une utilisation en bande millimétrique. La rugosité à laquelle s'ajoute le mauvais plaquage de la résine au niveau des marches de la transition et des problèmes d'alignement en 3D du masque peuvent très probablement expliquer les bavures de métal en bas de la transition.

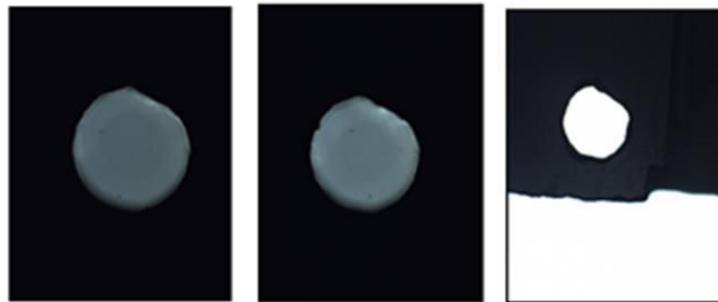


Figure II.65 : Clichés des premiers prototypes en alumine.

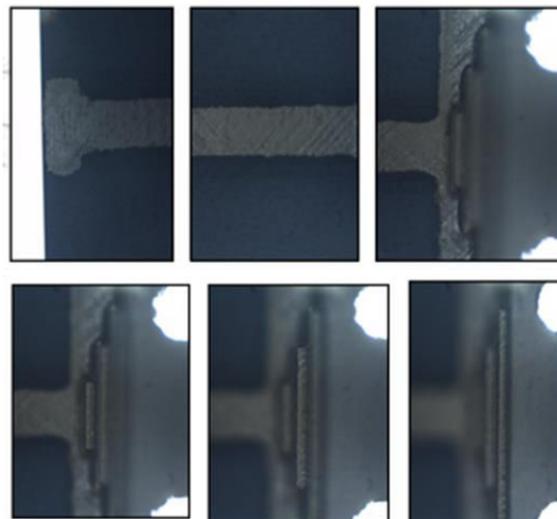
La figure II.66 présente des clichés réalisés au microscope optique des différents défauts cités ((a) et (b)) ainsi que ceux des marches de la transition 3D et de l'accès microruban (c).



(a)



(b)



(c)

Figure II.66 : Clichés pris au microscope optique des défauts de réalisation des filtres en alumine: Défaut de métallisation (a) défaut de forme des trous (b) et clichés de l'accès microruban et des marches de la transition 3D (c)

Ces défauts ont été pris en compte lors de la deuxième fabrication. Après optimisation des paramètres de l'ablation laser des marches de la transition 3D et du substrat au niveau de la ligne d'accès microruban, l'état de surface s'est nettement amélioré ce qui a permis une meilleure métallisation. Le prototype ainsi révisé est présenté sur la figure II.67. Nous notons par ailleurs une nette amélioration de la qualité de perçage des trous métallisés.

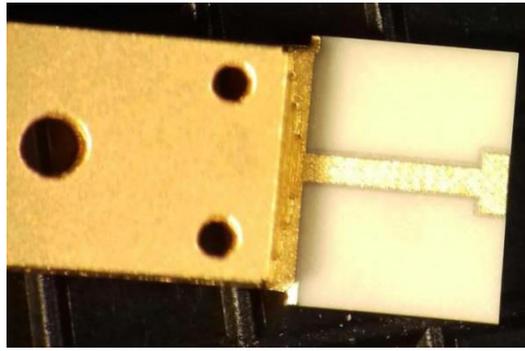


Figure II.67 : Cliché du deuxième prototype alumine après optimisation des paramètres de l'ablation laser.

II.7 Procédé de fabrication des filtres SIW en polymère COP

Dans cette étude, le procédé de réalisation du filtre COP est exploratoire puisque pour cette voie, tout est nouveau, que cela soit l'utilisation du COP pour le spatial ou bien sa mise en forme 3D pour des applications dans le domaine des ondes millimétriques. Une première étude avait été effectuée au Lab-STICC préalablement (projet ANR COCORICO 2012-2015), toutefois, les contraintes dimensionnelles ; principalement en termes de sensibilité étaient bien moindres. Par ailleurs, la métallisation développée au Lab-STICC, n'était pas encore suffisamment avancée au moment de cette première étude.

La mise en forme du substrat est assurée par une technique de moulage par injection. Plusieurs pistes sont considérées pour le perçage et la métallisation afin de déterminer le meilleur procédé à suivre : Pour les trous (vias), perçage mécanique (Open UBO Factory) ou perçage Laser (EquipEx LEAF de l'IEMN Lille) pour obtenir de meilleures précisions. Pour la métallisation : PVD + autocatalyse (Lab-STICC UBO) ou PVD + électrolyse (IETR Rennes).

II.7.1 Etape de moulage

Le moulage est effectué à l'aide d'une presse à injecter *Babyplast* disponible au Lab-STICC et permettant la fabrication de pièces en petite série. Le moule du filtre est réalisé chez la société Alain Guelpa Concept. Le moule est composé de deux pièces principales, une fixe présentant une face interne plane et au travers de laquelle se fait l'injection, et une mobile dans laquelle se trouve l'empreinte en cavité de l'objet à mouler ainsi que les éjecteurs qui permettent de sortir la pièce à la fin du procédé d'injection (cf. figure II.68). Dans le cadre de travaux antérieurs, réalisés au Lab-STICC, les paramètres de la presse à injecter avaient été optimisés pour le COP. Le tableau II.5 résume ces paramètres.

Tableau II.5: Paramètres de la presse à injecter pour le moulage du COP.

Températures de moulage	<i>R1 : 290°C, R2 : 290°C, R3 : 290°C</i>
1^{ère} pression d'injection	<i>90 Bar</i>
Temps de la 1^{ère} pression	<i>2 s</i>
2^{ème} pression d'injection	<i>74 Bar</i>
Pression d'éjection	<i>25 Bar</i>
Temps de recul de la buse	<i>2 s</i>
Température de refroidissement	<i>77°C</i>
Temps de refroidissement	<i>2 s</i>

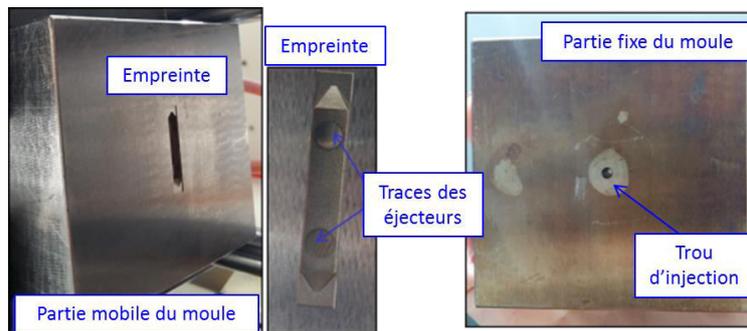


Figure II.68 : Moule du filtre COP.

Après les premières réalisations des pièces par injection, deux défauts avaient été relevés : une rugosité importante de la surface des pièces moulées et une trace profonde des éjecteurs. La figure II.69 présente un cliché pris au microscope confocal Zeiss (service commun PIMM de l'UBO) sur lequel les deux défauts sont clairement perceptibles. La détermination de la rugosité de surface avec ce type de technique est possible mais nécessite des temps d'acquisition très importants. Par la suite, les mesures de rugosité ont été effectuées à l'aide d'un profilomètre à stylet *Dektak 150*.

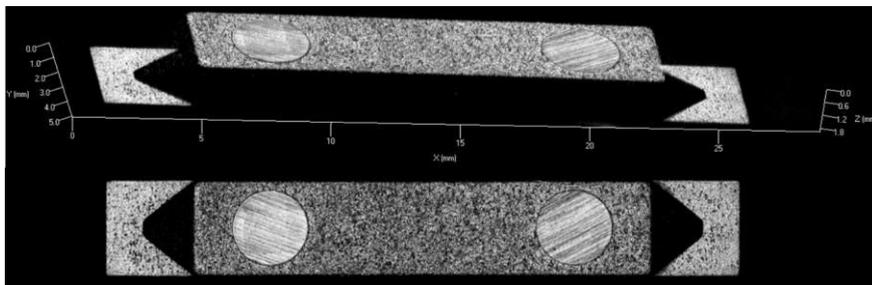


Figure II.69 : Cliché au microscope confocal Zeiss de la pièce moulée après première injection (PIMM UBO).

Les mesures au *profilomètre* ont été faites sur des distances de $500 \mu\text{m}$ et de 1 mm . La figure II.70 (a) montre des mesures faites sur la surface de l'échantillon (hors zones de trace d'éjection). La figure II.70 (b) montre les mesures faites uniquement au niveau des traces d'éjection. Enfin la figure II.70 (c) présente les profils de l'empreinte entière due aux

éjecteurs (profil sur une distance de 3mm). Cette mesure nous a permis d'évaluer la profondeur de ces traces. Les valeurs des rugosités arithmétiques et quadratiques ainsi que les profondeurs des traces dues aux éjecteurs sont résumées dans le tableau II.6. Notons que chaque mesure a été réalisée sur trois échantillons.

Tableau II.6 : Résultats de mesures de rugosité des pièces injectées dans l'ancien moule.

	Rugosité sur 500 µm				Rugosité sur 1 mm				Rugosité sur 3 mm	
	Surface		Ejecteur		Surface		Ejecteur		Profondeur de l'éjecteur	Pic max
	Ra	Rq	Ra	Rq	Ra	Rq	Ra	Rq		
Échantillon 1	2,07µm	2,63µm	1,27µm	1,5µm	2,5µm	3,2µm	1,57µm	1,9µm	21,12µm	38,4µm
Échantillon 2	2,44µm	3,3µm	0,51µm	0,63µm	2,47µm	3,32µm	0,64µm	0,78µm	23,33µm	34,9µm
Échantillon 3	2µm	2,6µm	0,51µm	0,64µm	2,15µm	2,9µm	0,5µm	0,65µm	30,28µm	35,27µm
Moyenne	2,17µm	2,84µm	0,76µm	0,92µm	2,37µm	3,14µm	0,9µm	1,11µm	24,91µm	36,19µm
Ecart type	0,24	0,4	0,44	0,5	0,19	0,22	0,58	0,69	4,78	1,92

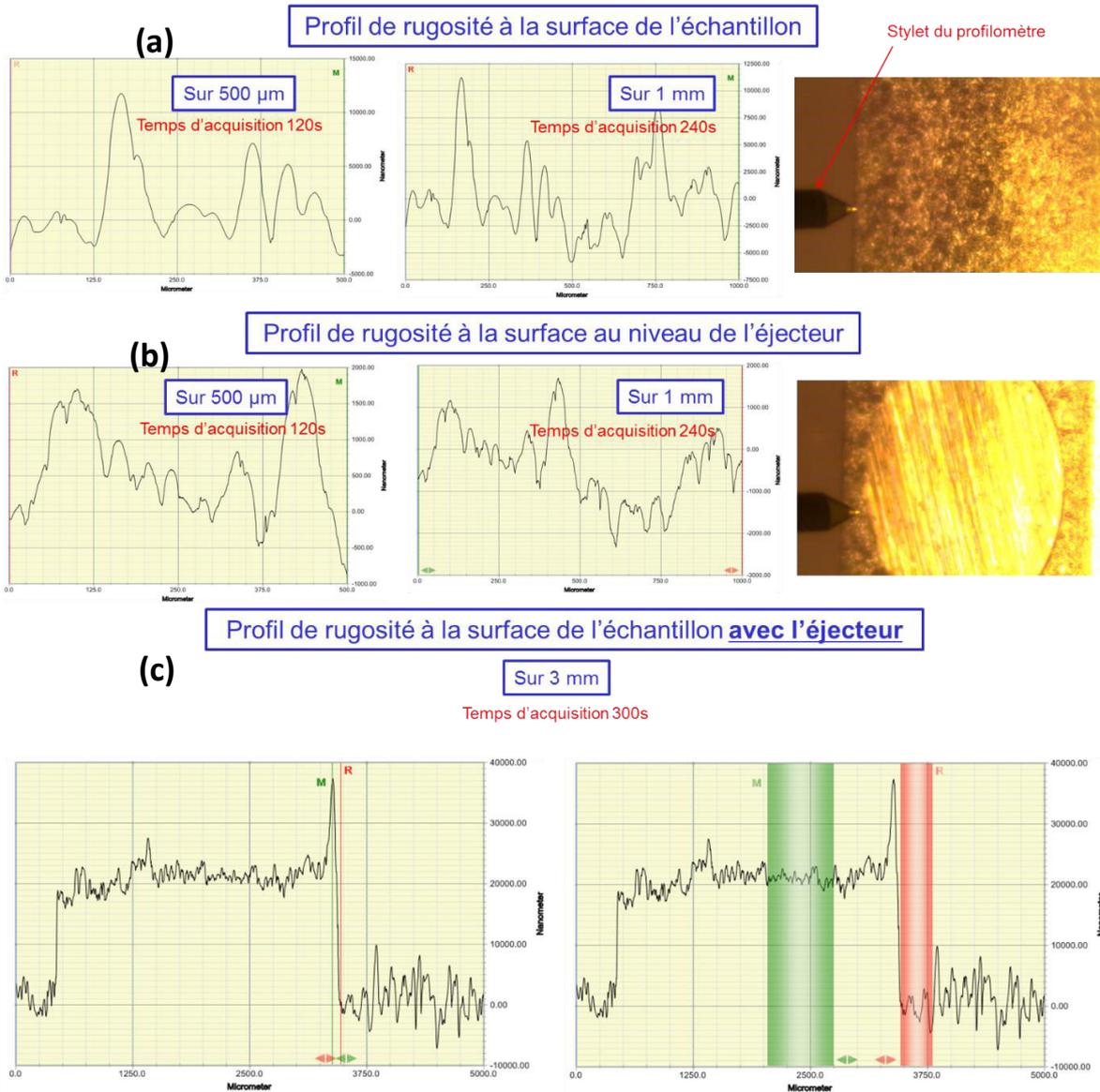


Figure II.70: Mesure de rugosité au profilomètre.

Les valeurs de rugosités et de profondeurs des éjecteurs sont très importantes. Ces différents défauts entraineront inévitablement une dégradation des performances du filtre, notamment par augmentation des pertes d'insertion. Notons au passage une légère amélioration de l'état de surface au niveau de l'éjecteur due à l'aplatissement de la matière à ce niveau. Afin de tenter de minimiser ces défauts de surface, nous avons testé deux traitements post-moulage par traitement thermique ou chimique (cf. figure II.71).

Le traitement thermique consiste à placer l'échantillon rugueux sur une plaque de verre de rugosité très faible (quelques nanomètres) et de placer le tout sur une plaque chauffante à une température aux alentours de la température de transition vitreuse du COP (150°C). Le traitement chimique consiste à utiliser la vapeur d'un bon solvant pour le COP afin de dissoudre légèrement la surface de l'échantillon pour la lisser. Dans cette étude le solvant utilisé est le toluène.

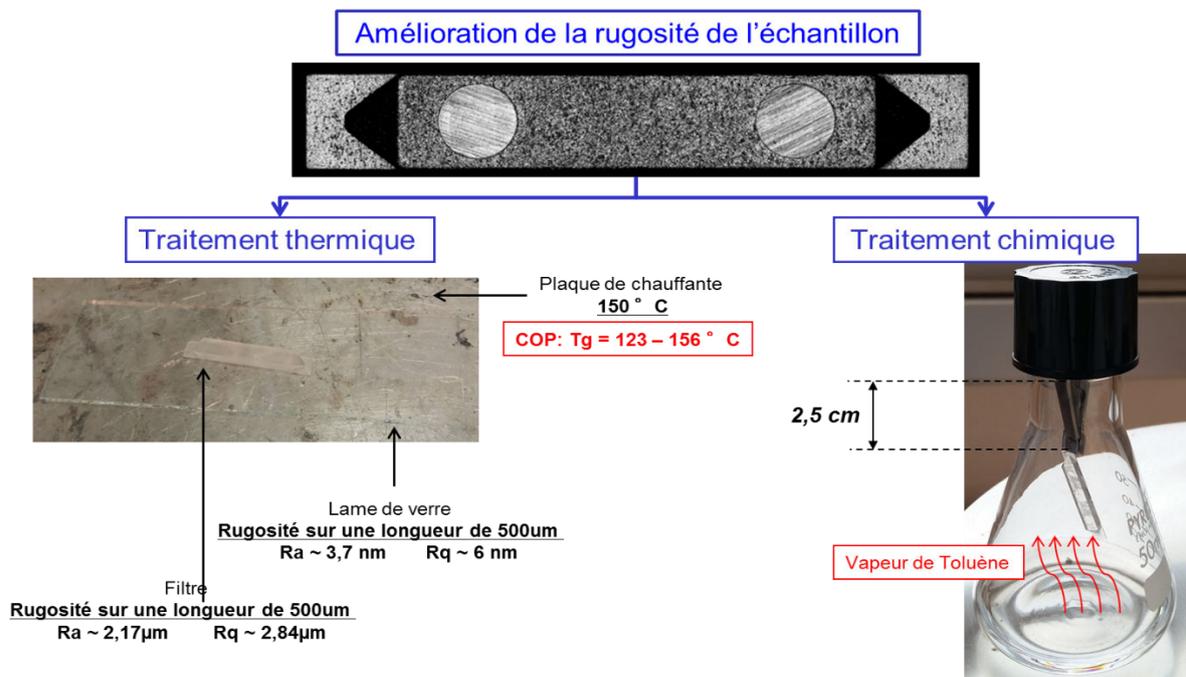


Figure II.71 : Traitement thermique et traitement chimique des échantillons rugueux.

La figure II.72 montre visuellement l'évolution de l'état de surface des échantillons après traitement thermique et chimique. La figure II.73 présente des exemples de mesures effectuées au profilomètre de ces échantillons.

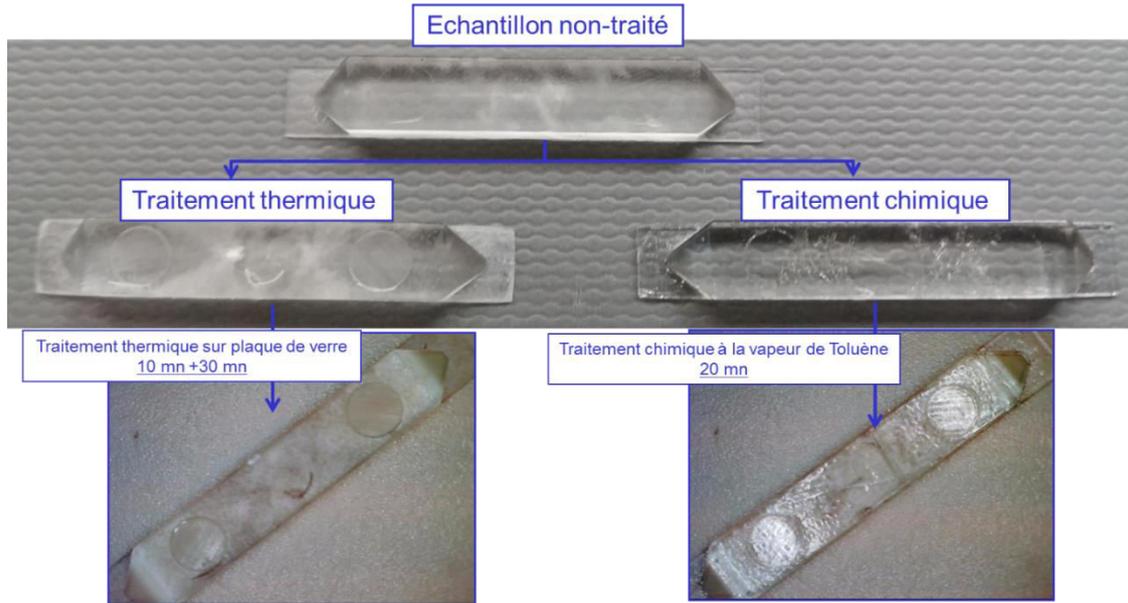


Figure II.72 : Photos des échantillons sans traitement et avec traitements chimique et thermique.

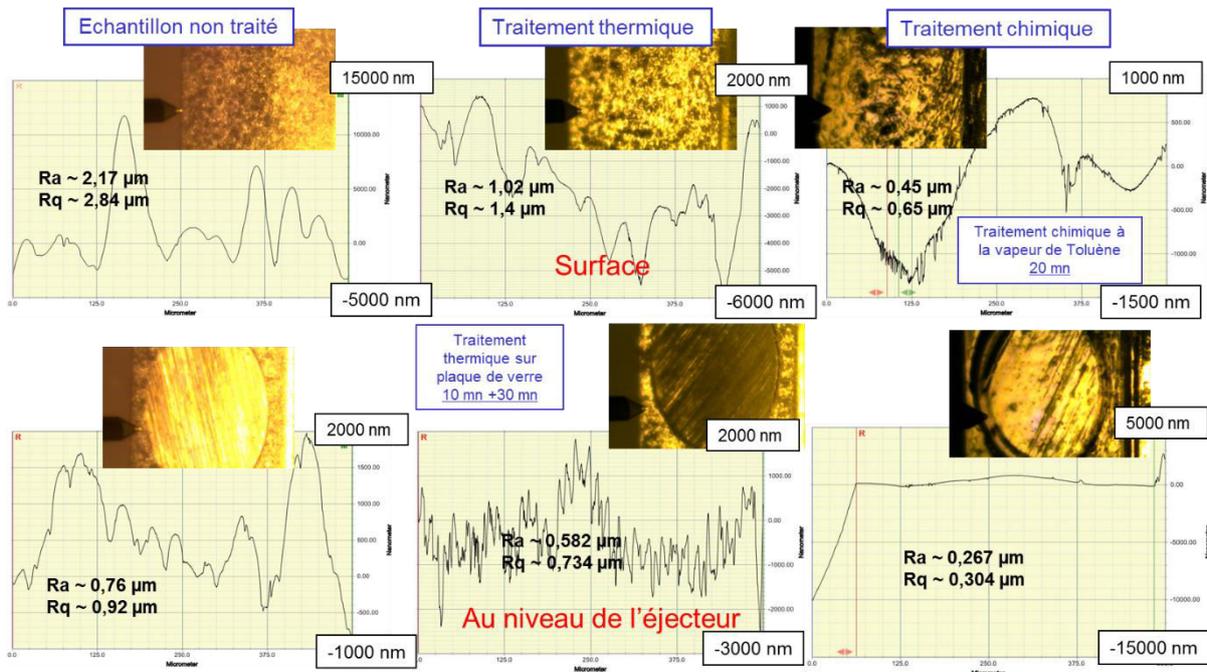


Figure II.73 : Profils de rugosités des échantillons sans et avec traitements thermique et chimique.

On constate que le traitement chimique apporte une meilleure évolution de la rugosité. Toutefois, le traitement thermique est insuffisant pour l'obtention d'un état de surface correcte et le traitement chimique entraîne un affaissement au niveau de la trace de l'éjecteur et modifie les dimensions ainsi que la forme des extrémités de l'échantillon (cf. figure II.74). Pour ces raisons et faute de temps, nous n'avons pas voulu poursuivre cette voie et nous avons opté pour un traitement sur le moule en amont. Par ailleurs, nous avons aussi demandé au mouliste de nous faire une modification au niveau des éjecteurs ; au lieu de deux éjecteurs

cylindriques qui laissent des traces sur la surface de l'échantillon, nous avons choisi un unique éjecteur plat qui pousse la pièce sur toute la surface supérieure. Le résultat de ces modifications est significatif et est montré sur les figures II.75 et II.76.

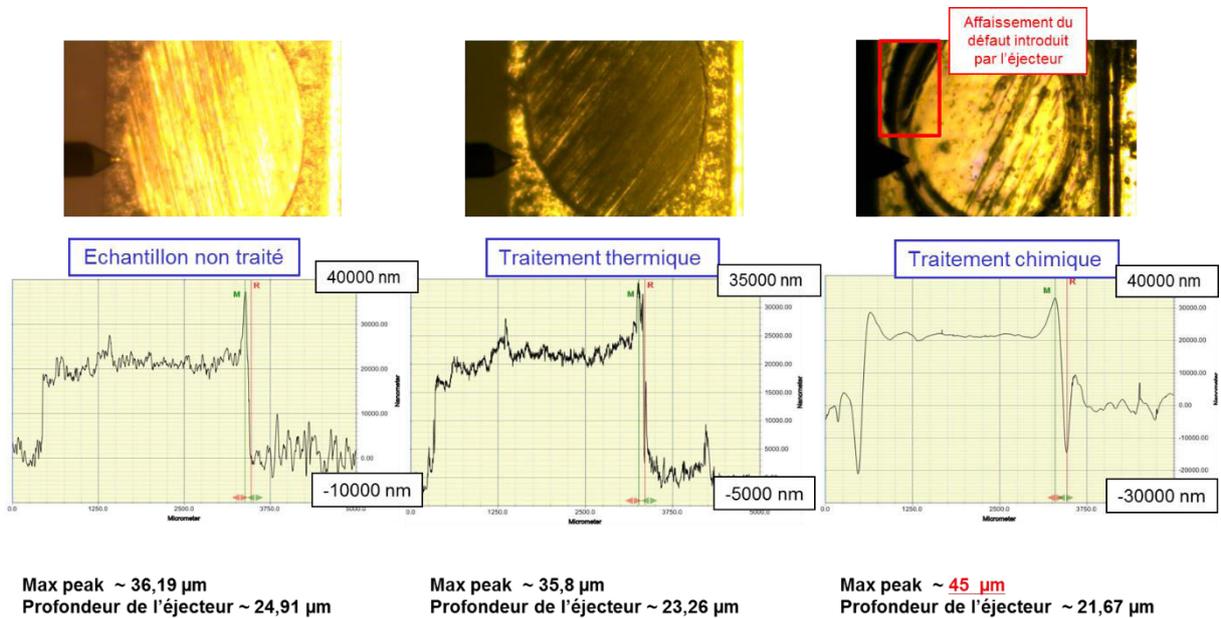


Figure II.74 : Profils des traces des éjecteurs après traitements thermique et chimique.

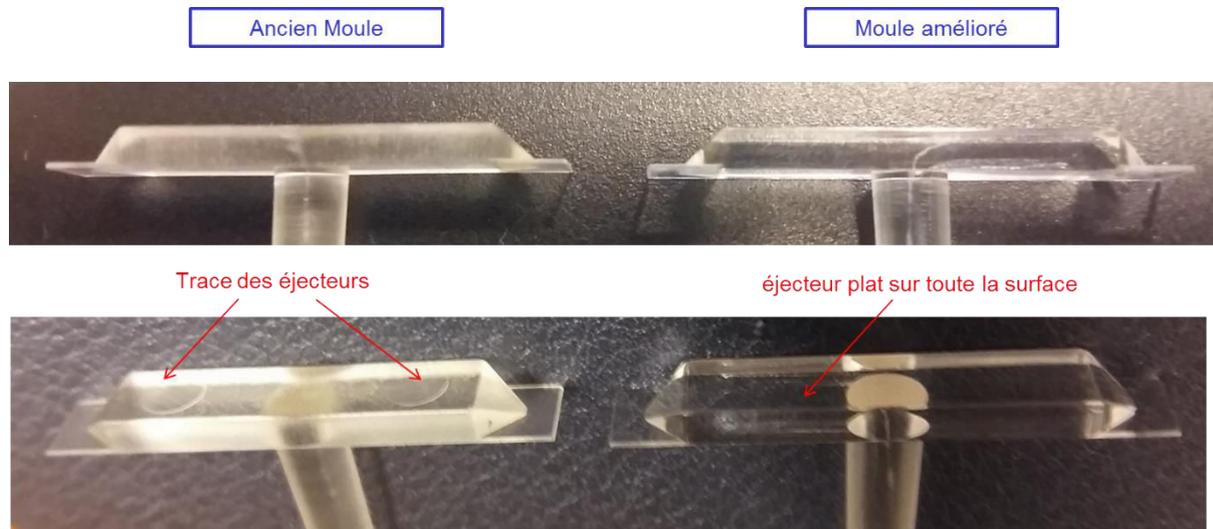


Figure II.75 : Photos des pièces injectées obtenue avec l'ancien moule et le moule amélioré.

Les échantillons obtenus après améliorations du moule sont transparents en raison de la faible rugosité de surface qui est d'une dizaine de nanomètres. Le seul travail qui reste à faire au niveau de ses échantillons est l'enlèvement de la carotte d'injection et le polissage de la surface de l'échantillon à ce niveau. Ce travail est fait manuellement à l'aide d'une lime et de papier abrasif.

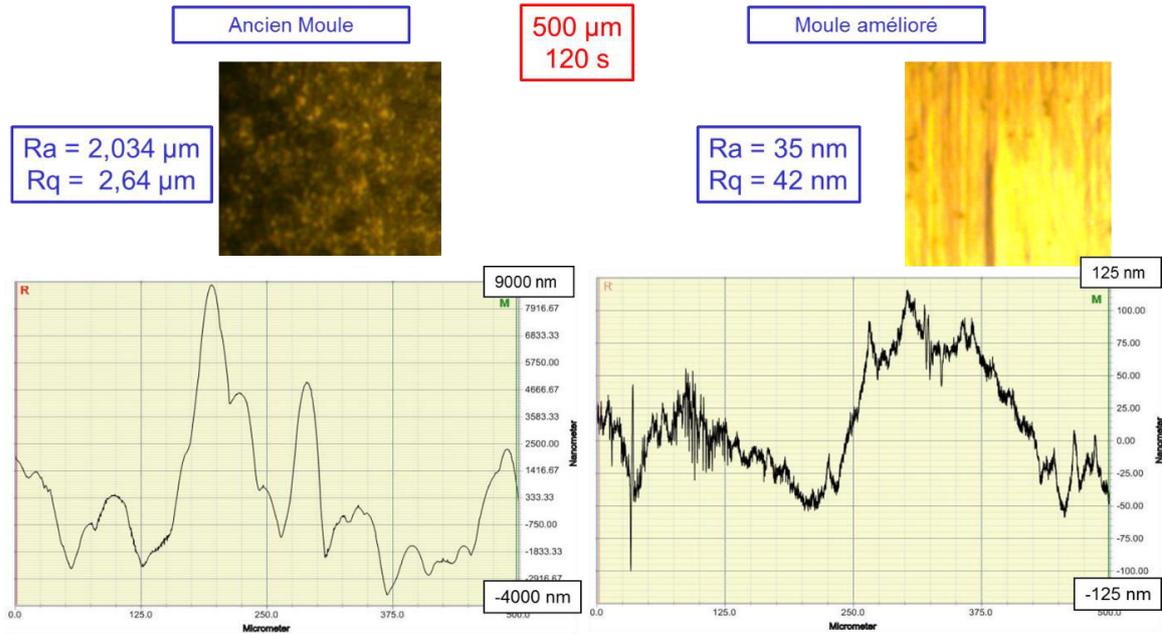


Figure II.76 : Mesures de rugosités des surfaces des échantillons obtenus avec l'ancien moule et le moule amélioré.

II.7.2 Etape de perçage

Dans un premier temps, nous avons opté pour un perçage mécanique à l'aide de la micro-usineuse LPKF disponible à l'Open UBO Factory. Une première étape consistait à optimiser les paramètres de la machine afin d'avoir des trous propres sans bavures ni cassures du COP. La figure II.77 présente l'évolution des essais de perçage sur une plaque de COP de 3 mm pour différents diamètres de trous.

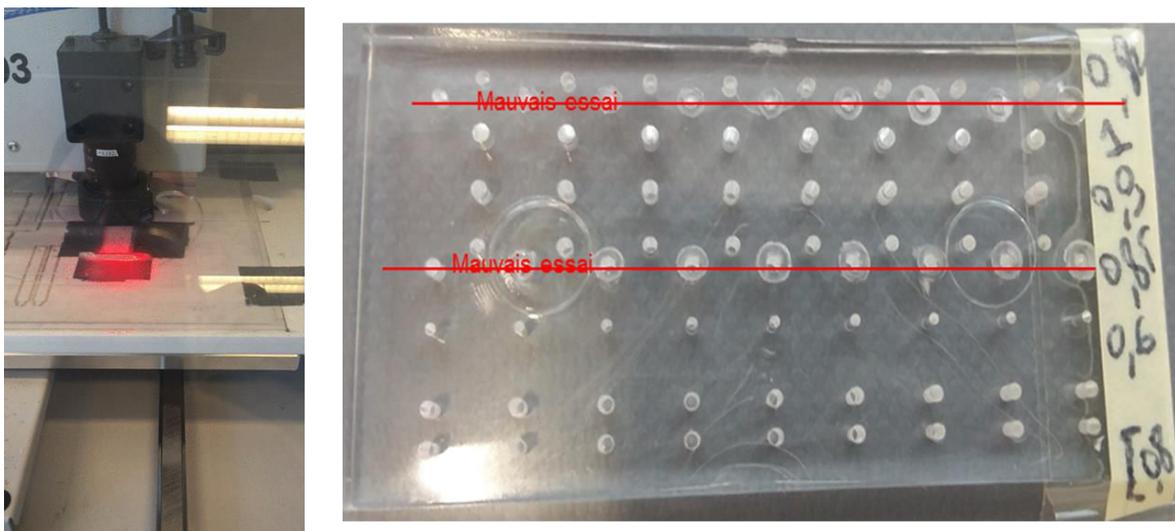


Figure II.77 : Evolution de la qualité du perçage suite à une optimisation des paramètres de la LPKF pour le perçage du COP.

Une fois les paramètres de perçage optimisés, les filtres sont placés pour le perçage. Un problème d'alignement des trous a été identifié lors des premiers perçages (cf. figure II.78). Ceci est dû à la petitesse de la pièce qui engendre des difficultés de placement sur la plateforme de perçage et son repérage par la caméra de la machine.

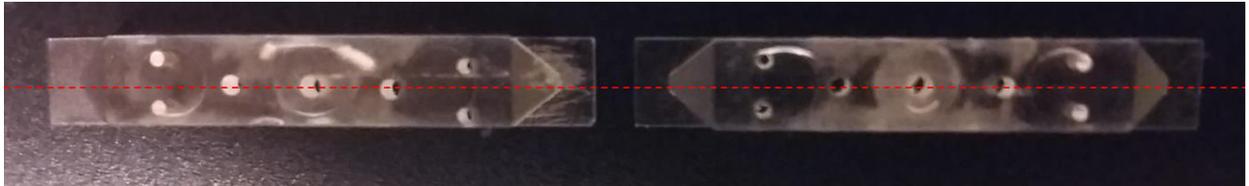


Figure II.78 : Problème d'alignement des trous.

Afin de s'affranchir de ce problème, nous avons imaginé un support qui contiendrait la pièce et qui serait plus facile à fixer avec du scotch sur la plateforme de la machine sans toucher aux extrémités du filtre qui restent visibles à la caméra (cf. figure II.79).

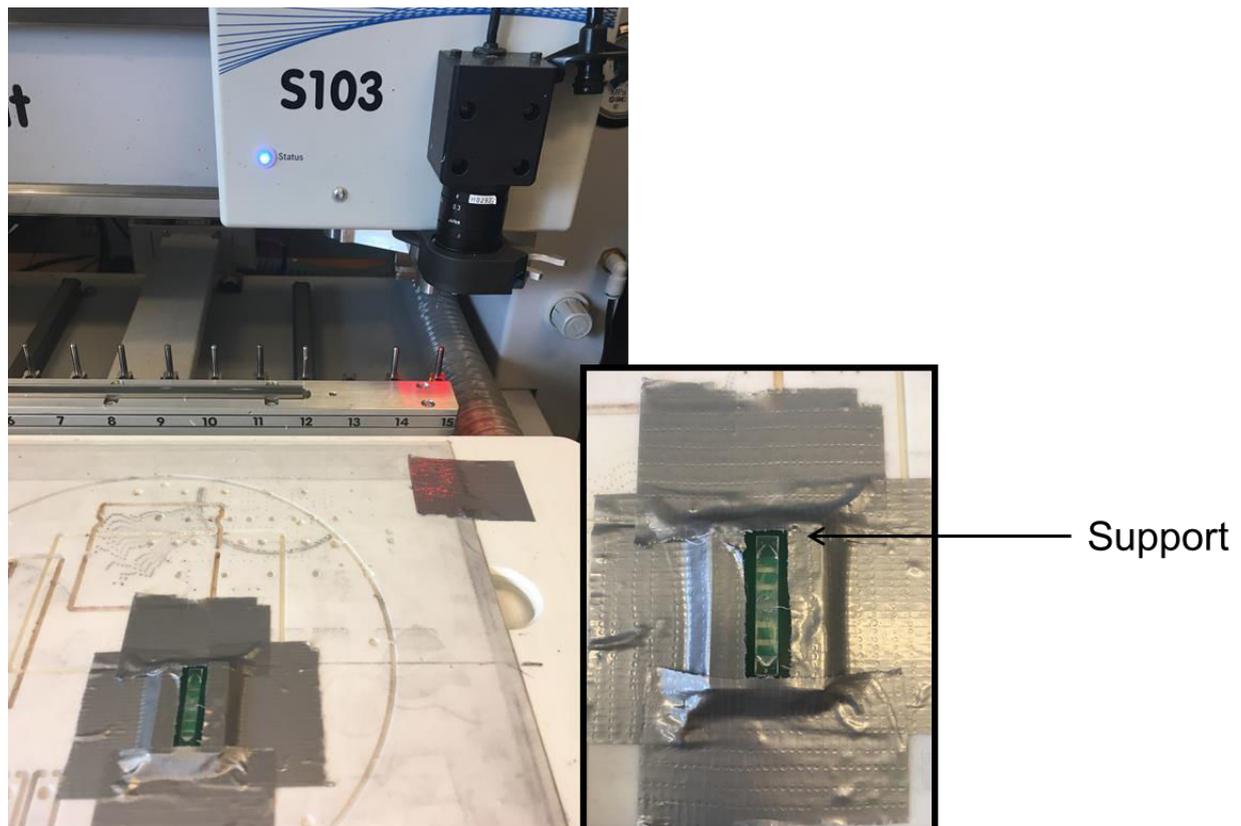


Figure II.79 : Placement de l'échantillon sur la plateforme de la LPKF (Fablab).

Le support a été imprimé à l'aide d'une imprimante 3D stéréolithographie (projet 1200) disponible à l'Open UBO Factory. Une première étape consiste à imprimer l'objet.

Suite à l'impression, l'objet doit être introduit dans un bain d'alcool afin de le nettoyer des résidus de la résine non insolée. Il est par la suite replacé dans un compartiment de post-traitement de l'imprimante afin de le sécher.

Le support a nécessité une étape d'optimisation des dimensions de telle manière à pouvoir placer la pièce solidement avec toutefois la possibilité de pouvoir l'enlever du support sans la casser. La figure II.80 montre le support après optimisation. Notons que pour ce dernier, nous avons imaginé des fentes permettant d'y introduire une sorte de fourchette servant d'éjecteur pour la pièce. Les fentes sont placées au niveau des trous afin d'éviter que l'outil de perçage ne perce le matériau du support en résine et n'introduise des débris dans les trous en remontant.

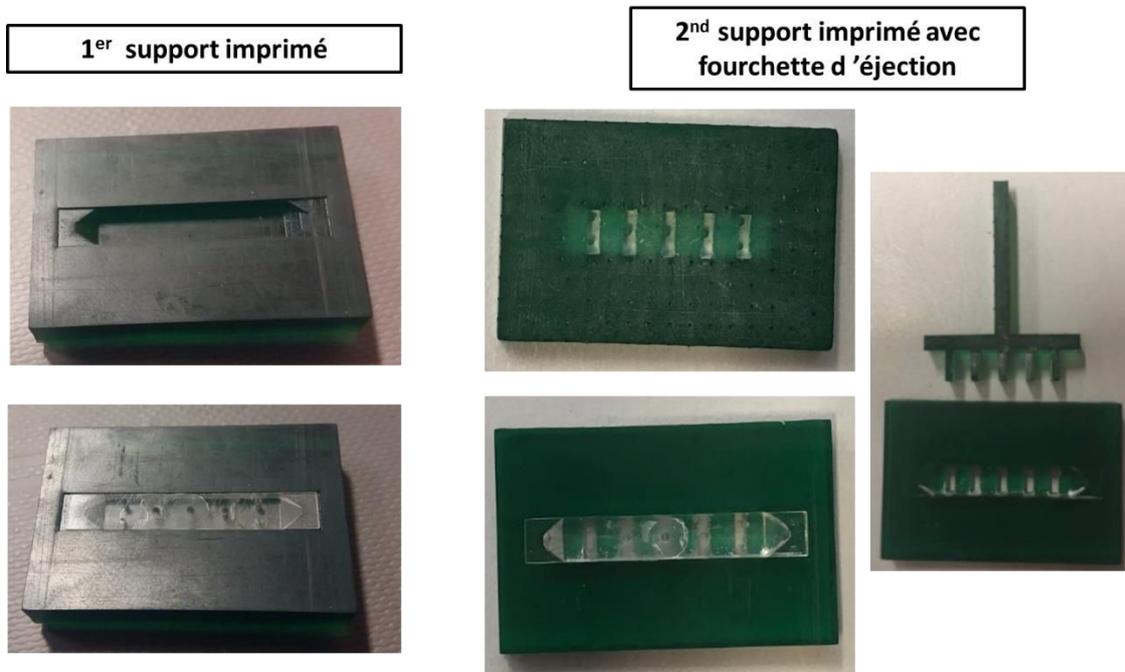


Figure II.80 : Placement de l'échantillon sur la plateforme de la LPKF (Fablab).

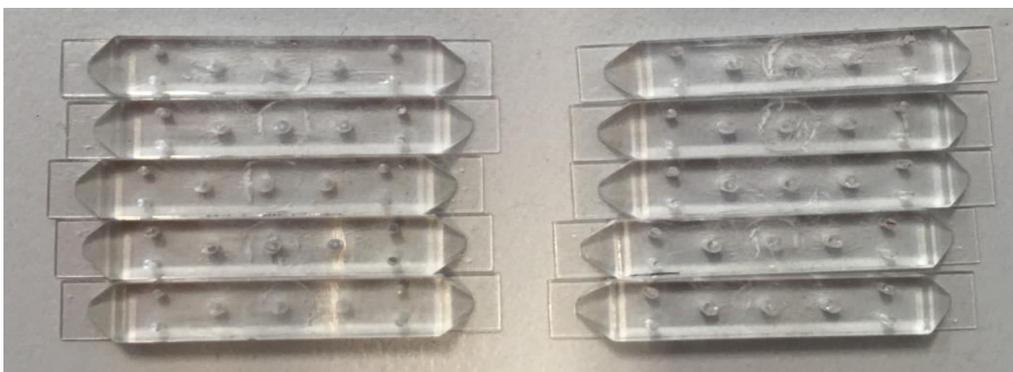


Figure II.81 : Echantillons percés à la LPKF.

La principale limitation de la LPKF concerne le peu de possibilité de perçage qu'elle offre en termes de petits diamètres sur des épaisseurs importantes. En effet, plus le diamètre de l'outil est petit plus sa longueur est faible, car plus fragile, interdisant de réaliser des motifs profonds. Par ailleurs, étant donnée la précision de la machine et les diamètres standards des outils, il est inenvisageable de réaliser des trous avec une précision meilleure que $50 \mu\text{m}$. D'un point de vue conception, cette solution de perçage limite la flexibilité du design et réduit les degrés de liberté. Avec un effort sur les réglages des diamètres des trous à l'étape de conception, nous nous sommes limités avec cette technique à des trous de diamètres : $0,6 \text{ mm}$, $0,85 \text{ mm}$ et $0,9 \text{ mm}$ ce qui nous permet d'avoir un filtre centré sur 40 GHz avec une bande passante de 3% (cf. chapitre III). Les figures II.82 et II.83 présentent des clichés pris au microscope optique avec des grossissements $2,5\text{X}$ et 10X des trous d'un échantillon percé. Les espacements des trous sont vérifiés à l'aide d'une mire. La précision de cette mesure avec la mire reste néanmoins insuffisante pour évaluer la précision de l'outil.

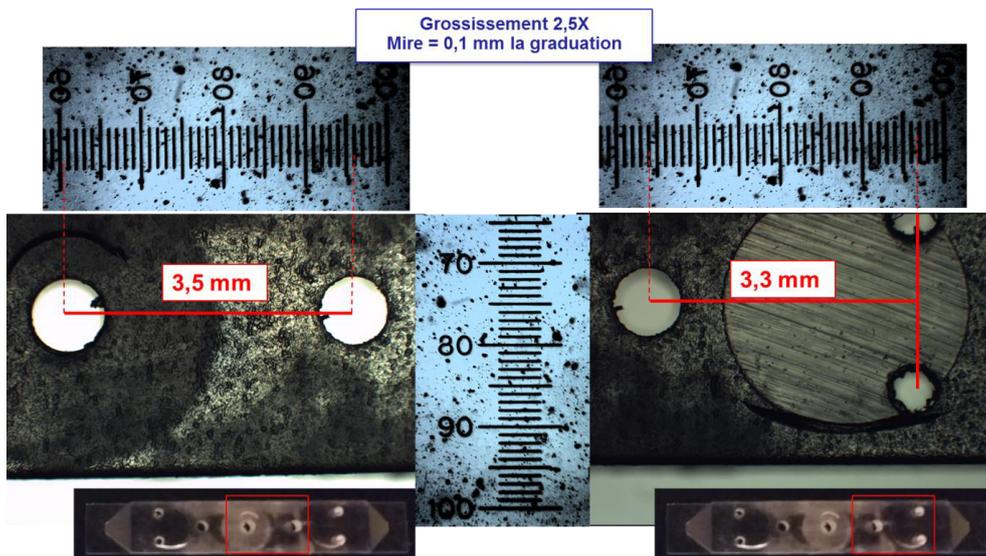


Figure II.82 : Clichés des trous pris au microscope optique avec un grossissement $2,5\text{X}$.

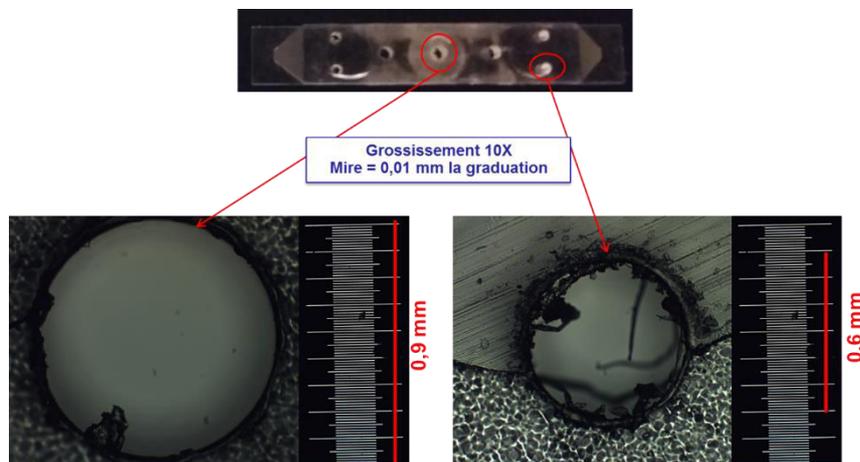


Figure II.83 : Clichés des trous pris au microscope optique avec un grossissement 10X .

Pour un perçage plus précis avec plus de flexibilité sur les diamètres des trous, nous avons contacté l'équipe de la plateforme Equipex Leaf de l'IEMN. Cette plateforme est dotée de deux équipements Oxford femto-seconde multi-longueur d'onde et UV nanoseconde. Pour le perçage du COP, le laser UV est utilisé afin de conserver l'intégrité du matériau et conserver ses bonnes propriétés électromagnétiques. La figure II.84 présente les photos et les clichés pris au microscope des perçages laser de plaques de COP de 1 mm d'épaisseur. Les diamètres visés (en rouge) ainsi que les diamètres obtenus après perçage sont résumés dans le tableau II.7. Il est envisagé comme suite de cette étude d'optimiser l'outil laser afin de réaliser différents perçages pour des filtres de différentes bandes passantes (cf. chapitre III).

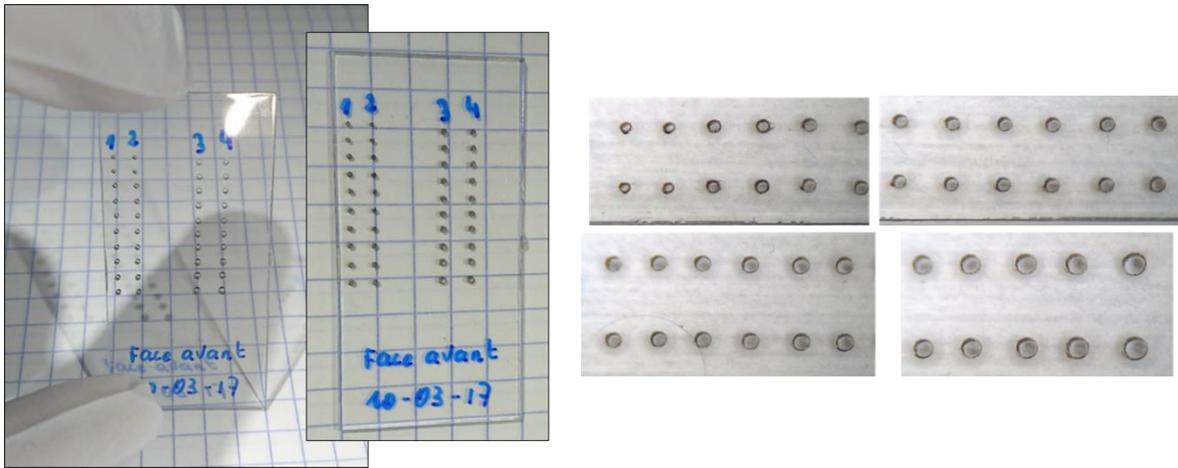


Figure II.84 : Perçage par ablation laser des plaques COP percées à l'aide du laser UV nanoseconde de la plateforme EquipEx Leaf de l'IEMN.

Tableau II.7 : Valeurs des diamètres obtenus à l'aide du perçage laser.

Diamètres visés (um)	Résultats_Diamètre des trous (um)			
	Face avant	Face arrière	Face avant	Face arrière
	1		2	
650	600	641	580	660
655	595	607	592	683
762	677	602	672	639
785	750	636	728	645
798	710	635	710	631
812	738	647	731	673
822	743	655	738	701
841	762	724	774	706
845	757	714	766	720
855	794	727	794	725
	3		4	
865	815	701	780	727
878	825	719	813	766
885	837	736	832	719
911	865	803	865	762
925	884	812	880	812
938	893	837	893	843
965	955	883	940	871
990	998	920	968	883
1014	1032	932	1008	951
1063	1091	1001	1052	994

II.7.3 Etape de métallisation

Pour la métallisation des filtres COP, deux procédés ont été envisagés :

- PVD + croissance auto-catalytique (Lab-STICC).
- PVD + Croissance électrolytique (IETR de Rennes).

Dans la suite de ce paragraphe, nous détaillons les étapes de métallisation développées au Lab-STICC pour la métallisation des filtres COP et dont l'enchaînement est présenté dans la figure II.85.

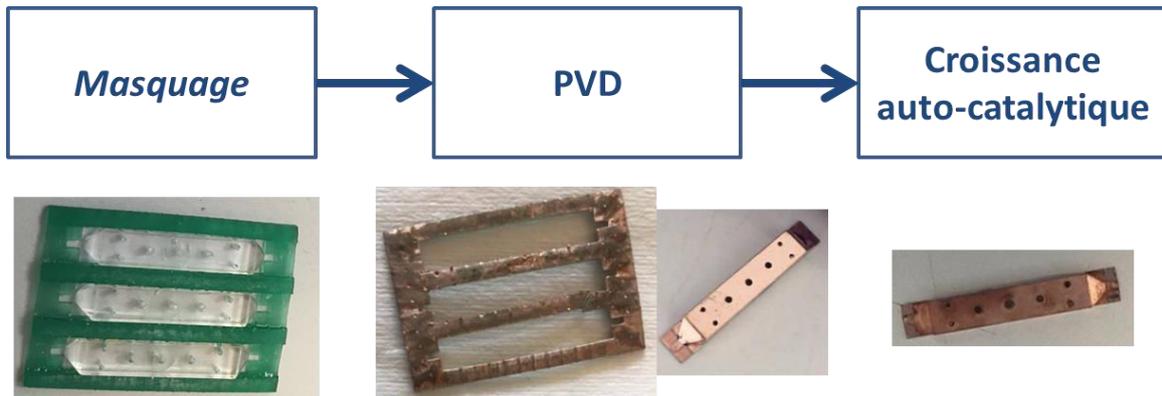


Figure II.85 : Etapes du procédé de métallisation développé au Lab-STICC.

Il s'agit d'un procédé de métallisation plein champ où seuls les accès microruban doivent être masqués avant la pulvérisation cathodique (PVD). Les masques, présentés sur la figure II.86, sont conçus sur le logiciel SolidWorks® pour contenir trois filtres et sont imprimés à l'aide de l'imprimante 3D stéréolithographique (projet 1200).

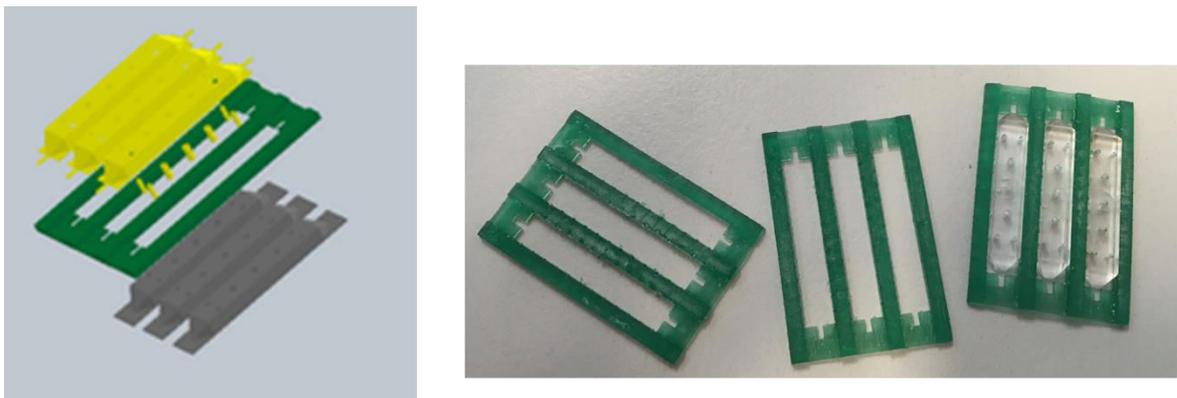


Figure II.86 : Masques réalisés par impression 3D et utilisés à l'étape de pulvérisation cathodique.

La pulvérisation cathodique de cuivre (Cu) est effectuée sur les deux côtés du filtre ; avec le masque d'un côté et sans le masque de l'autre afin d'avoir aussi un dépôt sur les faces

latérales. Il est important de noter qu'afin d'améliorer l'adhérence du cuivre sur le COP, une couche de Chrome (Cr) de quelques nanomètres est déposée au préalable.

Après les premiers dépôts PVD, nous avons constaté qu'une partie du métal s'introduisait par diffusion sous les parois du masque ce qui causait une mauvaise définition des motifs d'accès du filtre après croissance. Pour éliminer l'excédent de métal nous avons dû le gratter ce qui a engendré le décollement de certaines lignes d'accès et une mauvaise adhérence du cuivre à ce niveau. Les accès étant un paramètre important quant au bon fonctionnement du filtre, nous avons décidé de développer une nouvelle voie de masquage. Le nouveau masque utilisé est intimement emboîté sur l'accès de la structure (cf. figure II.87). Les résultats de métallisation des accès avec les deux méthodes de masquage sont présentés sur la figure II.88.

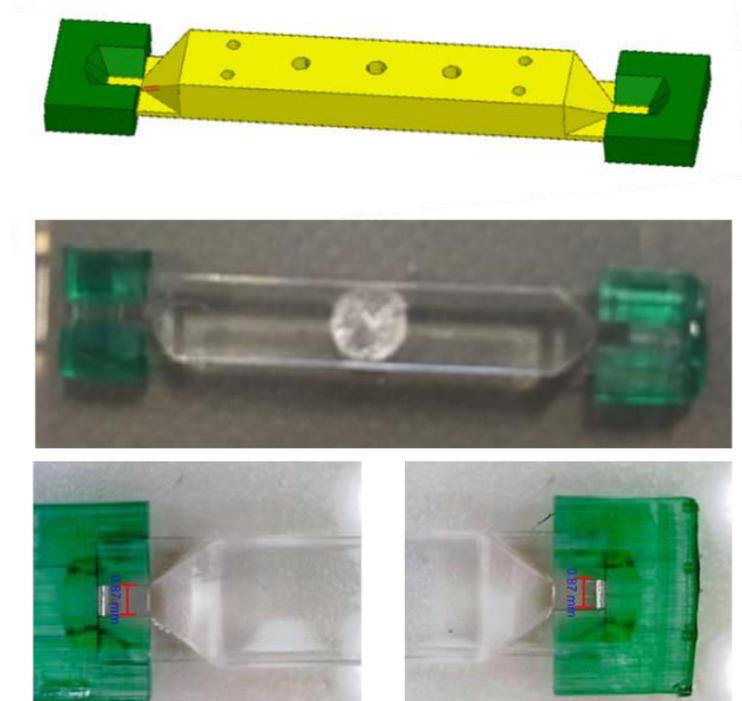


Figure II.87 : Deuxième méthode de masquage des accès.



Figure II.88 : Motifs des accès après croissance avec : (a) la 1^{ère} méthode de masquage
(b) la 2^{ème} méthode de masquage.

Une fois cette pré-métallisation effectuée (5nm Cr et 100nm Cu), le dispositif est mis en place pour la croissance auto-catalytique du cuivre (cf. figure II.89). Le bain auto-catalytique est une solution aqueuse comportant typiquement du cuivre sous forme ionique Cu^{2+} , un agent de réduction, une solution tampon pH, ainsi qu'un stabilisateur de solution et des agents complexes métalliques.

Le filtre est placé dans une cage (ou passoire) qu'on immerge dans le bain. Des mouvements assurés par un système à base d'un servomoteur permettent d'une part de renouveler la solution dans la cage et d'autre part de faire bouger le filtre afin qu'il soit en suspension dans la solution pour que la croissance se fasse sur toute les zones couvertes par le précurseur déposer par la PVD. La vitesse de rotation (relativement lente) ainsi que la température du bain (environ 48°C) sont optimisées pour avoir une croissance homogène. Après deux heures de croissance, l'épaisseur de métallisation est estimée à $6\ \mu\text{m}$.

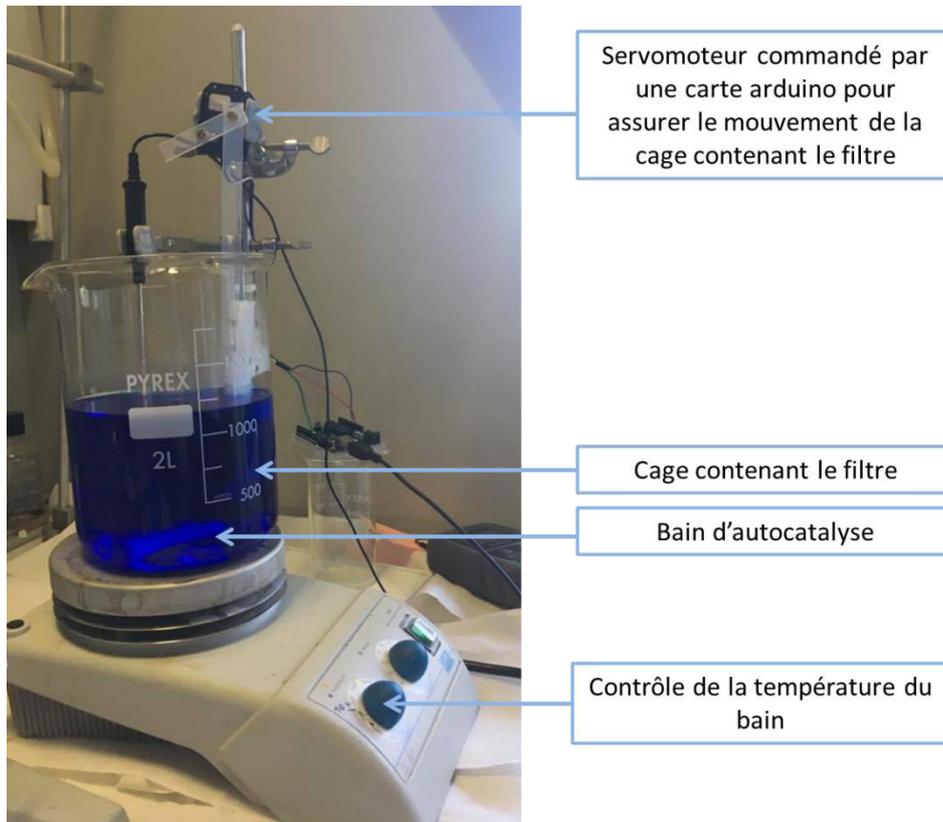
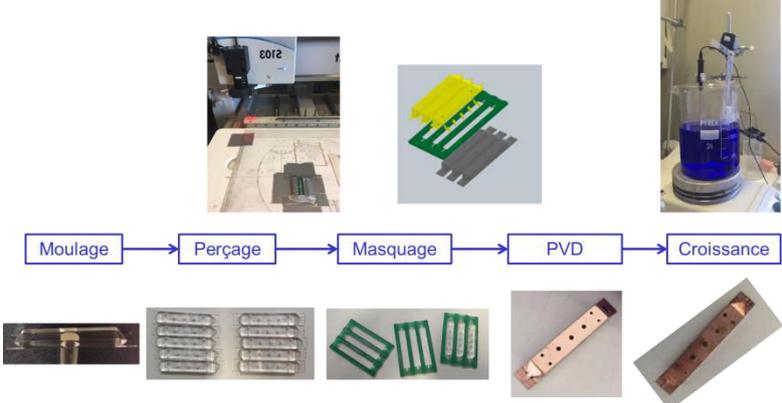
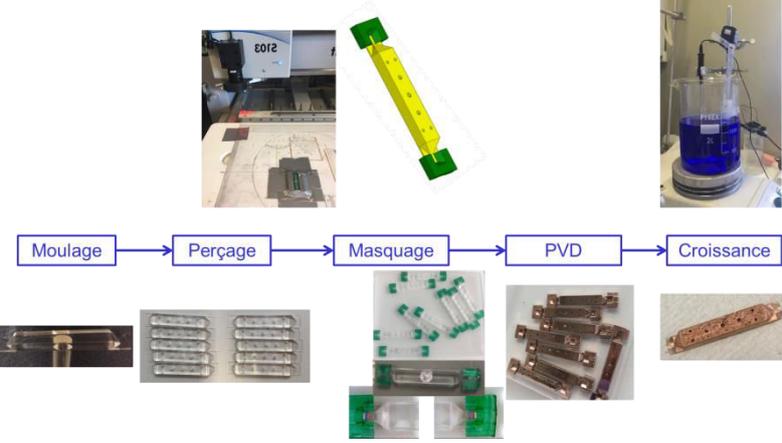
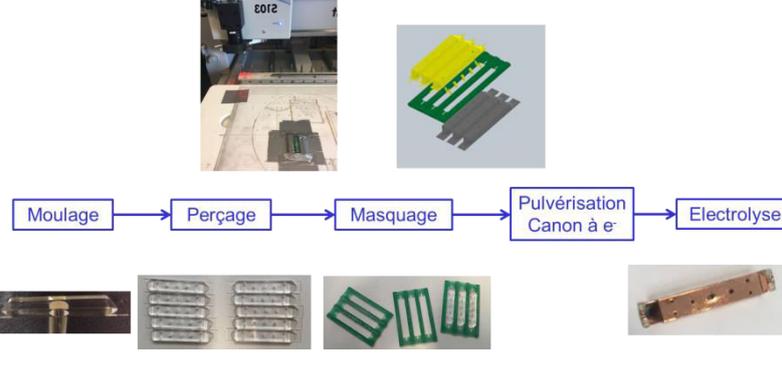


Figure II.89 : Dispositif de la croissance auto-catalytique développée au Lab-STICC.

Après les différents essais, nous relevons trois procédés de fabrication des filtres COP se distinguant par la méthode de masquage ou de métallisation utilisée ; les méthodes de moulage et de perçage étant identiques pour les trois. Ces procédés sont résumés dans le tableau II.8 avec pour chacun un exemple de filtre réalisé.

Tableau II.8: Procédés de fabrication des filtres COP.

 <p>Moulage → Perçage → Masquage → PVD → Croissance</p>	
<p>Bonne Adhérence après 2h de croissance X Dépôt de métal par diffusion sous le masque après PVD → Mauvaise définition des accès</p>	
 <p>Moulage → Perçage → Masquage → PVD → Croissance</p>	
<p>Meilleure définition des motifs d'accès X Problème d'adhérence sur la face supérieure du filtre (très probablement lié à un dépôt de chrome insuffisant, essais à confirmer)</p>	
 <p>Moulage → Perçage → Masquage → Pulvérisation Canon à e⁻ → Electrolyse</p>	
<p>Bonne Adhérence après 2h de croissance X Dépôt de métal par diffusion sous le masque après PVD → Mauvaise définition des accès</p>	

Les caractérisations hyperfréquences de ces structures donnent des résultats encourageants (cf. Chapitre III). Ces résultats restent néanmoins difficilement exploitables notamment afin d'extraire le facteur de qualité et de valider les résultats de simulation présentés dans le chapitre III. Ces différents procédés sont actuellement en cours d'optimisation afin d'obtenir de meilleurs résultats

II.8. Conclusion

Ce chapitre reprend les différents procédés technologiques utilisés pour la réalisation des différentes solutions de filtrage 3D proposées dans ces travaux de thèse et dont la conception est détaillée dans le chapitre suivant.

Les solutions en alumine développées par les sociétés TFP et μ UL présentent un aspect satisfaisant après optimisation des paramètres de l'ablation et du perçage. La caractérisation électromagnétique nous permettra de conclure quant à leurs performances.

Lors des premiers essais de réalisabilité sur les substrats en silice, la longueur d'onde de 355 nm du laser UV utilisé s'est avérée inadaptée causant des arrachements de matière non-maîtrisés lors de l'ablation. L'équipe de la plateforme Equipex LEAF de l'IEMN propose de faire les essais avec des lasers de longueur d'onde plus faible (environ 200 nm). Ces essais sont actuellement en cours.

Pour le perçage des structures COP, la voie laser est par ailleurs envisagée. Les premiers essais faits par l'équipe de la plateforme Equipex LEAF à Lille permettraient après optimisation d'avoir des perçages plus flexibles que le perçage mécanique ; l'objectif étant d'adresser plusieurs bandes passantes pour le filtre en partant d'une même pièce moulée (cf. chapitre III).

Pour les solutions COP, plusieurs voies de réalisation ont été explorées avec en commun le moulage et le perçage mécanique. Ces dernières étapes ont été validées et sont aujourd'hui reproductibles. Concernant la métallisation, principalement deux procédés ont été testés ; pulvérisation au canon à électrons suivie d'une croissance électrolytique de cuivre (IETR Rennes) et dépôt par pulvérisation cathodique suivie d'une croissance auto-catalytique du cuivre (Lab-STICC). Notons toutefois que d'autres procédés de dépôts ont été regardés (dépôt d'une couche d'encre de palladium suivi d'une autocatalyse du cuivre, ou bien une pulvérisation cathodique suivie d'une croissance électrolytique du cuivre) sans donner de

meilleurs résultats que les précédents. Une étape importante a été par ailleurs validée et concerne l'utilisation d'une couche intermédiaire entre le COP et le cuivre pour améliorer l'adhérence. Pour les essais effectués à l'IETR Rennes, deux couches Ti/Au (20/200nm) ont été déposées, ces dépôts semblent améliorer considérablement l'adhérence du cuivre sur le COP, il en va de même pour une couche de chrome intermédiaire pour les dépôts effectués au Lab-STICC. Pour finir, l'étape la plus délicate reste le masquage des zones qu'il ne faut pas métalliser. Pour cela, plusieurs types de masquage ont été imaginés, spécifiquement pour ces filtres, les premiers masques obtenus par impression 3D stéréolithographie n'ont pas permis d'obtenir des motifs bien définis au niveau des accès. Les derniers réalisés en deux parties présentés précédemment, semblent donner des résultats très encourageants en termes de métallisation et de bonnes définitions des accès. Il est important de noter, que la métallisation des trous est aussi validée. Ces différents procédés restent néanmoins en cours d'optimisation afin d'avoir de meilleures performances électriques pour les filtres.

Bibliographie du Chapitre II

- [1] X. P. Chen and K. Wu, "Substrate Integrated Waveguide Filters: Practical Aspects and Design Considerations," in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 15, no. 7, pp. 75-83, Nov.-Dec. 2014.
- [2] G. Fantozzi, J.-C. Niepce, et G. Bonnefont, « Les céramiques industrielles: Propriétés, mise en forme et applications », Dunod, 2013.
- [3] F.J.-M. HAUSSONNE, D.HOUIVET, et J.BERNARD, « Céramiques pour composants électroniques », *Techniques de L'ingénieur Matériaux Pour L'électronique et Dispositifs Associés, Base documentaire : TIB271DUO*.
- [4] J.-M. BUREAU, « Propriétés diélectriques des polymères ». *Techniques de L'ingénieur Matériaux Pour L'électronique et Dispositifs Associés, 2017, base documentaire : TIB271DUO*.
- [5] P.B. Shrivastva, C.A. Boose, B.H. Kolster, C. Harteveldand, and B. Meinders, « Selective metallization of alumina by laser ». *Surface and Coatings Technology* 46, 131–138, 1991.
- [6] D. Li, X. Chen, C. Guo, J. Tao, C. Tian, Y. Deng, and W. Zhang, « Micro Surface Texturing of Alumina Ceramic with Nanosecond Laser ». *Procedia Engineering* 174, 370–376. 2017.
- [7] R.N. Oosterbeek, T. Ward, S. Ashforth, O. Bodley, A.E. Rodda, and M.C. Simpson, « Fast femtosecond laser ablation for efficient cutting of sintered alumina substrates ». *Optics and Lasers in Engineering* 84, 105–110, 2016.
- [8] B.S. Yilbas, S.S. Akhtar, and C. Karatas, « Laser cutting of rectangular geometry into alumina tiles ». *Optics and Lasers in Engineering* 55, 35–43, 2014.
- [9] J. Lopez, « Le micro-usinage laser et ses applications ». *Photonique N°60, p46, Juillet – Août 2012*.
- [10] K.S. Boparai, and R. Singh, « Advances in Fused Deposition Modeling ». In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, (Elsevier), 2017.
- [11] N. Delhote, M. Chatras, D. Baillargeat and S. Verdeyme, "Ku band filter based on low loss alumina octagonal dielectric resonators made by 3D ceramic stereolithography," 2009 European Microwave Conference (EuMC), Rome, 2009, pp. 1397-1400.
- [12] A. H. Khalil et al., "3-D pyramidal and collective Ku band pass filters made in Alumina by ceramic stereolithography," 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Baltimore, MD, 2011, pp. 1-4.

- [13] J. Garreau et al., "Ultra-compact X-band SIW filter in LTCC technology using high permittivity substrate for a space application," 2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest, Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 1-3.
- [14] M. NEY, and C. KÄRNFELT, « Structures de guidage HF Technologie et applications ». *Techniques de L'ingénieur Électromagnétisme et Propagation*, base documentaire : TIB277DUO, 2016.
- [15] *Sputter deposition [en ligne]*, LNF Wiki, University of Michigan, [consulté le 12 Juillet 2017], http://lnf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/Sputter_deposition.
- [16] *Sequence of events during chemical vapour deposition (CVD) [en ligne]*, WIKIMEDIA COMMONS, [consulté le 12 Juillet 2017], https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sequence_during_CVD_%28en%29.svg#filehistory.

Chapitre III:

Conception et Mesures de Filtrés SIW en Bandes Q et V intégrables dans un environnement planaire

III.1. Introduction

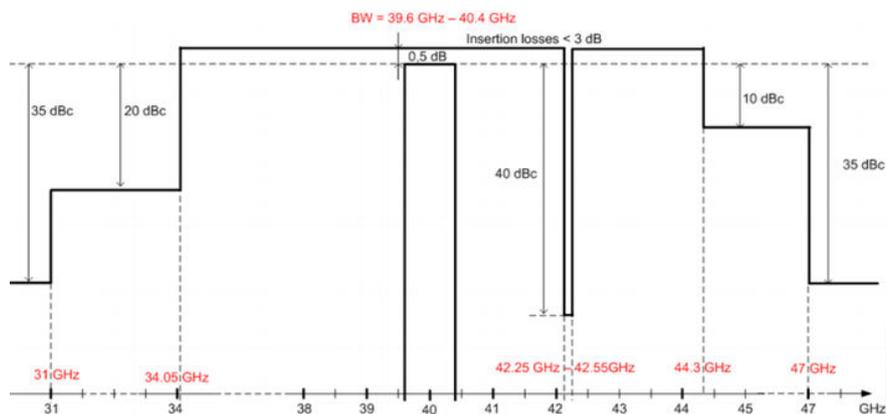
Ce chapitre reprend les étapes de conception des filtres alumine, silice fondue et polymère thermoplastique COP dont les étapes de réalisation sont détaillées dans le chapitre II. Une première partie redéfinie les spécifications de filtrage. Le second paragraphe détaille les calculs ayant servi à l'évaluation du facteur de qualité des différents filtres proposés. La synthèse du filtre ainsi que la conception d'une nouvelle transition 3D sont par la suite explicitées. Notons que pour le substrat silice la permittivité est égale à 3,2 pour tous les calculs détaillés dans ce chapitre. Il s'agit de la valeur communiquée par un premier fournisseur. En raison d'indisponibilité et afin de répondre aux délais imposés, nous avons dû changer de fournisseur à l'étape de réalisation.

III.2. Spécifications et expression du besoin

Les filtres à réaliser doivent répondre aux besoins de filtrage Tx des convertisseurs de fréquence Ka vers Q (mission type THD-sat) et Ka vers V (mission type constellation de satellites). Lors d'une tâche préliminaire, Thales Alenia Space et le CNES ont renseigné un cahier des charges spécifiant les gabarits de filtrage, les facteurs de forme des structures ainsi que les contraintes d'intégrabilité dans les circuits intégrés hybrides situés au niveau des charges utiles des satellites.

III.2.1 Gabarits de filtrage

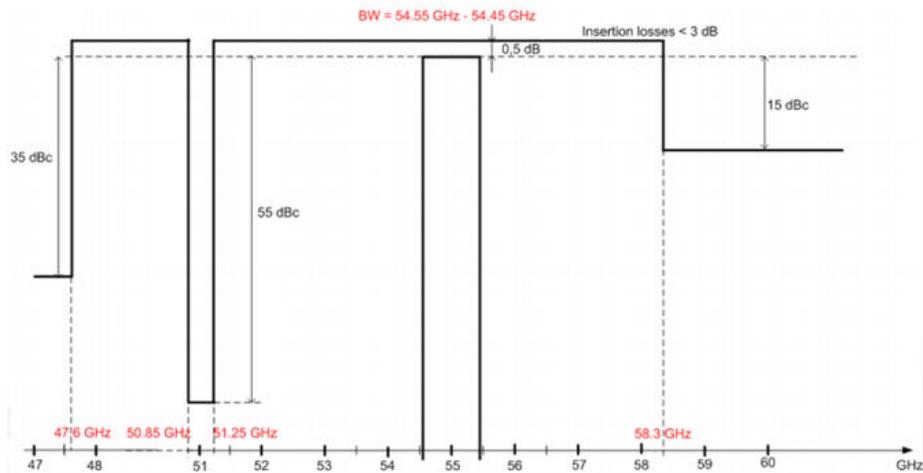
III.2.1.1 Filtre Tx en bande Q



Fréquence centrale	40 GHz
Bande passante	800 MHz
Ondulation	< 0,5 dB
Pertes d'insertions	< 3 dB
Adaptation	> 20 dB
Réjection critique 42,25GHz – 42,55GHz	< 40 dBc

Figure III.90 : Gabarit du filtre Tx en bande Q (Thales Alenia Space et le CNES).

III.2.1.2 Filtre Tx en bande V



Fréquence centrale	55 GHz
Bande passante	900 MHz
Ondulation	< 0,5 dB
Pertes d'insertions	< 3 dB
Adaptation	> 15 dB
Réjection critique 50,85 GHz – 51,25 GHz	< 25 dBc

Figure III.91: Gabarit du filtre Tx en bande V (Thales Alenia Space et le CNES).

III.2.1.3 Spécifications interfaces

Après réalisation, les filtres sont câblés par interconnexions filaires type « *bonding* » à deux circuits MIC d'épaisseur $254 \mu\text{m}$ ayant des accès microruban. Les mesures des filtres seront faites en tenant compte de deux $\frac{1}{2}$ -fils de « *bonding* » (plans de référence sur la figure III.92). Il faut par conséquent prévoir des motifs de compensation des fils au niveau des accès des filtres.

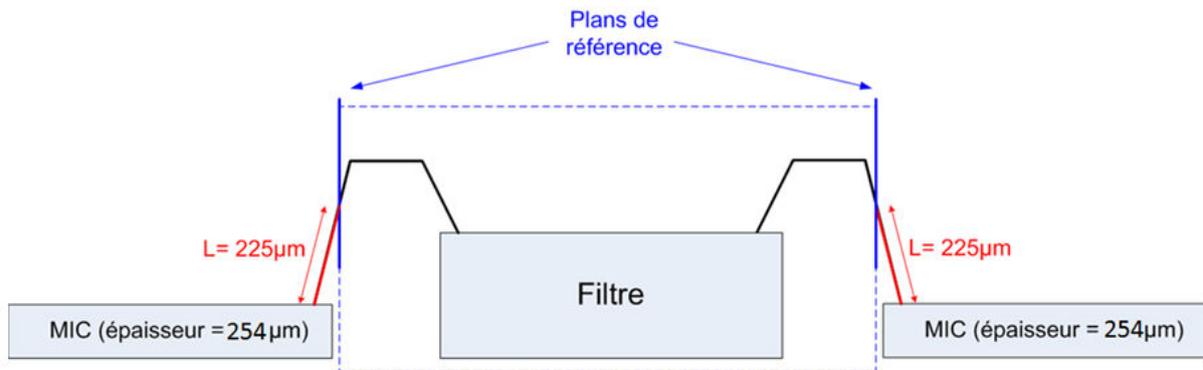


Figure III.92 : Schéma de principe des interconnexions par câblage filaire d'un filtre.

Les fils de « *bonding* » utilisés ont des diamètres de $25\ \mu\text{m}$. Ils sont soudés au niveau des lignes d'accès des filtres avec un espacement de $100\ \mu\text{m}$ entre eux (cf. figure III.93 (a)). La figure III.93 (b) présente la configuration de câblage filaire adoptée par Thales Alenia Space. A partir de cette configuration, il faut déterminer en fonction de l'épaisseur de substrat la longueur de fil à compenser côté filtre sachant qu'une longueur de $225\ \mu\text{m}$ est compensée côté MIC.

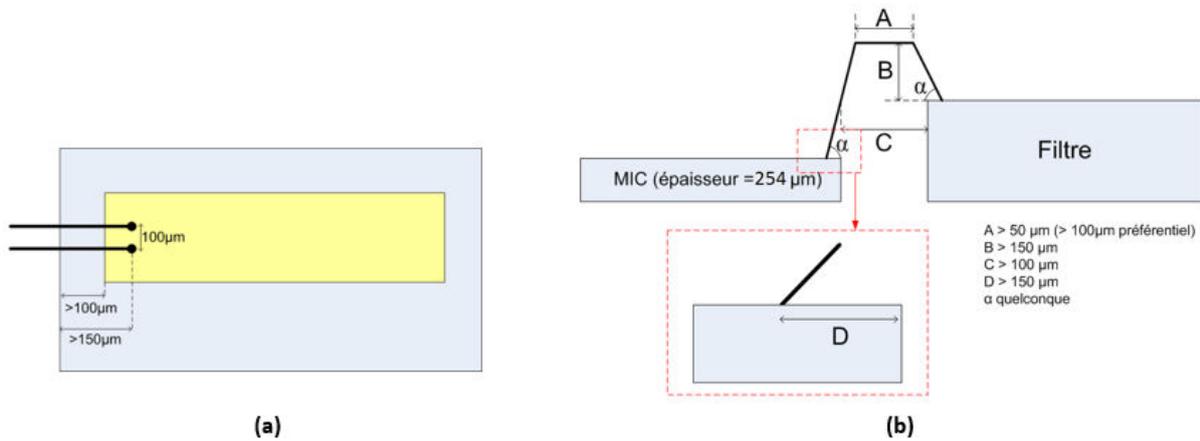


Figure III.93 : Câblage filaire de type "bonding" (Thales Alenia Space) :
 (a) Report des fils de "bonding" sur les accès du filtre
 (b) Configuration du câblage filaire

La figure III.94 présente deux photographies de câblages filaires type « *bonding* » en or utilisés à Thales Alenia Space : une pour deux structures de même épaisseur de substrat et une pour deux structures d'épaisseurs différentes.



Figure III.94 : Photographies des câblages filaires type "bonding" utilisés à Thales Alenia Space.

III.3.Cavités résonantes et facteur de qualité

Afin d'expliquer la synthèse des différentes solutions de filtrage proposées, nous allons nous intéresser aux filtres dédiés à la spécification en bande Q. La même démarche est suivie pour les filtres en bande V.

Avant d'attaquer la conception d'un filtre, il faut d'abord évaluer le facteur de qualité de ses résonateurs. Dans le cas du filtre SIW, il s'agit de cavités rectangulaires (cf. figure III.95) noyées dans le substrat. Les réponses de filtrage sont construites sur le mode fondamental de guide TE₁₀ afin d'éloigner au maximum les parasites dus à l'excitation des modes supérieurs. Au niveau de la cavité résonante, il s'agit d'évaluer le facteur de qualité de la résonance du mode TE₁₀₁ à la fréquence centrale du filtre f_0 (40 GHz dans le cas du filtre en bande Q) pour les substrats alumine ($\epsilon_r = 9,9$ et $\tan \delta = 10^{-4}$), silice fondue ($\epsilon_r = 3,2$ et $\tan \delta = 3 \cdot 10^{-4}$) et COP 480R ($\epsilon_r = 2,32$ et $\tan \delta = 3,2 \cdot 10^{-4}$).

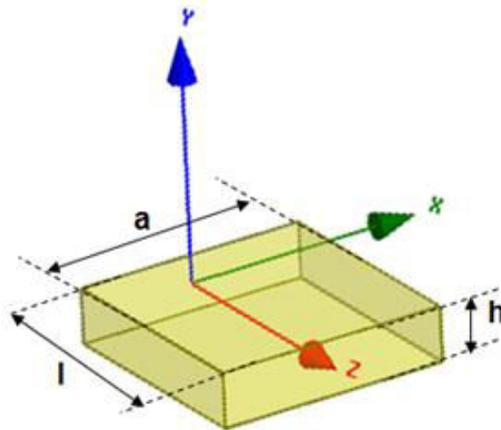


Figure III.95 : Cavité rectangulaire résonante.

Le facteur de qualité propre Q_0 d'un résonateur dépend d'une part de sa géométrie et d'autre part de la tangente de pertes dans le diélectrique. En effet :

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_c} + \tan \delta \quad \text{Eq III.1}$$

$$Q_c = \frac{\lambda}{\delta} F \quad \text{Eq III.2}$$

$$\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{Eq III.3}$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \sigma \mu f}} \quad \text{Eq III.4}$$

c : la célérité de la lumière dans le vide
 λ : la longueur d'onde dans le substrat
 f : la fréquence de résonance du mode excité
 δ : l'épaisseur de peau au niveau des parois métalliques
 ϵ_r : la permittivité du substrat
 $\sigma ; \mu$: la conductivité et la perméabilité du métal

F est le facteur de forme de la cavité. Il est défini en fonction de la largeur a , de la longueur l ainsi que de la hauteur h de la cavité (cf. Eq III.5).

$$F = \frac{\frac{ahl}{2} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{l^2} \right)^{\frac{3}{2}}}{\frac{l}{a^2} (a + 2h) + \frac{a}{l^2} (l + 2h)} \quad \text{Eq III.5}$$

Une cavité carrée présente la forme optimale pour le meilleur facteur de forme et par conséquent le meilleur facteur de qualité lié au conducteur Q_c (Eq III.2). Pour vérifier ce résultat, la figure III.96 trace l'évolution du facteur de forme d'une cavité rectangulaire quelconque en fonction du rapport de dimensions a/l pour différentes hauteurs de cavité. Pour un rapport a/l égal à 1, les différentes courbes présentent un maximum local. Il est aussi à noter que plus la hauteur de la cavité est importante, meilleur est le facteur de forme. Dans la suite de ce paragraphe, l'évaluation des différents facteurs de qualité pour les différents substrats est faite sur une cavité carrée.

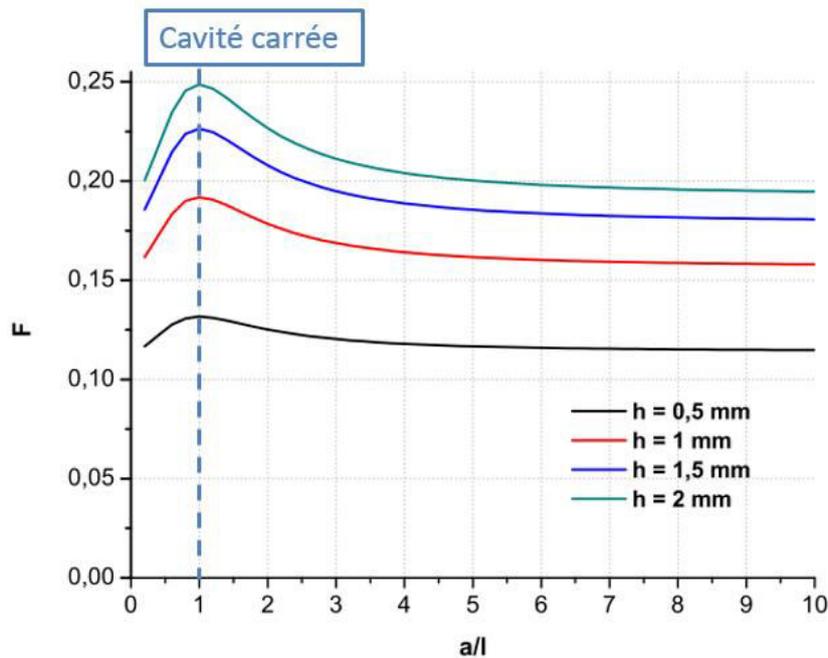


Figure III.96 : Facteur de forme d'une cavité rectangulaire quelconque en fonction du rapport largeur / longueur.

Pour le cas d'une cavité carrée ($a = l$), l'équation Eq III.5 devient :

$$F = \frac{h}{\sqrt{2}(a + 2h)} \quad \text{Eq III.6}$$

La valeur de a est déterminée pour chaque substrat de telle sorte à avoir une fréquence de résonance du mode fondamental TE_{101} égale à la fréquence centrale du filtre. La figure III.97 présente les cavités simulées avec l'outil Eigenmode d'HFSSTM et dimensionnées pour avoir une fréquence de résonance du mode fondamental TE_{101} égale à 40 GHz.

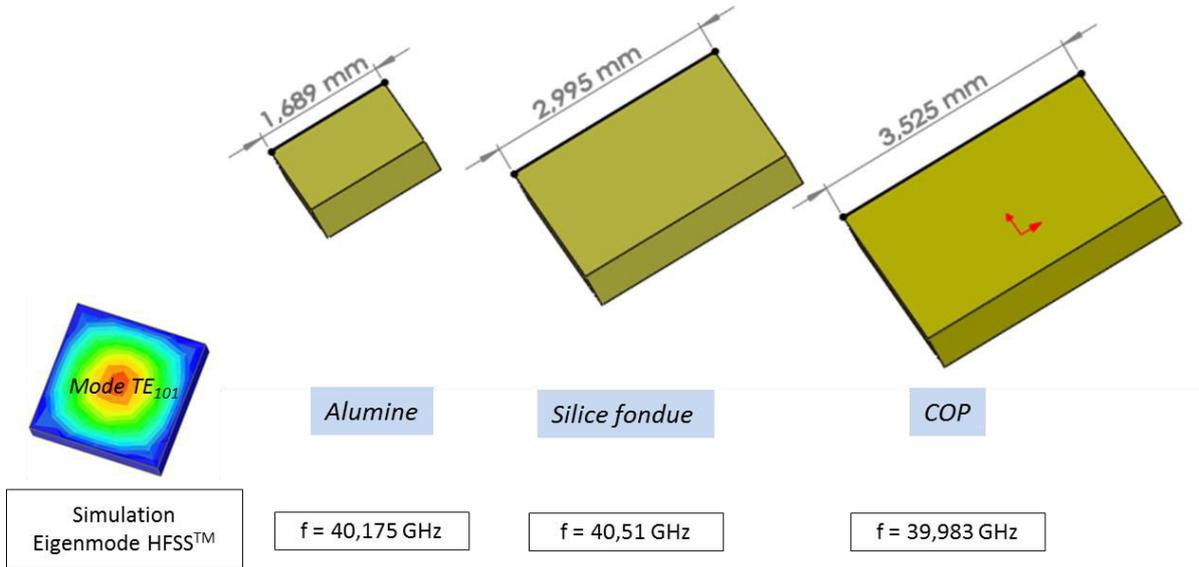


Figure III.97 : Cavités Alumine, Silice fondue et COP simulés avec l'outil Eigenmode HFSSTM.

Pour rappel, la fréquence de résonance d'un mode TE_{nmp} est défini par :

$$f_{m,n,p} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{L}\right)^2} \quad \text{Eq III.7}$$

Pour le mode TE_{101} dans le cas d'une cavité carrée ($a = l$), elle est égale à :

$$f_{1,0,1} = \frac{c}{a\sqrt{2\epsilon_r\mu_r}} \quad \text{Eq III.8}$$

ϵ_r, μ_r : permittivité et perméabilité du substrat

Le tableau III.9 contient les fréquences de résonance des premiers modes supérieurs résonants aux seins des cavités simulées avec l'outil Eigenmode d'HFSSTM pour une épaisseur de substrat égale à 500 μm . Le cadre rouge délimite un même mode deux fois calculé par l'outil de simulation.

A partir d'une certaine épaisseur de substrat, le mode supérieur TE_{011} apparaît à une fréquence très proche de la fréquence de résonance du mode TE_{101} affectant son facteur de qualité (cf. Tableau III.10)

Tableau III.9: Résonance des premiers modes supérieurs au sein des cavités carrées en alumine, silice fondue et COP 480R

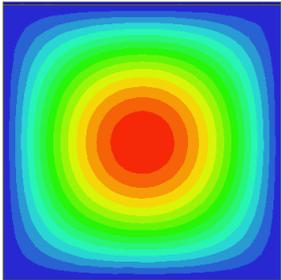
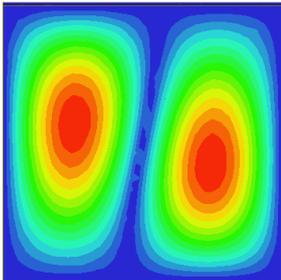
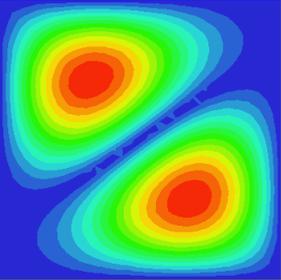
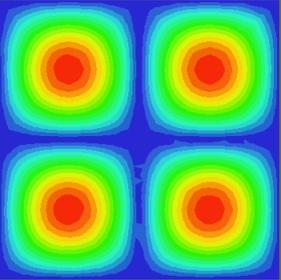
Mode fondamental à 40 GHz	1 ^{er} modes supérieurs		
TE_{101}	TE_{102}	TE_{201}	TE_{202}
			
Alumine	63,39 GHz	63,76 GHz	82,97 GHz
Silice fondue	63,53 GHz	64,09 GHz	85,05 GHz
COP 480R	63,23 GHz	63,90 GHz	85,31 GHz

Tableau III.10 : Résonance du mode supérieur TE_{011} au sein des cavités alumine, silice fondue et COP 480R

	Mode TE_{011}		
	Alumine	Silice Fondue	COP 480R
Épaisseur de substrat	1,7 mm	3 mm	3,4 mm
Fréquence de résonance	39,82 GHz	39,69 GHz	39,52 GHz

Les figures III.98, III.99 et III.100 tracent les évolutions des facteurs de formes F (Eq III.6), des facteurs de qualité liés au conducteur Q_c (Eq III.2), ainsi que les facteurs de qualités à vide Q_0 (Eq III.1), des cavités carrées sur substrats d'alumine, de silice fondue et de COP en fonction de l'épaisseur de substrat. Pour les couches métalliques, on considère l'or avec une épaisseur de 5 μm . Les courbes obtenues par le calcul théorique sont présentées en trait plein. Celles obtenues grâce à l'outil Eigenmode d'HFSSTM sont en pointillés.

Ces courbes permettent de vérifier que l'épaisseur de substrat est un paramètre déterminant quant aux performances du filtre. En effet, pour accroître le facteur de qualité propre de ses cavités, il suffit d'augmenter son épaisseur.

Ces courbes permettent aussi de constater que la cavité alumine, bien qu'ayant les meilleurs facteurs de forme, présente les facteurs de qualité les plus faibles et inversement la cavité COP présente les facteurs de qualités les plus élevés pour des facteurs de forme moins bons. À la fréquence de résonance considérée pour cette étude, les tailles des cavités ainsi que les longueurs d'onde deviennent prédominants, ce qui explique l'inversion de la tendance. Ces résultats rejoignent les résultats présentés dans l'état de l'art du chapitre I.

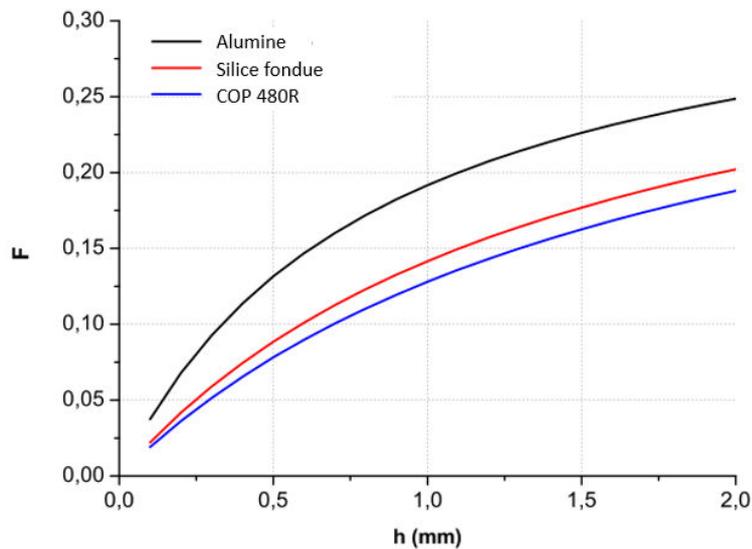


Figure III.98 : Facteurs de forme des cavités en alumine, silice fondue et COP en fonction de la hauteur de substrat.

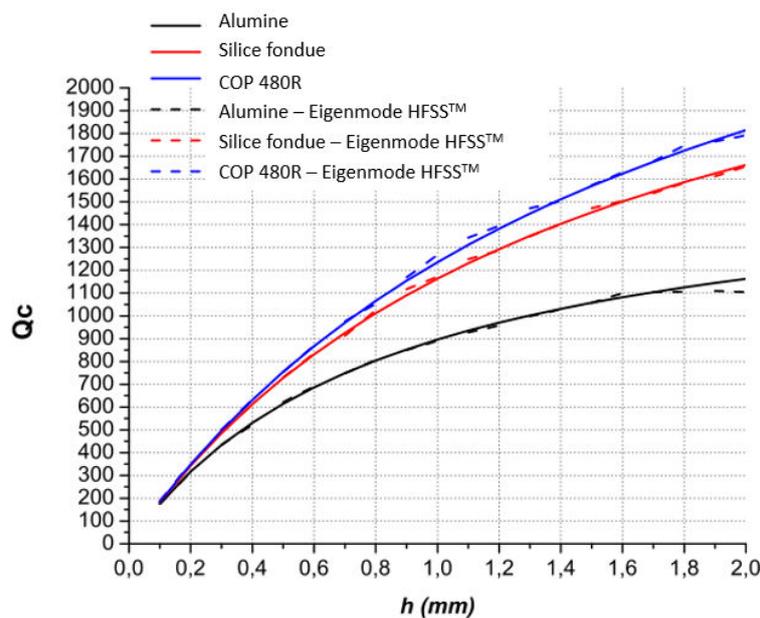


Figure III.99 : Facteurs de qualité liés au conducteur des cavités en alumine, silice fondue et COP en fonction de la hauteur de substrat.

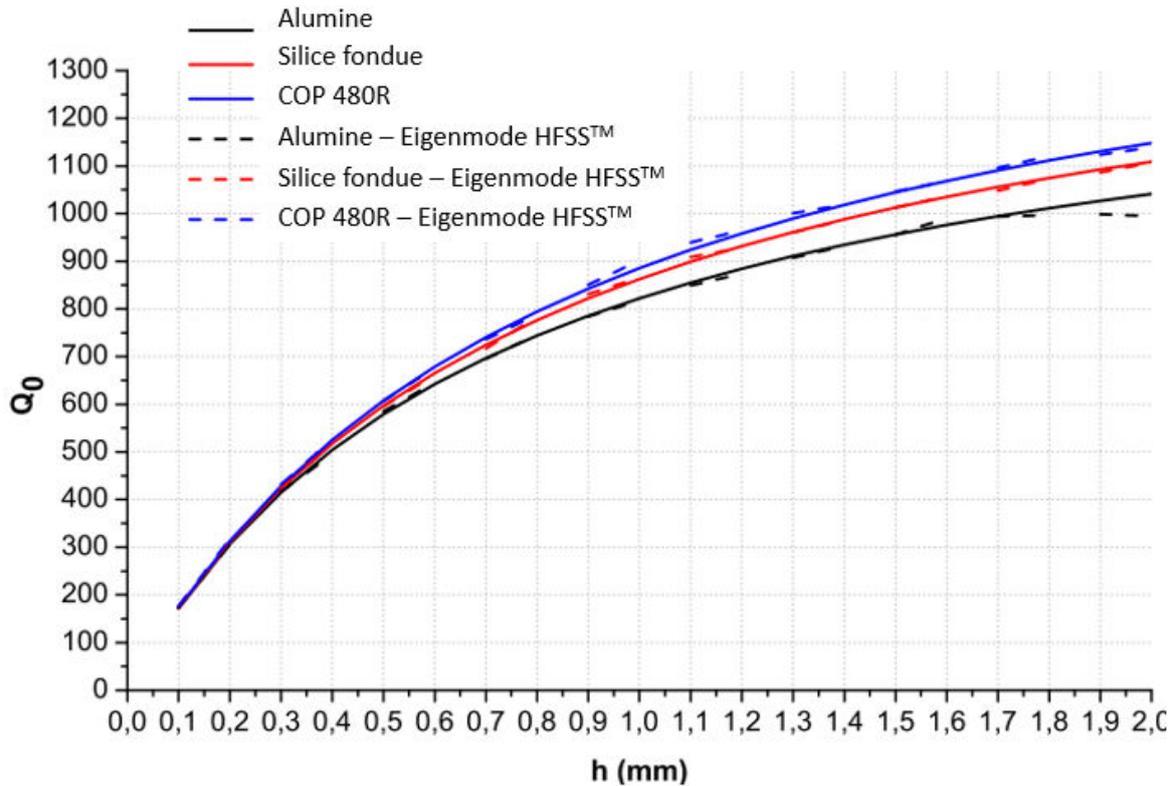


Figure III.100 : Facteurs de qualité à vide des cavités en alumine, silice fondue et COP en fonction de la hauteur de substrat.

Dans le cas de l'alumine et de la silice fondue, le procédé de mise en forme du substrat (l'ablation laser) limite l'épaisseur à $500 \mu\text{m}$ pour la silice fondue et à $635 \mu\text{m}$ pour l'alumine. Pour ces valeurs d'épaisseur de substrat, le facteur de qualité est de l'ordre de 600. La solution plastique réalisée par moulage polymère permet l'affranchissement de cette contrainte. Pour cette structure, une épaisseur de 2 mm avec un facteur de qualité deux fois plus important est ciblée.

III.4. Synthèse du filtre

III.4.1 Réponse idéale du filtre

Dans une démarche de synthèse de filtre, la première étape consiste à déterminer les éléments électriques de la réponse idéale à partir des spécifications. Il s'agit de choisir une fonction de filtrage (Tchebychev, Butterworth, ...), de fixer l'ordre du filtre puis de définir les matrices de couplages à partir des coefficients du filtre prototype passe-bas. Les réponses des filtres développés dans cette thèse sont construites à partir des coefficients du filtre passe-bas de Tchebychev de pulsation $\Omega_c = 1 \text{ rad.s}^{-1}$ et ayant une ondulation maximale dans la bande égale à $0,01 \text{ dB}$ (cf. tableau III.11). Le filtre de Tchebychev est choisi afin d'assurer un bon compromis entre ondulation dans la bande et réjections hors-bande.

Tableau III.11 : Coefficients du filtre prototype passe bas de Tchebychev d'ordre 4 pour une ondulation dans la bande égale à 0.01 dB

g_0	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	0,7128	1,2003	1,342	0,6476	1,1007

L'ordre minimal du filtre est calculé à partir des réjections hors-bandes souhaitées. Plus l'ordre du filtre est important plus les réjections sont bonnes. A l'inverse, les performances en termes de platitude et de pertes d'insertion se dégradent. L'équation Eq III.9 permet de calculer l'ordre minimal du filtre de Tchebychev pour avoir une bonne réjection hors-bande et une moindre dégradation des performances dans la bande. Pour les spécifications initiales du projet, un ordre 4 est jugé suffisant.

$$n = \frac{\cosh^{-1} \sqrt{\frac{\frac{A_s}{10^{10} - 1}}{\frac{A_m}{10^{10} - 1}}}}{\cosh^{-1}(\Omega_s)} \quad \text{Eq III.9}$$

A_s : Valeur de la réjection souhaitée

A_m : Ondulation dans la bande passante

Ω_s : Rapport de la bande de réjection par la bande passante du filtre

La figure III.101 présente le schéma électrique équivalent d'un filtre idéal. Il s'agit de 4 résonateurs LC série identiques reliés par des matrices de couplages dont les coefficients sont les inverseurs d'impédance calculés à partir des équations Eq III.10, Eq III.11 et Eq III.12 [1].

$$K_{01} = \sqrt{\frac{Z_0 FBW \omega_0 L}{\Omega_c g_0 g_1}} \quad \text{Eq III.10}$$

$$K_{jj+1} = \frac{FBW \omega_0}{\Omega_c} \sqrt{\frac{L^2}{g_j g_{j+1}}} \quad 1 \leq j \leq n \quad \text{Eq III.11}$$

$$K_{nn+1} = \sqrt{\frac{FBW \omega_0 L Z_0}{g_n g_{n+1}}} \quad \text{Eq III.12}$$

$$FBW = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} \quad \text{Eq III.13}$$

Les résonateurs LC série modélisent les cavités SIW. Les valeurs de L et C peuvent être choisies arbitrairement. Ici L est égale C, ce qui permet d'avoir une pente de la réactance $X(\omega)$ du résonateur égale à 1 au point $\omega = \omega_0$.

$$x = \frac{\omega_0}{2} \frac{dX(\omega)}{d\omega} \Big|_{\omega=\omega_0} \quad \text{Eq III.14}$$

$$L = C = \frac{x}{\omega_0} = \frac{1}{\omega_0 x} \quad \text{Eq III.15}$$

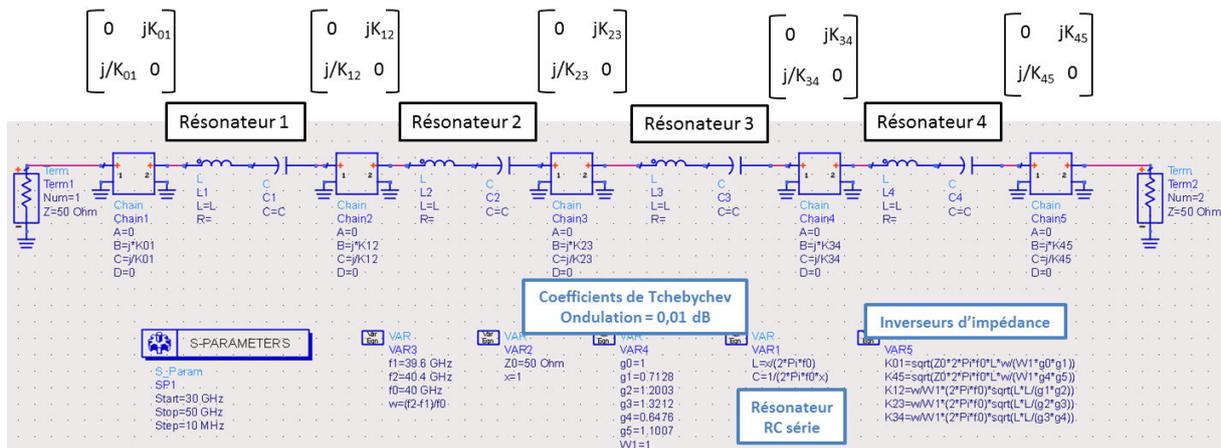


Figure III.101 : Schéma électrique équivalent du filtre : Topologie en inverseurs d'impédance et en résonateurs LC série.

La figure III.102 présente la réponse idéale du filtre superposée au gabarit de la spécification de filtrage en bande Q obtenue en simulant le circuit de la figure III.101 à l'aide du logiciel ADS d'Agilent.

Grâce à ce schéma équivalent, il est aussi possible, à cette étape de la synthèse de prédire le niveau des pertes par insertions pour les filtres en alumine, silice fondue et thermoplastique COP. Pour cela il suffit de remplacer les résonateurs LC par des résonateurs RLC, la valeur de R correspondant à la valeur du facteur de qualité du résonateur. La figure III.103 présente les réponses du filtre obtenues pour différents facteurs de qualité. Pour un facteur de qualité égal à 600, valeur simulée pour cavités en alumine et en silice fondue, les

perles par insertion sont estimées à 1,5 dB. Pour un facteur de qualité de 1000, elles sont estimées à 0,9 dB.

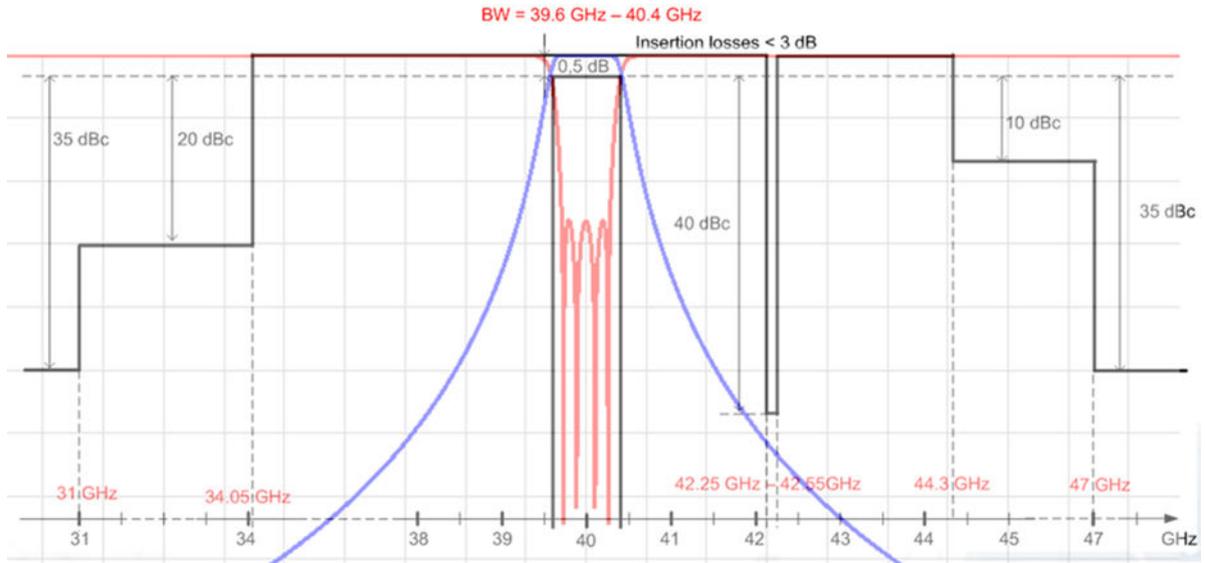


Figure III.102 : Réponse idéale du filtre en bande Q

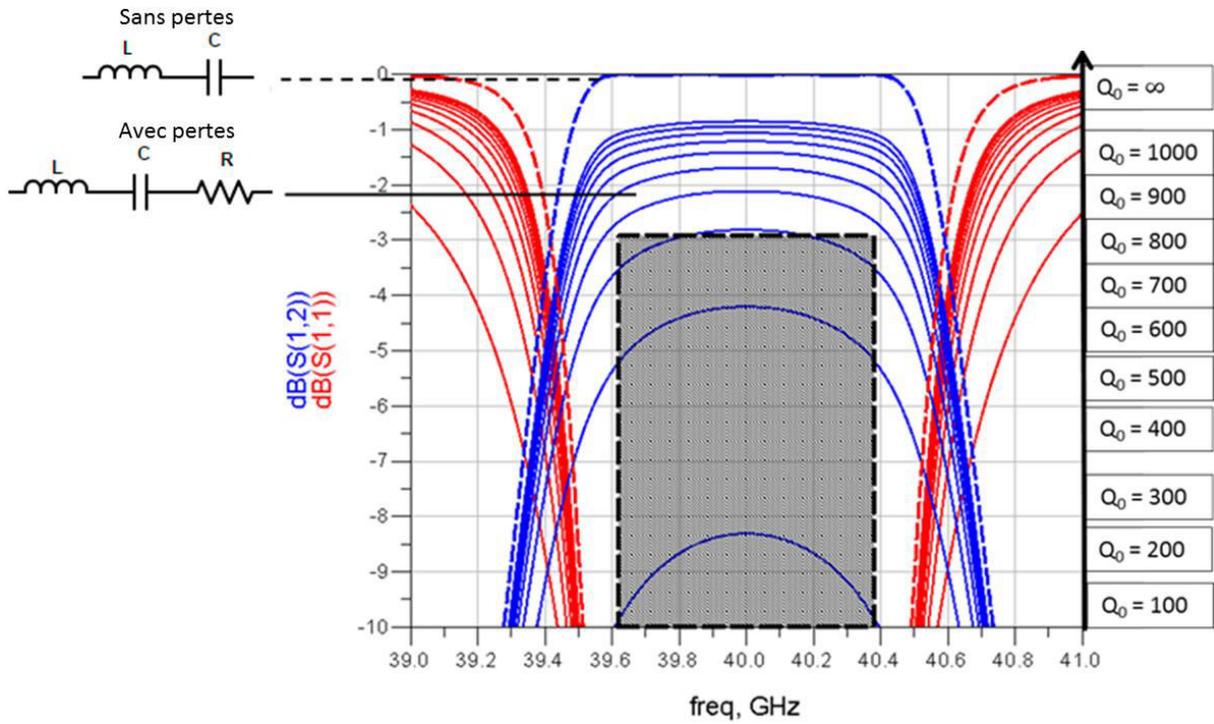


Figure III.103 : Estimation des pertes par insertion du filtre en Bande Q pour différentes valeurs de facteur de qualité.

III.4.2 Filtre à plots inductifs

Les solutions de filtrage proposées dans cette thèse sont basées sur une topologie de filtre à plots inductifs dont la conception est faite à partir de la synthèse de Matthaei [1] et du modèle de discontinuité d'un trou métallique introduit dans un guide d'onde développé par Marcuvitz [2]. Il s'agit d'un guide d'onde au sein duquel des trous métallisés délimitent les cavités résonantes introduisant des couplages électriques entre elles (cf. figure III.104). Les étapes de synthèse détaillées dans cette partie ne sont valables que pour une réponse de filtrage construite sur le mode fondamental TE_{10} du guide.

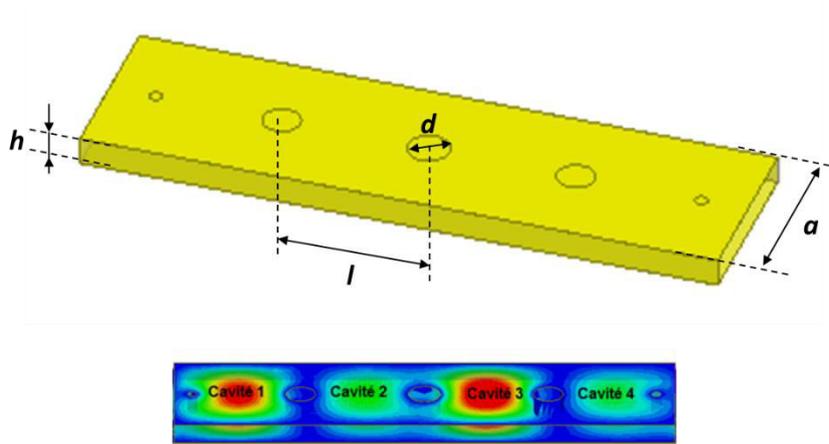


Figure III.104 : Topologie du filtre à plots inductifs.

Les différentes dimensions du filtre ainsi définies doivent être choisies de telle sorte à construire une réponse de filtrage répondant aux gabarits de l'étape de spécification. Comme constaté précédemment, l'épaisseur h du filtre impacte considérablement les performances de ses résonateurs. Elle doit être la plus élevée possible, les limites étant le procédé de mise en forme du substrat (cas de l'alumine et de la silice fondue), l'apparition des modes supérieurs ou encore l'encombrement totale de la structure (cas des filtres COP). La largeur du filtre dépend de :

- La fréquence de coupure du mode fondamental TE_{10} (Eq III.16).
- La fréquence de coupure du 1^{er} mode supérieur TE_{20} (Eq III.17).
- La valeur du coefficient d'atténuation α (Eq III.18).
 - o Fréquences de coupure des modes TE_{10} et TE_{20} .

La figure III.105 présente les graphes d'évolution des fréquences de coupure du mode fondamental TE_{10} et du premier mode supérieur TE_{20} en fonction des largeurs a des guides

d'onde en alumine, silice fondue et COP. Les zones grisées correspondent aux valeurs interdites de largeur de guide. L'intervalle de choix possibles est fixé de façon à avoir un bon établissement du mode TE_{10} dans la bande passante du filtre et la non-excitation du mode TE_{20} dans cette même bande. Les largeurs de guide choisies pour chaque filtre permettent de localiser la fréquence de coupure du mode TE_{10} suffisamment basse par rapport à sa fréquence centrale et d'éloigner l'excitation des modes supérieurs de façon à ne pas générer de remontées parasites dans la bande jusqu'à 50 GHz. Ces largeurs et les fréquences de coupures associées sont marquées sur les graphes correspondants. Les différents résultats sont vérifiés par les diagrammes de dispersion des guides simulés sous HFSS™.

$$f_{c_{TE10}} = \frac{c}{2a\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{Eq III.16}$$

$$f_{c_{TE20}} = \frac{c}{a\sqrt{\epsilon_r}} = 2f_{c_{TE10}} \quad \text{Eq III.17}$$

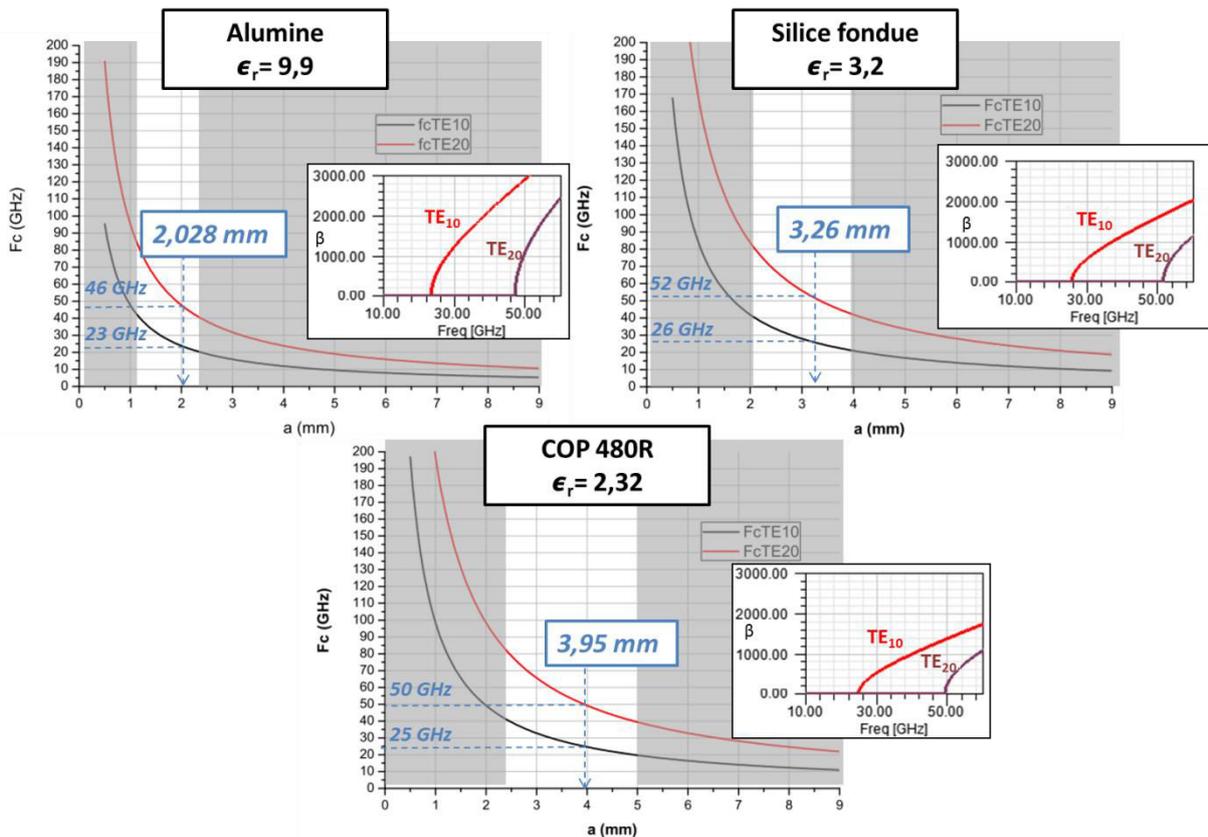


Figure III.105 : Fréquences de coupure du mode fondamental TE_{10} et du 1^{er} mode supérieur TE_{20} en fonction de la largeur des guides en alumine, en silice fondue et en thermoplastique COP.

○ Coefficient d'atténuation α dans le guide:

L'atténuation dans un guide d'onde s'écrit sous la forme :

$$\alpha = \alpha_d + \alpha_c \quad \text{Eq III.18}$$

α_d correspond à l'atténuation due au diélectrique. Elle ne dépend que des caractéristiques du substrat et ne dépend pas de la géométrie du guide.

α_c correspond à l'atténuation due aux pertes ohmiques dans les parois du conducteur. Elle dépend de la largeur et de la hauteur du guide. Dans le cas d'un guide en or rempli d'air le coefficient d'atténuation s'exprime par :

$$\alpha_c = \frac{1,75 \cdot 10^{-3} \left(\frac{f_c}{f}\right)^{\frac{3}{2}} + \frac{a}{2h} \left(\frac{f}{f_c}\right)^{\frac{1}{2}}}{a^{\frac{3}{2}} \left(1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{Eq III.19}$$

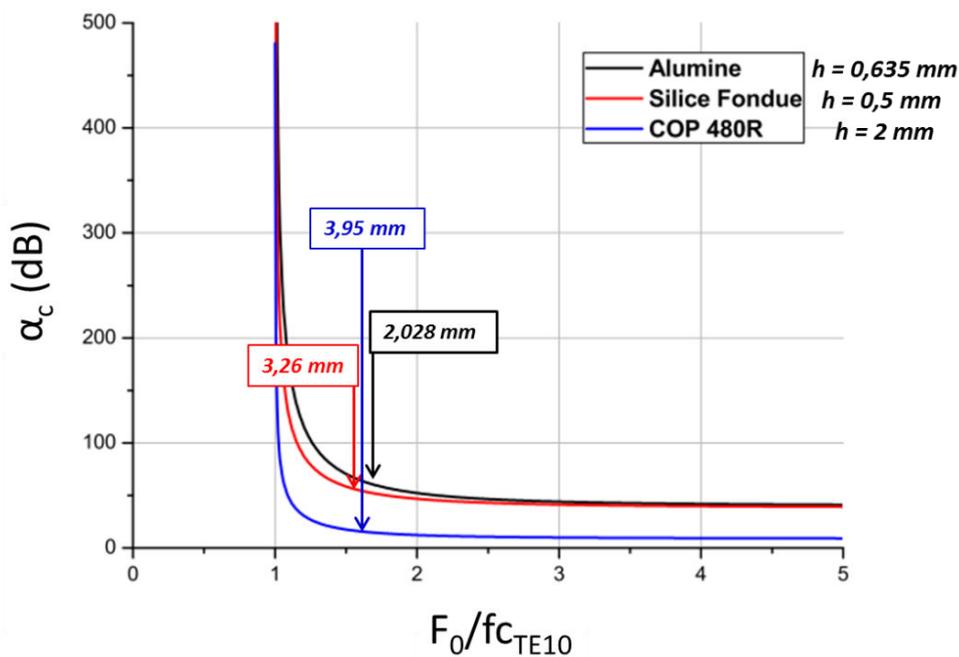


Figure III.106: Evolution du coefficient d'atténuation α_c dans les guides en alumine, silice fondue et COP en fonction du rapport $f_0/f_{c_{TE10}}$.

Le graphe de la figure III.106 trace l'évolution du coefficient d'atténuation α_c pour des guides en alumine ($h = 0,635$ mm), silice fondue ($h = 0,5$ mm) et COP ($h = 2$ mm). Les valeurs de largeur de guide choisies correspondent à des rapports $\frac{f_0}{f_{c_{TE10}}}$ pour lesquelles l'atténuation est proche de son minimum, le minimum étant à éviter pour échapper aux variations rapides

accompagnant les tolérances de fabrication. La zone pour laquelle les rapports $\frac{f_0}{fc_{TE10}}$ sont importants (partie constante du graphe) est également à éviter. Les modes évanescents sont susceptibles de s'exciter pour les largeurs de guide comprises dans cette zone générant ainsi des parasites dans la réponse du filtre.

Une fois la hauteur et la largeur du filtre choisies, il reste à déterminer les positions et les diamètres des trous métallisés assurant le couplage inter-résonateurs. Cette étape débute par la détermination des inverseurs d'admittance définis dans la synthèse de Matthaei [1]. Des équations de passage (cf. Eq III.20 et Eq III.21) permettent le passage de la représentation matricielle du couplage à une représentation en « Té » de Marcuvitz du modèle de discontinuité d'un plot métallique introduit dans le substrat [2]. D'un point de vue pratique, un code MATLAB[®] permet de balayer différentes valeurs de réactance X_a et de susceptance X_b et d'en déduire celles permettant d'avoir les bonnes valeurs des coefficients K_{ij} .

$$K = Z_0 \left| \tan\left(\frac{\varphi}{2} + \tan^{-1}\left(\frac{X_b}{Z_0}\right)\right) \right| \quad \text{Eq III.20}$$

$$\varphi = -\tan^{-1}\left(\frac{2X_a}{Z_0} + \frac{X_b}{Z_0}\right) - \tan^{-1}\frac{X_b}{Z_0} \quad \text{Eq III.21}$$

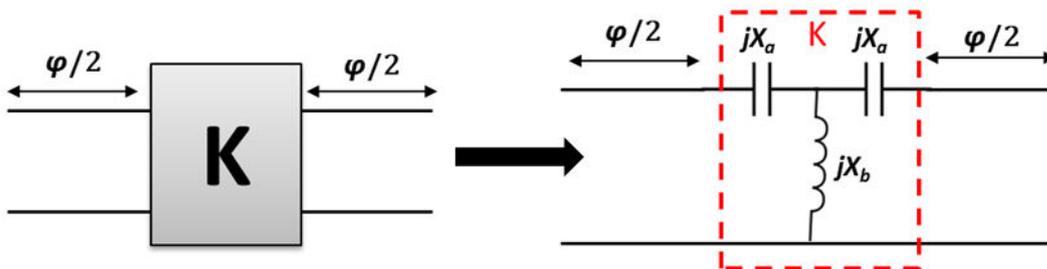


Figure 107 : Modèle de discontinuité d'un trou métallique noyé dans le substrat [2].

Connaissant les valeurs de X_a et X_b , les diamètres des trous métallisés correspondants sont obtenus grâce à l'abaque de Marcuvitz reproduit sur MATLAB[®] (cf. figure III.108).

La figure III.109 présente les vues 3D des filtres à plots inductifs avec les substrats alumine, silice fondue et COP dédiés à la mission THD-sat en Bande Q. Les résultats de simulation de ces structures avec le logiciel HFSSTM sont représentés sur la figure III.110.

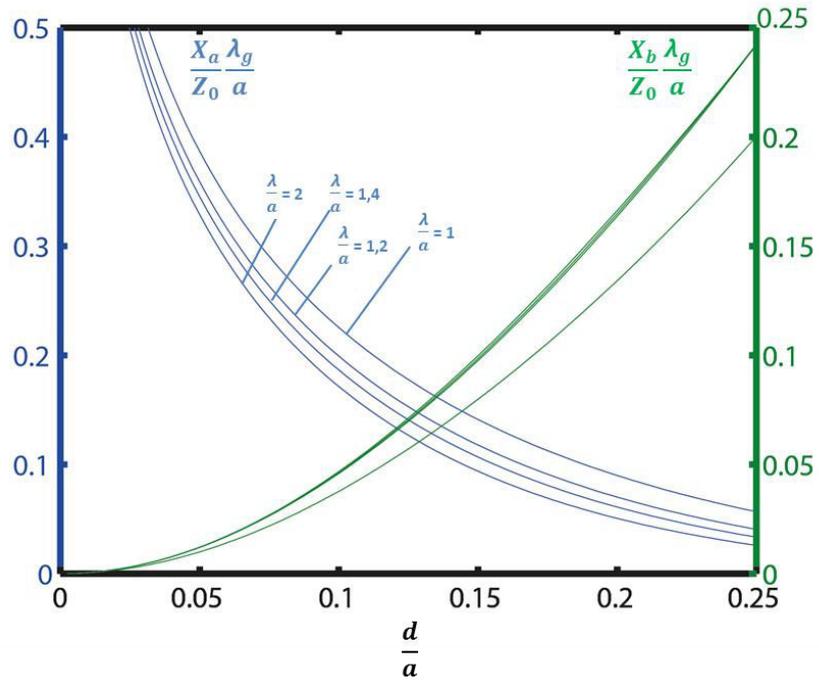


Figure III.108 : Abaque de Marcuvitz [2].

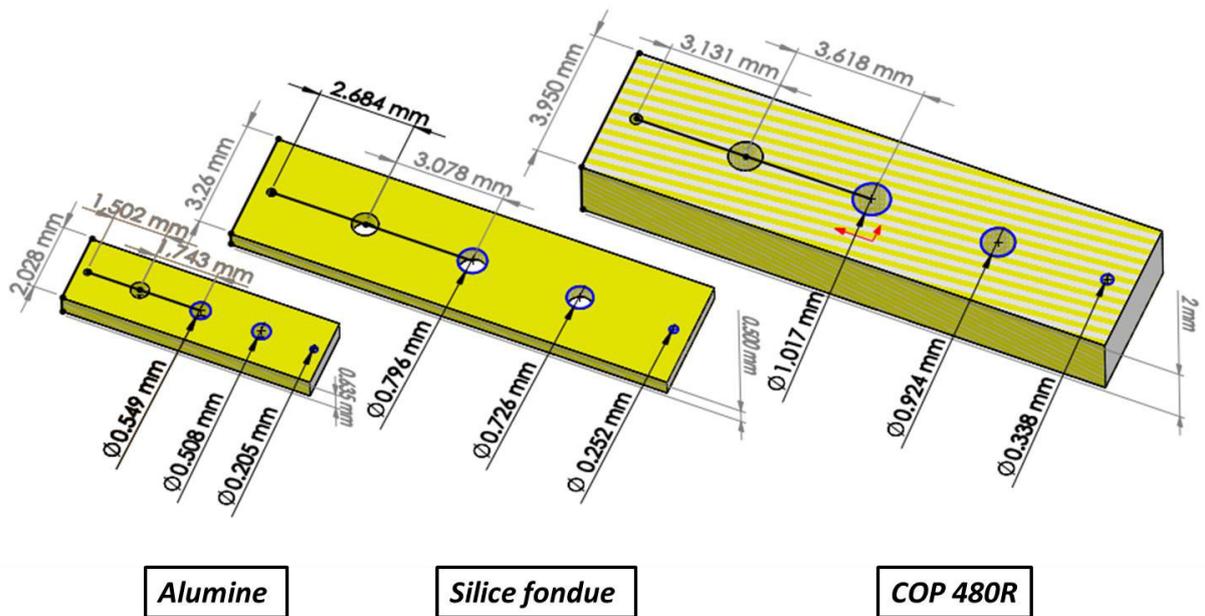


Figure III.109 : Vues 3D des filtres à plots inductifs en bande Q dédiés à la mission THD.

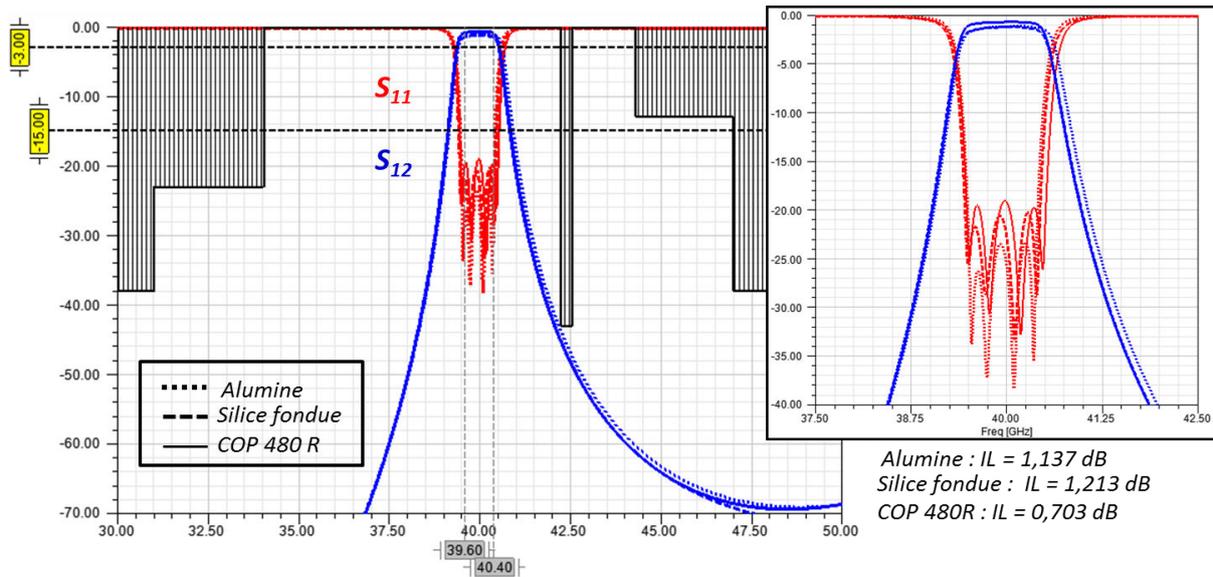


Figure III.110 : Réponses des filtres à plots inductifs en bande Q simulés avec le logiciel HFSSTM.

III.5. Intégrabilité des filtres SIW dans un environnement planaire

Les filtres à concevoir seront intégrés dans des circuits hybrides majoritairement planaires plus particulièrement entre deux circuits MIC d'épaisseur $254 \mu\text{m}$. Afin de rester compatible avec l'environnement microruban, la transition conventionnelle à base de « taper » [3] présentée dans le chapitre I répond à ce besoin d'intégration pour de faibles épaisseurs de substrats. L'augmentation de l'épaisseur de substrat étant requise pour améliorer le facteur de qualité des résonateurs des filtres, la transition ne doit pas présenter de limitation de ce point de vue d'où la nécessité d'imaginer une nouvelle transition plus appropriée à cet usage.

III.5.1 Transition microruban à base de « taper »

Dans ce paragraphe, les dimensions des transitions microruban ainsi que des lignes d'accès pour les différents filtres sont détaillées. La longueur L_t du « taper » est fixée à $\lambda/4$ afin de minimiser les pertes par réflexion. Sa largeur Wt est obtenue par la résolution de l'égalité de l'équation Eq I.7 reproduite sur le logiciel MATLAB[®]. La figure III.111 présente l'exemple de calcul de la valeur optimale Wt de la transition conventionnelle dans le cas du filtre alumine d'épaisseur $635 \mu\text{m}$. Cette valeur correspond à l'abscisse du point d'intersection des courbes représentant les deux fonctions de l'égalité de l'équation Eq I.7. Le même calcul est réédité pour les cas des substrats en silice fondue d'épaisseur $500 \mu\text{m}$ (cf. figure III.112 (a)) et COP d'épaisseur 2 mm (cf. figure III.112 (b)). Pour la structure COP, l'équation Eq I.7 n'a pas de solution dans l'intervalle $[0, \text{largeur du guide}]$ d'où l'impossibilité d'implémenter

la transition microruban conventionnelle pour ce cas. Seuls les filtres en alumine et en silice fondue seront réalisés avec ce type de transition.

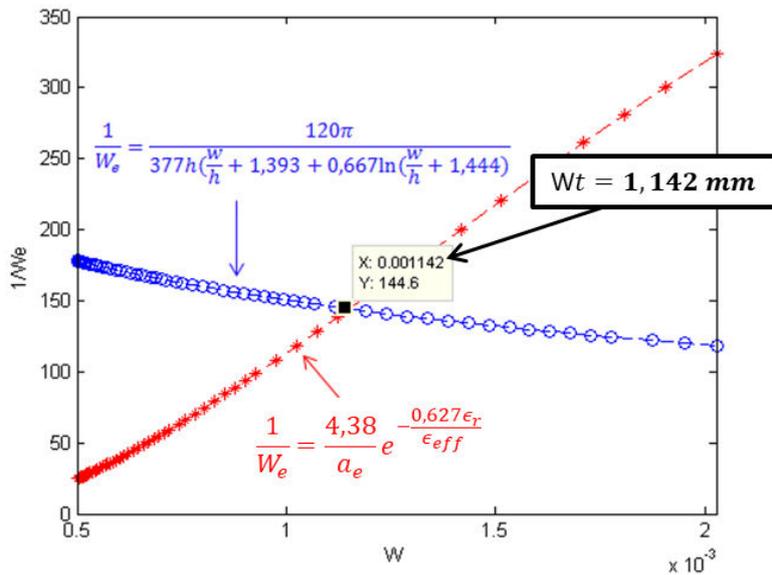
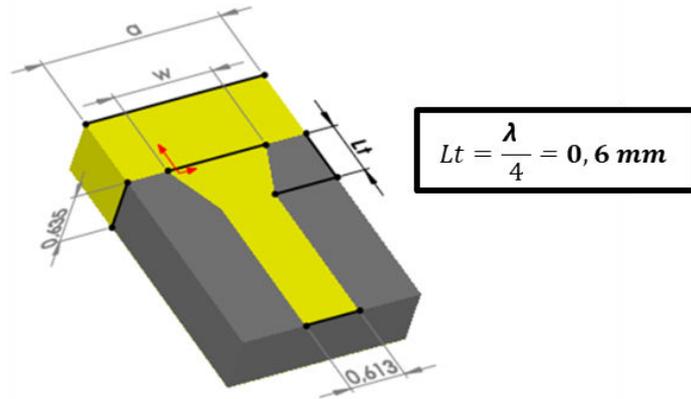


Figure 111 : Exemple de calcul des dimensions optimales de la transition microruban conventionnelle.

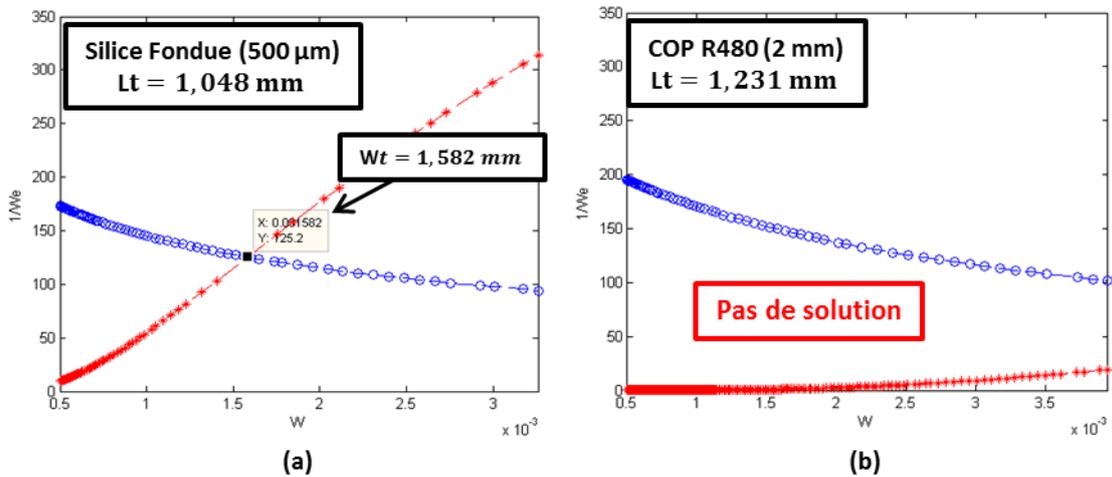


Figure III.112: Calcul de la largeur optimale du "taper" microruban dans le cas de la silice fondue (a) et du COP (b)

III.5.2 Limitations de la transition microruban

Dans le cas de la transition microruban, les principales limitations accompagnant l'augmentation de l'épaisseur de substrat sont liées à :

- l'élargissement physique de la ligne d'impédance caractéristique 50Ω aux accès :
Ceci implique une plus grande discontinuité au niveau de l'interconnexion avec les fils de « bonding ». La figure III.113 présente les vues 3D des transitions microruban dimensionnées pour des épaisseurs de substrats de $254 \mu\text{m}$ et $635 \mu\text{m}$ pour l'alumine (a) et de $254 \mu\text{m}$ et $500 \mu\text{m}$ pour la silice fondue (b). Aux épaisseurs de substrat visées, la ligne 50Ω a une largeur de $0,613 \text{ mm}$ pour l'alumine et de $1,074 \text{ mm}$ pour la silice fondue. Les rapports espacement des fils par largeur de ligne sont respectivement de $0,16$ et de $0,09$ ce qui fait, en se référant à l'état de l'art [4] présenté dans le chapitre I, des valeurs d'inductance mutuelle des fils de l'ordre de 250 nH . Cette inductance parasite est minimale pour des rapports espacement des fils par largeur de ligne se rapprochant de 1 . Dans notre cas, la configuration du câblage filaire étant fixée par Thales Alenia Space, il faut trouver le moyen de diminuer la largeur de la ligne et donc l'épaisseur du substrat à l'accès du filtre.

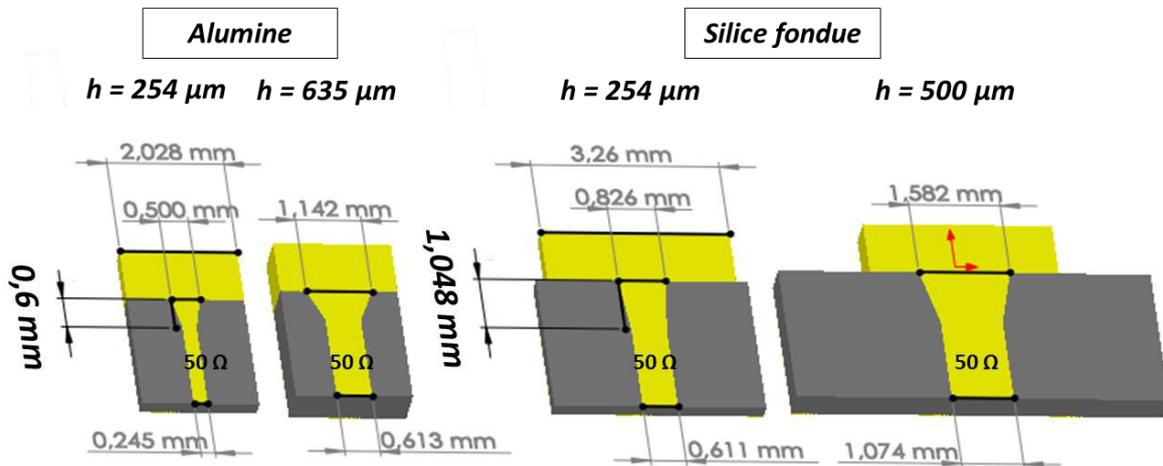


Figure III.113 : Transition microruban conventionnelle sur substrats d'alumine et de silice fondue de différentes épaisseurs

L'élargissement de la ligne d'accès rajoute au problème d'interconnexion filaire un problème d'excitation des modes hybrides supérieurs sur les lignes microruban ce qui amène des couplages parasites mal-maitrisés. La figure III.114 présente les diagrammes de dispersion du mode quasi-TEM et des premiers modes hybrides supérieurs des lignes microruban d'impédance caractéristique 50Ω simulées avec le

logiciel HFSSTM. Pour le substrat silice fondue de faible permittivité, le mode parasite HE₁ apparaît à une fréquence critique proche de 40 GHz même à une épaisseur de 254 μm.

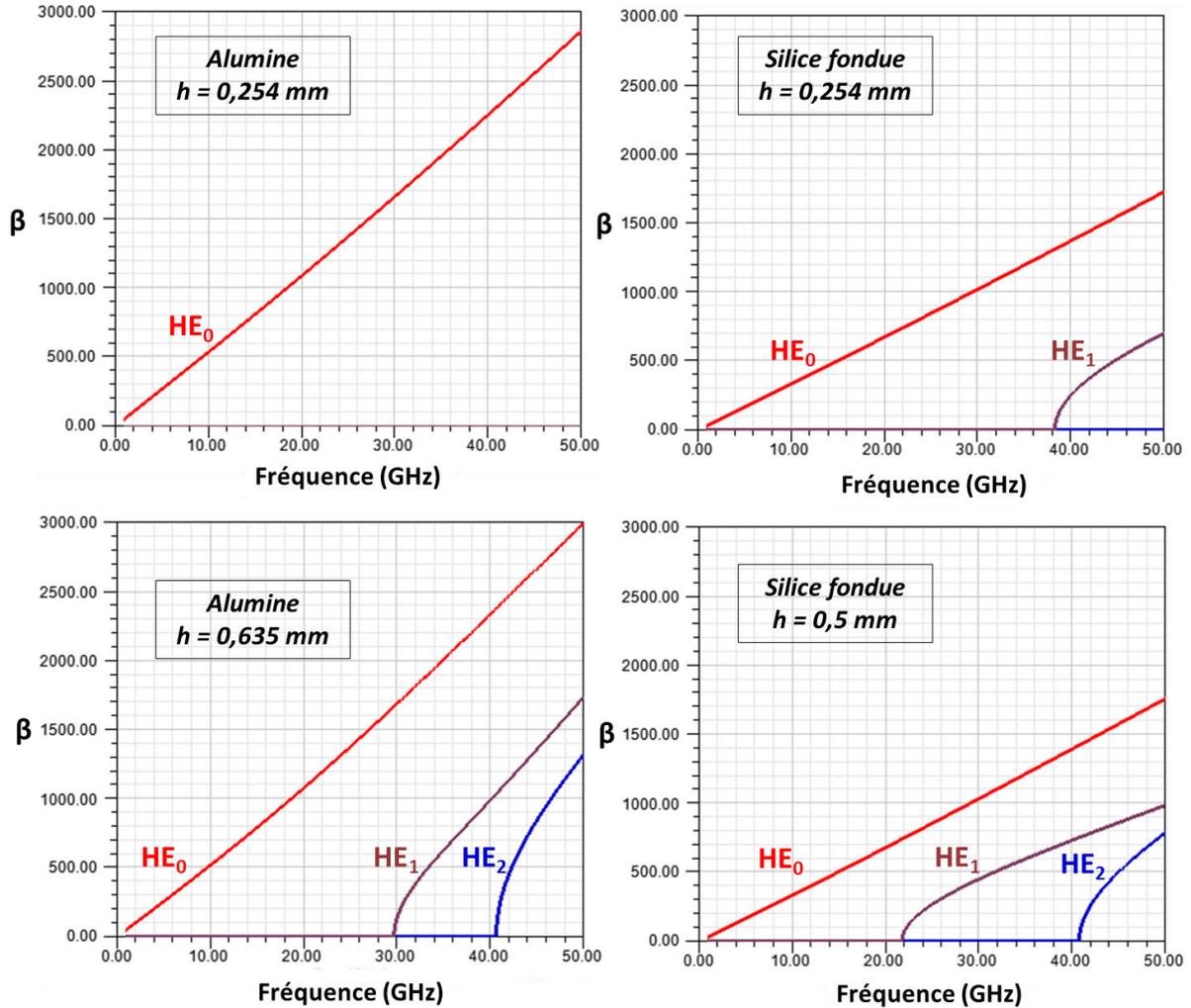


Figure III.114 : Diagrammes de dispersion de lignes 50 Ω sur substrats d'alumine et de silice fondue de différentes épaisseurs.

- la différence de hauteur entre le filtre et les MIC de 254 μm d'épaisseur : Ce qui rallonge inévitablement les fils de « bonding » rajoutant des effets parasites pas toujours faciles à compenser. La figure III.115 présente les paramètres S fournis par Thales Alenia Space des 1/2-fils de « bonding » à compenser au niveau de l'accès microruban du filtre. La valeur de 225 μm correspond à une épaisseur de filtre égale à celle du MIC, les valeurs de 325 μm et de 750 μm à des épaisseurs plus importantes. Afin de compenser les inductances parasites introduites par les fils, l'idée est d'utiliser un simple pad capacitif comme celui présenté dans l'état de l'art [5] (résultat présenté dans le chapitre I). La valeur de la capacité est déduite à partir de la simulation ADS.

Pour une longueur de fils de $750 \mu\text{m}$ la compensation n'est pas réalisable par un simple pad capacitif (cf. figure III.116).

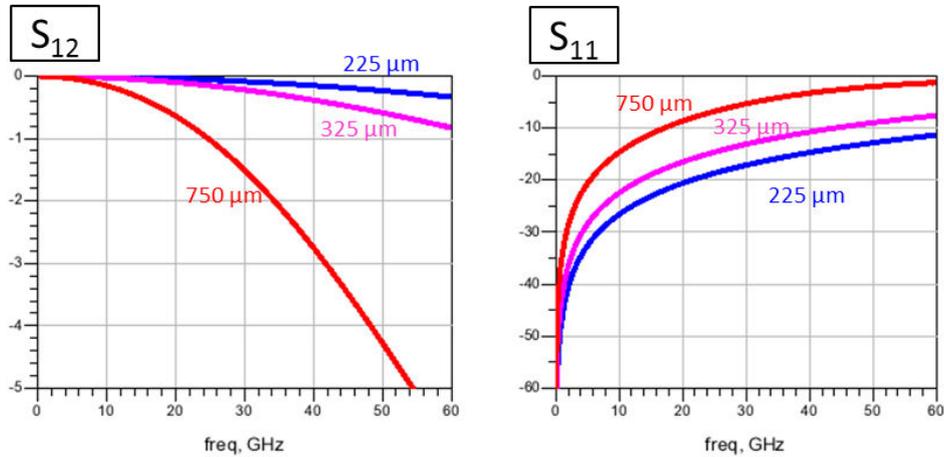


Figure III.115 : Paramètres S des fils de "bonding" fournis par Thales Alenia Space.

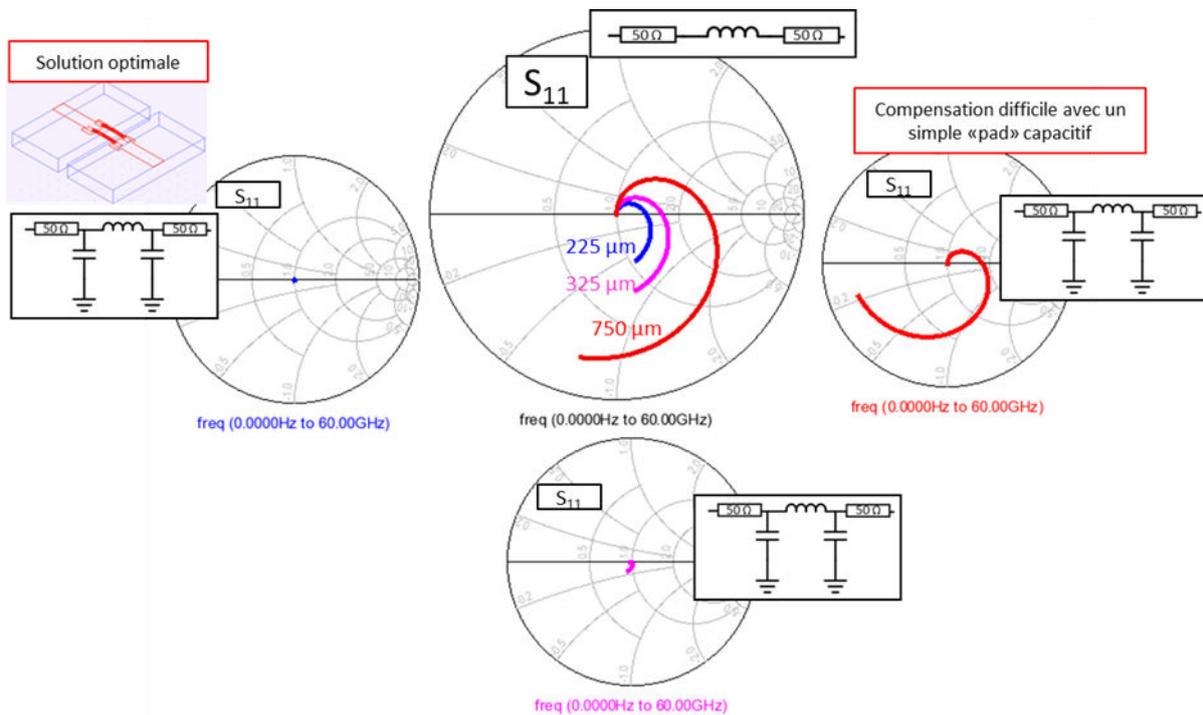


Figure III.116 : Simulation de la compensation des effets inductifs introduits par les fils de "bonding" de différentes longueurs.

III.6. Approche de conception et nouvelle transition 3D

III.6.1 Approche de conception

L'augmentation de l'épaisseur de substrat est requise pour obtenir des facteurs de qualité suffisants. La transition microruban conventionnelle utilisée pour assurer la transformation de mode, du quasi-TEM du côté microruban au TE_{10} du côté guide, est appropriée pour les faibles épaisseurs de substrat. Son implémentation pour des épaisseurs de substrats élevées se heurte à deux principales limitations. D'une part l'élargissement de la ligne 50Ω impliquant une plus grande discontinuité au niveau de l'interconnexion avec les fils de « bonding », et d'autre part l'augmentation du « gap » entre le circuit MIC et le filtre rallongeant la longueur des fils et augmentant leur inductance parasite. Afin de conserver une hauteur relativement élevée du cœur RF et de simplifier l'intégrabilité du filtre entre les deux circuits MIC, il faut imaginer une transition 3D qui tout en assurant son rôle de transformation de mode permet le passage d'une hauteur de $254 \mu m$ au niveau de la ligne d'accès du filtre à une hauteur plus importante au niveau des cavités résonantes (cf. figure III.117).

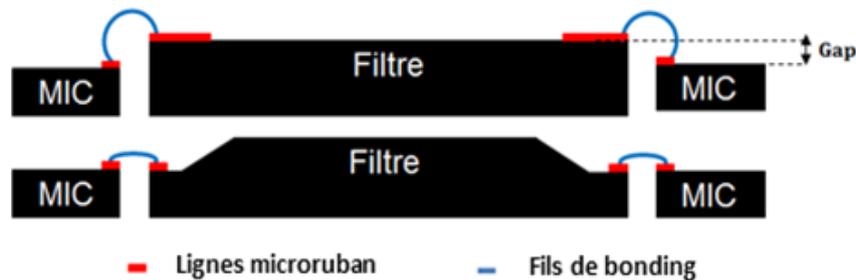


Figure III.117 : Approche de conception pour l'intégrabilité dans un environnement MIC.

III.6.2 Transition 3D

Dans le même esprit, une idée proposée dans [6] permet de concrétiser l'approche d'intégrabilité présentée plus haut. Dans ce cas, le guide change d'épaisseur à ses accès et la transition microruban conventionnelle est gravée sur une épaisseur constante. La limitation de ce concept réside dans l'encombrement global de la structure. À partir de là, une nouvelle idée consiste à graver le « taper » de la transition conventionnelle sur la pente arrivant au niveau de l'épaisseur du filtre (cf. figure III.118). Dans ce cas, le profil de la transition dépend de l'épaisseur variable au niveau de la pente. La figure III.119 présente les profils d'impédances et de largeurs de ligne pour la transition conventionnelle sur substrat d'alumine d'épaisseur constante (a) et d'épaisseur variable (b).

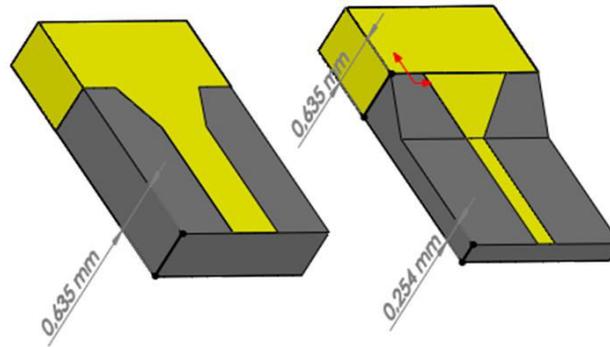


Figure III.118 : Transition microruban conventionnelle sur pente

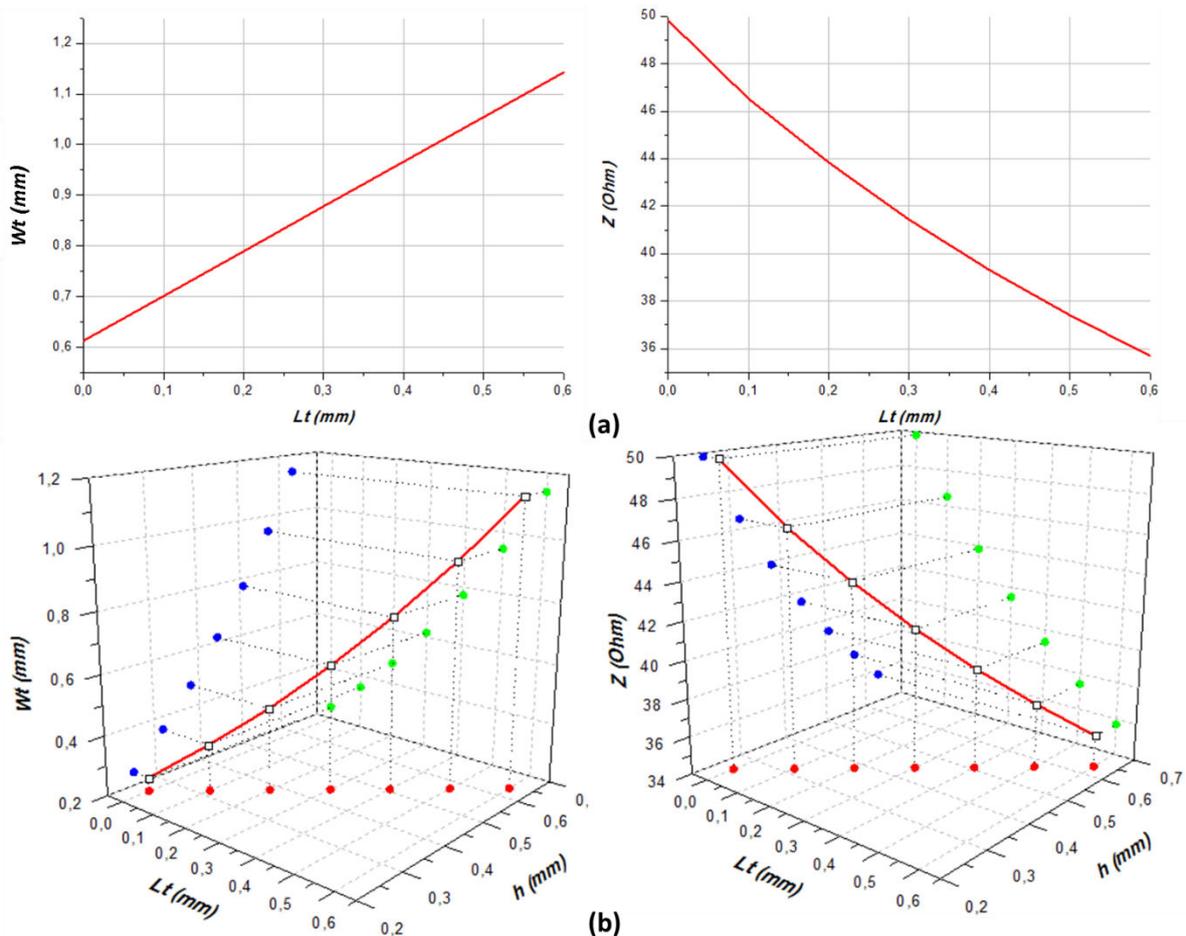


Figure III.119 : Profils d'impédance et de largeur de ligne de la transition conventionnelle : (a) sur une épaisseur d'alumine de (b) sur une épaisseur d'alumine variable.

Les résultats de simulation d'un guide d'onde avec les deux types de transition sont présentés dans la figure III.120. L'adaptation du guide est impactée dans le cas de la transition sur pente mais reste à un niveau de 10 dB dans toute la bande de 30 GHz à 50 GHz. L'usage du substrat autour du « taper » permet d'améliorer l'adaptation, la transition ainsi conçue reste néanmoins difficile à réaliser nécessitant des méthodes de masquage assez précises pour l'étape de métallisation.

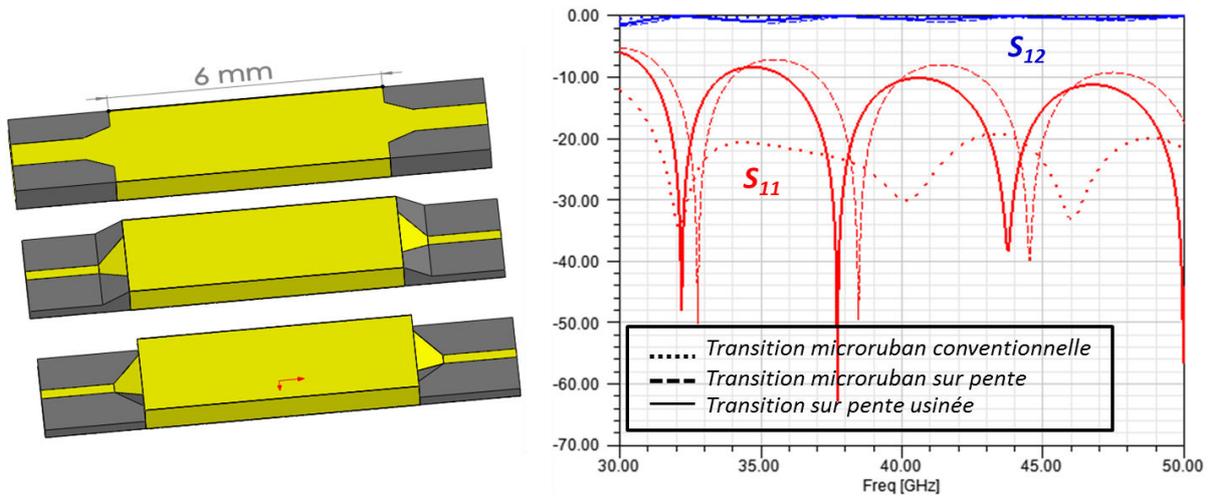


Figure III.120 : Réponse d'un guide d'onde terminé par des transitions microruban sur une alumine à $635 \mu\text{m}$ (a), une pente (b) et une pente usinée (c).

Afin de simplifier la réalisation de cette transition en réduisant les zones de masquage pour la pulvérisation cathodique et la croissance (cf. chapitre II), la transition est intégrée dans le guide. La figure III.121 présente une vue 3D de la transition proposée. Les paramètres Wt et Lt sont obtenues grâce à l'outil d'optimisation d'HFSSTM pour avoir une adaptation supérieure à 15 dB dans la bande passante du filtre. Pour tenir compte des contraintes du procédé de fabrication (l'ablation laser pour les cas alumine et silice fondue), une version réaliste de la transition est également présentée.

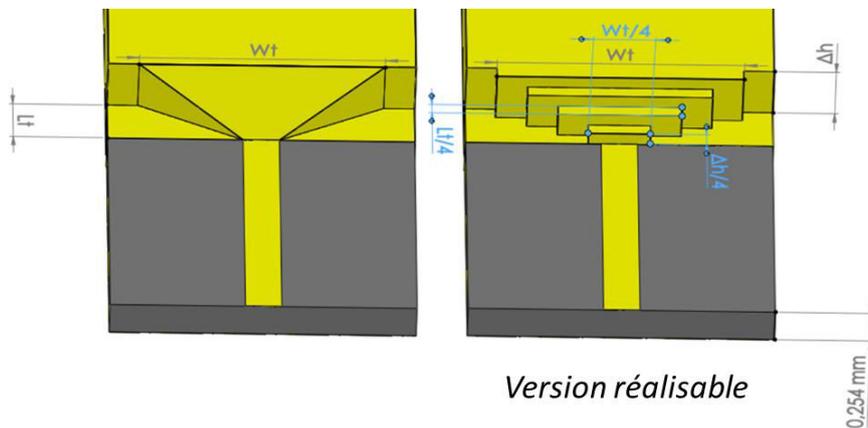


Figure III.121 : Vue de la nouvelle transition 3D.

La figure III.122 présente la distribution du champ électrique dans un guide SIW sur substrat d'alumine d'épaisseur $635 \mu\text{m}$ avec une transition 3D vers l'accès microruban à une épaisseur de $254 \mu\text{m}$, le tout simulé sous HFSSTM. Ce résultat permet de vérifier que la nouvelle transition 3D assure bien la transformation du mode quasi-TEM au niveau de la ligne microruban vers le mode fondamental TE_{10} dans le guide.

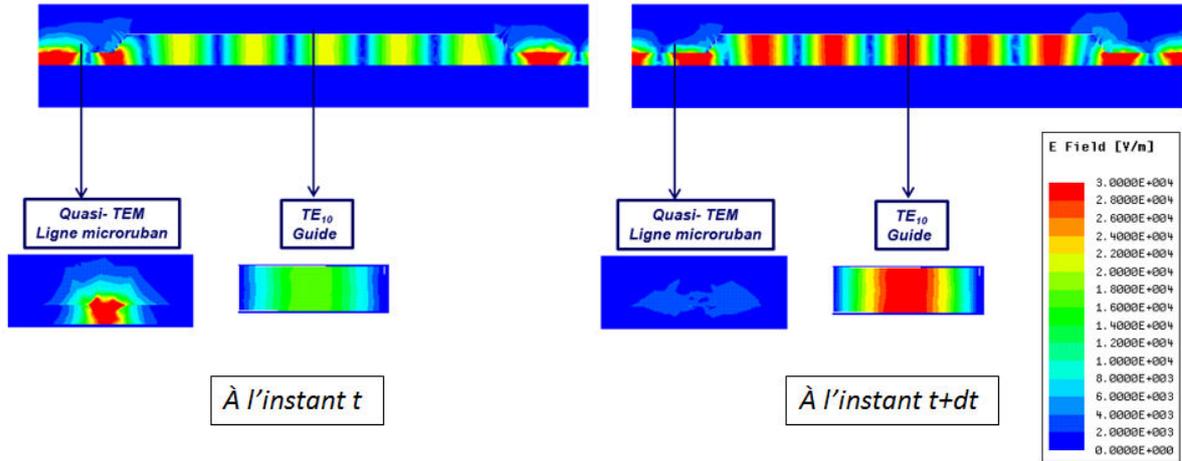


Figure III.122 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW avec la transition 3D (HFSS™).

La transition 3D est utilisée pour assurer l'intégrabilité des différentes solutions de filtrage proposées dans ce travail de thèse. Les résultats de simulation des différents filtres avec cette transition sont présentés dans la suite de ce chapitre.

III.7. Filtres SIW sur substrats d'alumine et de silice fondue

Ce paragraphe reprend les différents résultats de simulation des filtres en alumine et en silice fondue. Ces filtres sont réalisés par une technique d'ablation laser suivie de techniques de photolithographie et de croissance électrolytique présentées dans le chapitre II. Les précisions ainsi que les contraintes de fabrication, bien définies dans ce cas, sont prise en compte dans la conception des différentes structures de filtrage.

III.7.1 Filtres planaires

Les figures III.123 et III.124 présentent les résultats de simulation des filtres planaires avec la transition microruban conventionnelle pour des épaisseurs de substrats de $254 \mu m$ et de $635 \mu m$ pour l'alumine et de $254 \mu m$ et $500 \mu m$ pour la silice fondue. Pour les filtres alumine, le diamètre des trous métallisés des couplages d'accès obtenu par la synthèse présentée plus haut reste très petit par rapport au contraintes de fabrication (rapport $d/h > 0,5$). Ces plots sont par conséquent remplacés par des iris formés par deux trous métallisés avec un diamètre respectant les limites fixées par le fabricant. Les couplages aux accès sont modifiés en conséquence et les différents paramètres sont optimisés pour obtenir les structures et les réponses présentées ci-après. La forme du filtre silice fondue est quant à elle imposée par la largeur de la ligne d'accès et par conséquent du substrat à l'accès du filtre pour assurer une

bonne excitation de la ligne microruban. Une forme de support rectangulaire est imaginée afin de respecter les standards de report par collage adoptés par Thales Alenia Space.

Les performances dans la bande sont meilleures pour les épaisseurs de substrat importantes et sont quasi-identiques pour les deux versions alumine et silice fondue. En bande atténuée, le paramètre S_{12} de la réponse est mal-maitrisée. Ceci est d'autant plus marqué pour les filtres épais. Dans le cas de l'alumine les couplages involontaires rajoutent des zéros de transmission favorables à une meilleure réjection hors-bande. Dans le cas de la silice, ces couplages génèrent des parasites ne permettant pas de respecter le gabarit défini pour la mission THD-sat.

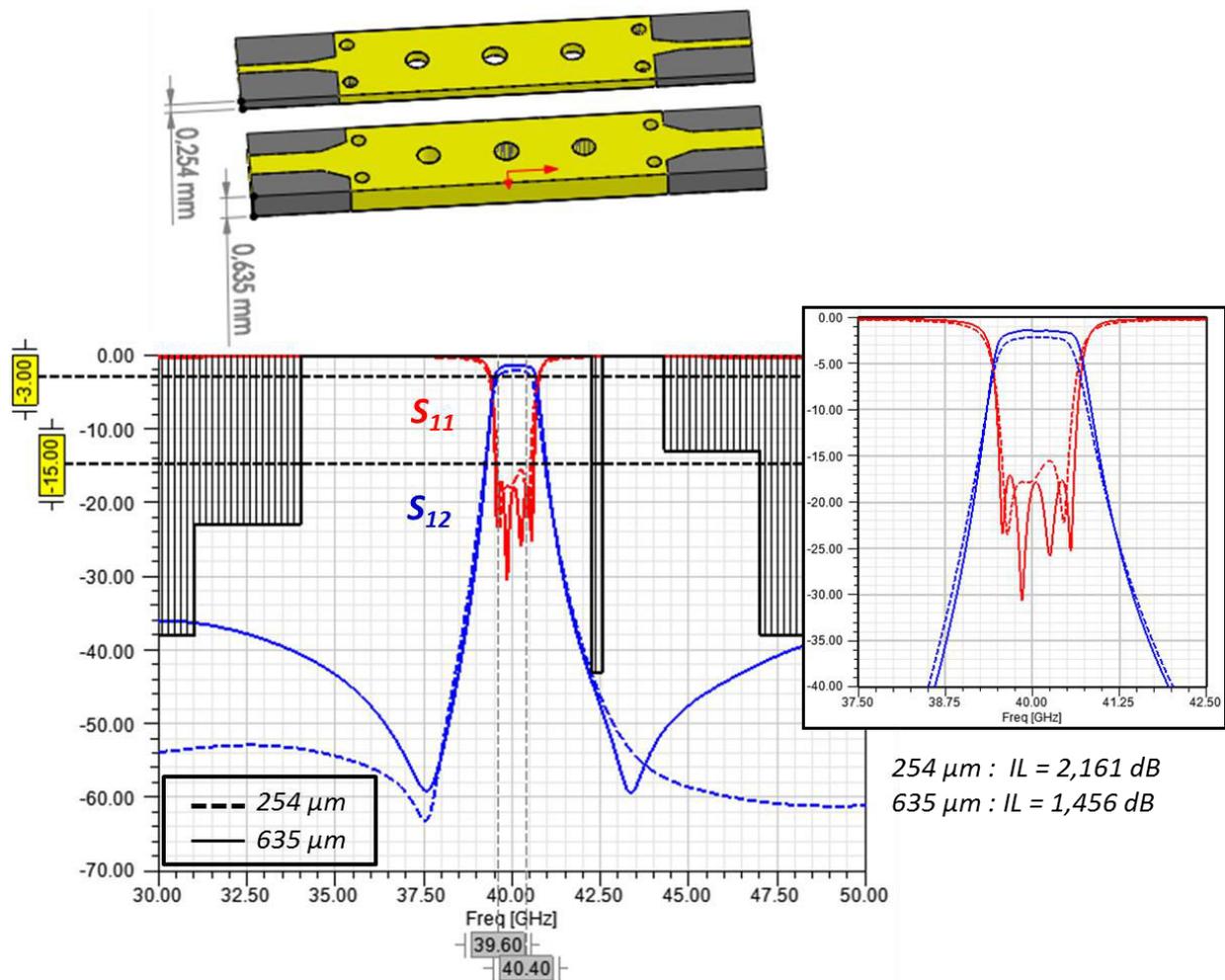


Figure III.123 : Résultats de simulation des filtres planaires en alumine d'épaisseurs 254 μm et 635 μm .

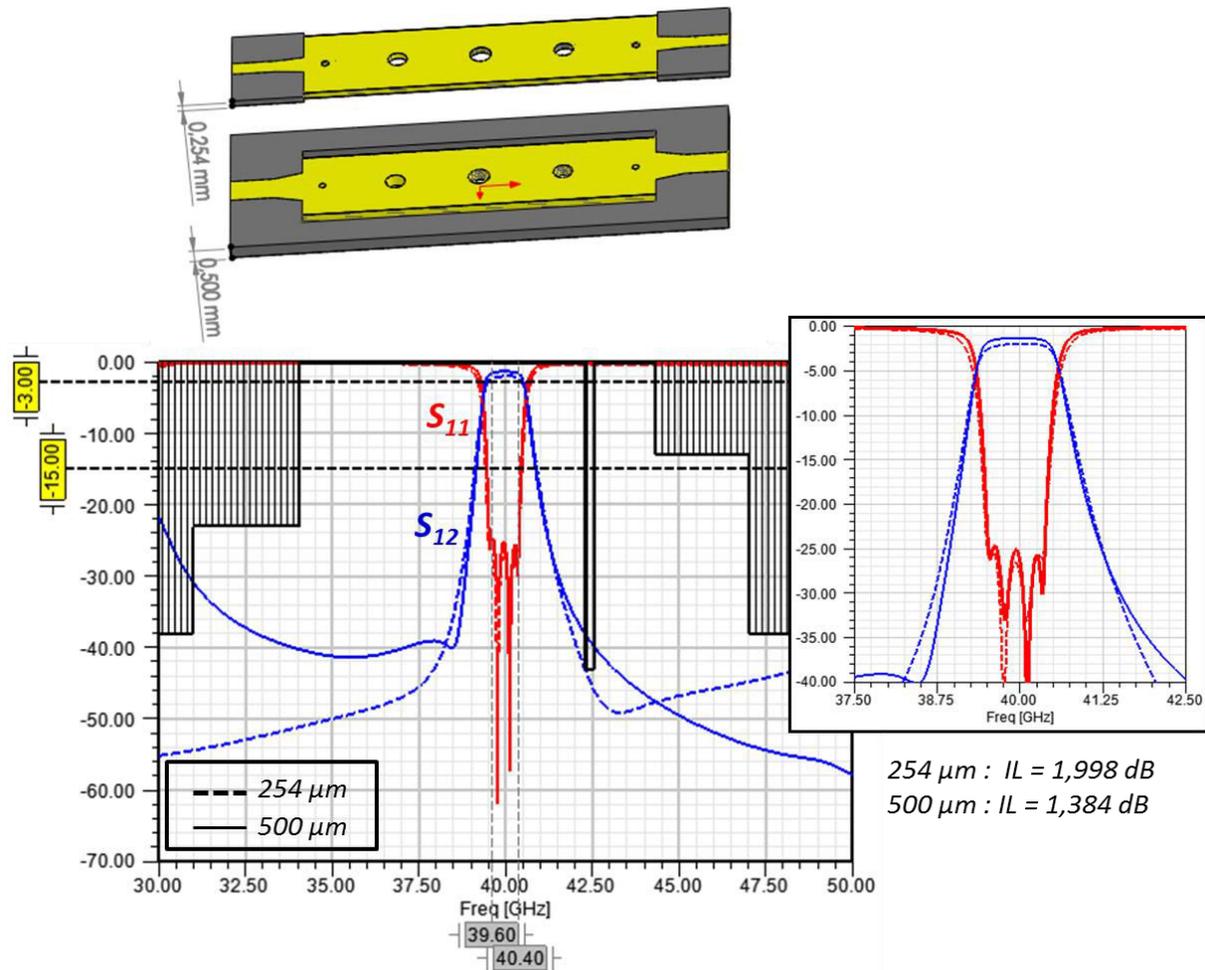


Figure III.124 : Résultats de simulation des filtres planaires en silice fondue d'épaisseurs 254 μm et 500 μm .

III.7.2 Filtres 3D

Les réponses des filtres planaires d'épaisseur 635 μm pour l'alumine et 500 μm pour la silice fondue sont comparées aux réponses des filtres de mêmes épaisseurs mais avec la nouvelle transition 3D vers l'accès microruban sur un substrat de 254 μm (cf. figure III.125). Les performances dans la bande sont quasi-identiques dans les deux cas. Ainsi, sans dégradation des performances, la transition 3D offre la possibilité d'une intégration plus facile. Une réjection supérieure à 40 dB est assurée dans le cas des filtres 3D. Dans le cas de l'alumine, la réjection reste néanmoins insuffisante pour respecter le gabarit de la mission THD-sat. En effet, un phénomène de planchers parasites hors-bande apparaît. Ce phénomène est dû à un fort couplage entre les accès microruban qui sont très rapprochés du fait de la taille des filtres (Ces niveaux s'amplifient davantage pour les versions repliés des filtres présentées dans l'annexe 1). Afin de vérifier ce résultat, une pièce d'absorbant électromagnétique est montée sur la pièce afin d'absorber les couplages parasites. La figure III.126 présente les réponses du filtre alumine avec et sans absorbant simulé à l'aide du logiciel HFSSTM. Ces

réponses permettent de constater la diminution des niveaux des planchers grâce à la pièce d'absorbant.

En ce qui concerne l'absorbant, il s'agit du polymère *acrylonitrile butadiène styrène* (ABS) industriel utilisé pour l'impression 3D. Les caractéristiques électriques de ces matériaux à 15 GHz sont fournies par Vincent Laur et Azar Maalouf de l'équipe MF (Matériaux Fonctionnels) du Lab-STICC. Une partie de leurs travaux de recherche concerne, en effet, la mise en forme d'absorbants électromagnétiques par impression 3D [7].

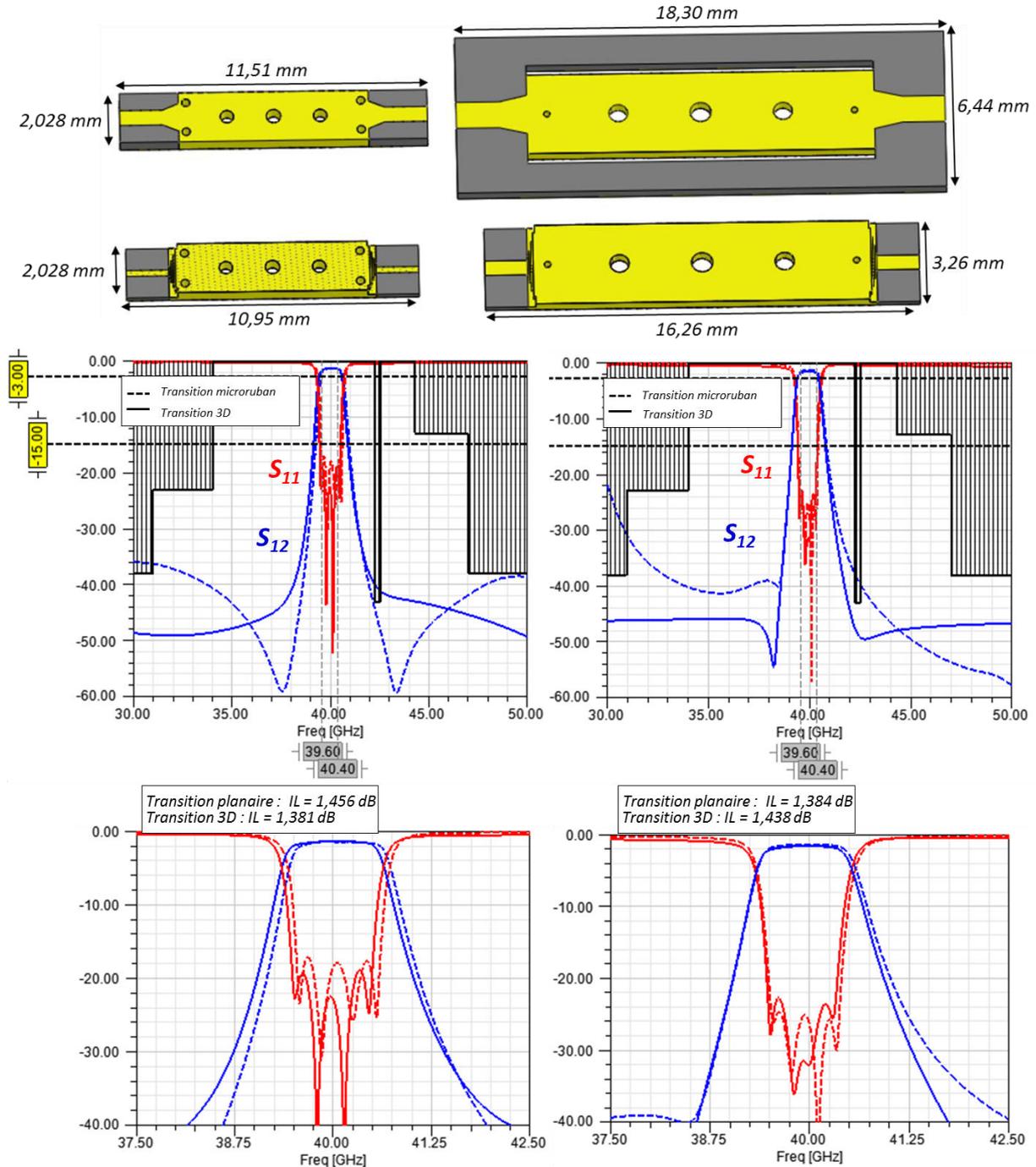


Figure III.125 : Résultats de simulation des filtres 3D en alumine et en silice fondue comparés à ceux des filtres planaires.

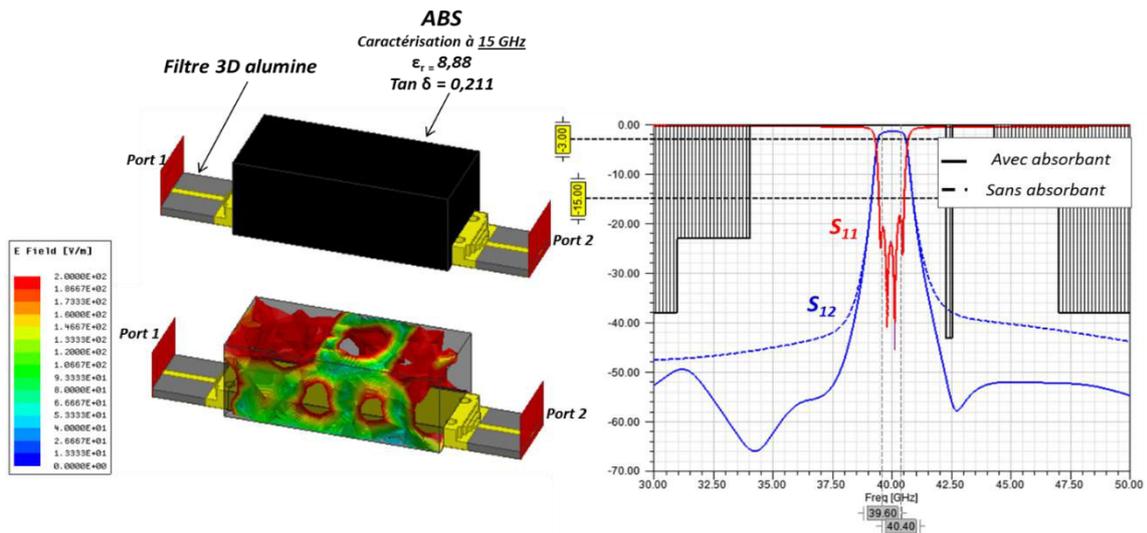


Figure III.126 : Résultats de simulation du filtre alumine avec un absorbant EM (ABS) placé entre les accès pour éliminer les couplages parasites.

III.7.3 Filtres en bande V

La figure III.127 présente les structures de filtrage en alumine et en silice fondue développées pour la spécification en bande V. La taille des filtres en alumine devient très petite et le couplage entre les accès devient très fort ce qui ne permet pas de respecter le gabarit imposé dans ce cas. Pour le filtre silice de taille équivalente à celle du filtre alumine en bande Q, un zéro de transmission introduit par les couplages parasites aide à respecter les spécifications. Pour la suite de cette étude, nous avons décidé de mettre de côté ces structures pour avancer sur la conception et la réalisation des filtres en bande Q.

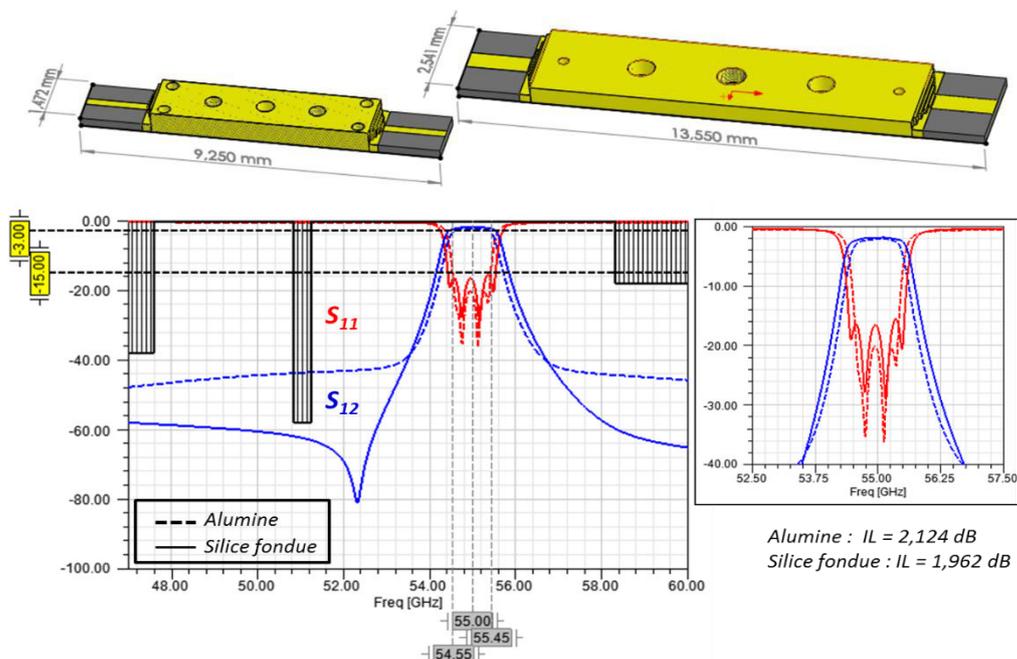


Figure III.127 : Résultats de simulation des filtres 3D bande V.

III.8. Conception des Filtres SIW en thermoplastiques COC/COP

La réponse du filtre COP d'épaisseur 2 mm est superposée aux réponses des filtres alumine et silice fondue (cf. figure III.128). Comme attendu lors de l'évaluation du facteur de qualité, cette solution de filtrage présente de meilleures pertes par insertion et de meilleurs rejets hors-bande d'où l'intérêt, encore une fois, d'augmenter l'épaisseur de substrat. La limitation dans ce cas concerne la taille de la transition 3D qui augmente avec l'épaisseur de substrat. Pour une épaisseur de 2 mm, la taille reste correcte et impacte légèrement les performances du filtre.

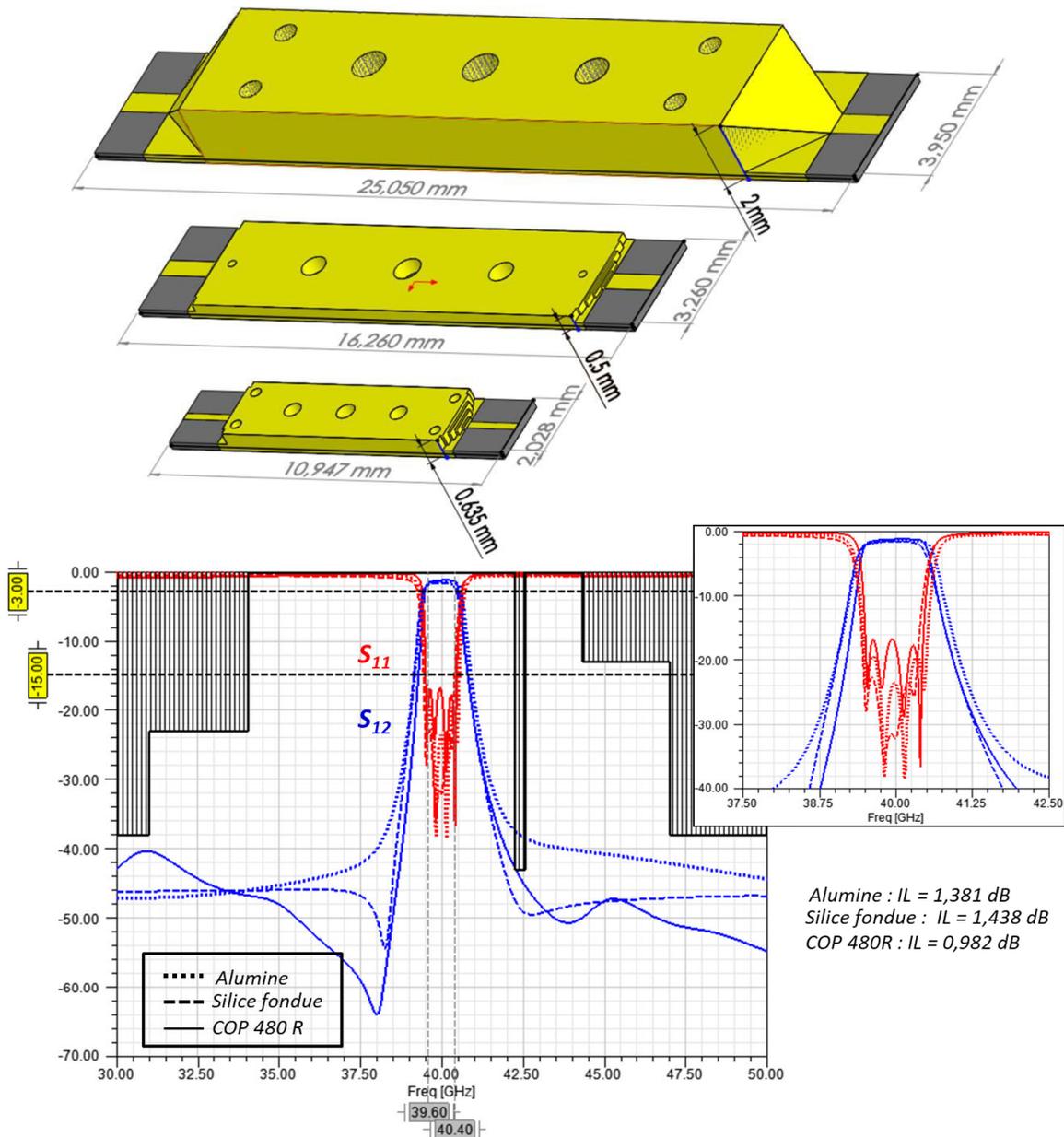


Figure III.128 : Résultats de simulation des filtres Bande Q en alumine, silice fondue et thermoplastique COP 480R.

III.8.1 Généricité de la bande passante

Dans le cas des filtres polymère, la mise en forme du substrat est faite par moulage polymère. Dans un souci de minimisation des coûts, il faut maximiser l'usage du moule. Dans cette optique, on entend par généricité de la bande passante la disposition d'une pièce moulée dont les dimensions sont fixes à répondre à plusieurs spécifications en bande passante. Les différentes bandes passantes sont obtenues en modulant les diamètres et les positions des trous métallisés (cf. figures III.129 et III.130). La réalisation des filtres avec les différentes bandes passantes nécessite par conséquent des perçages très précis en termes de diamètres et de positions des trous d'où l'intérêt de la solution laser accessible grâce à l'Equipex Leaf de l'IEMN (cf. chapitre II).

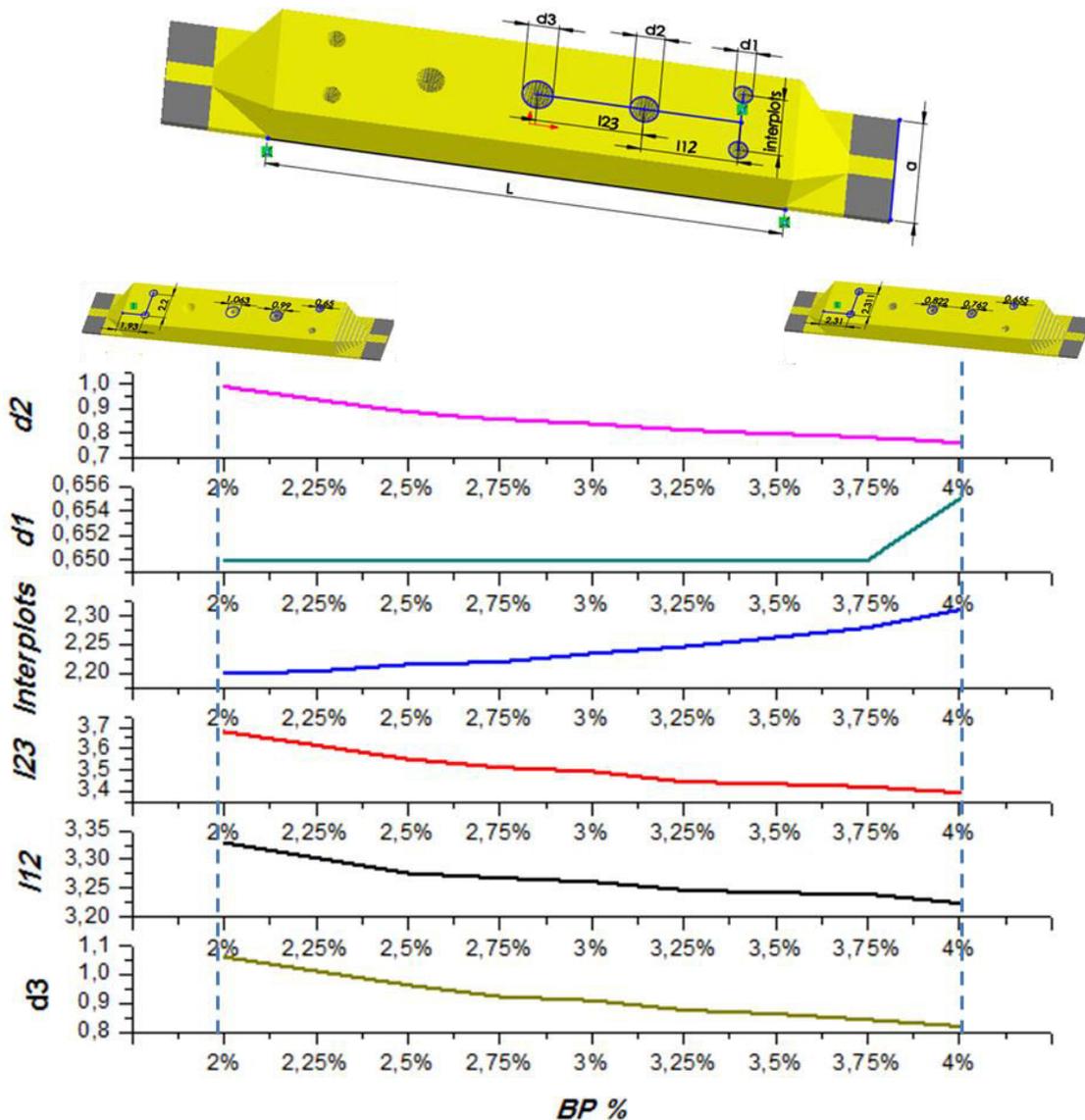


Figure III.129 : Diamètres et positions des trous en fonction des bandes passantes ciblées.

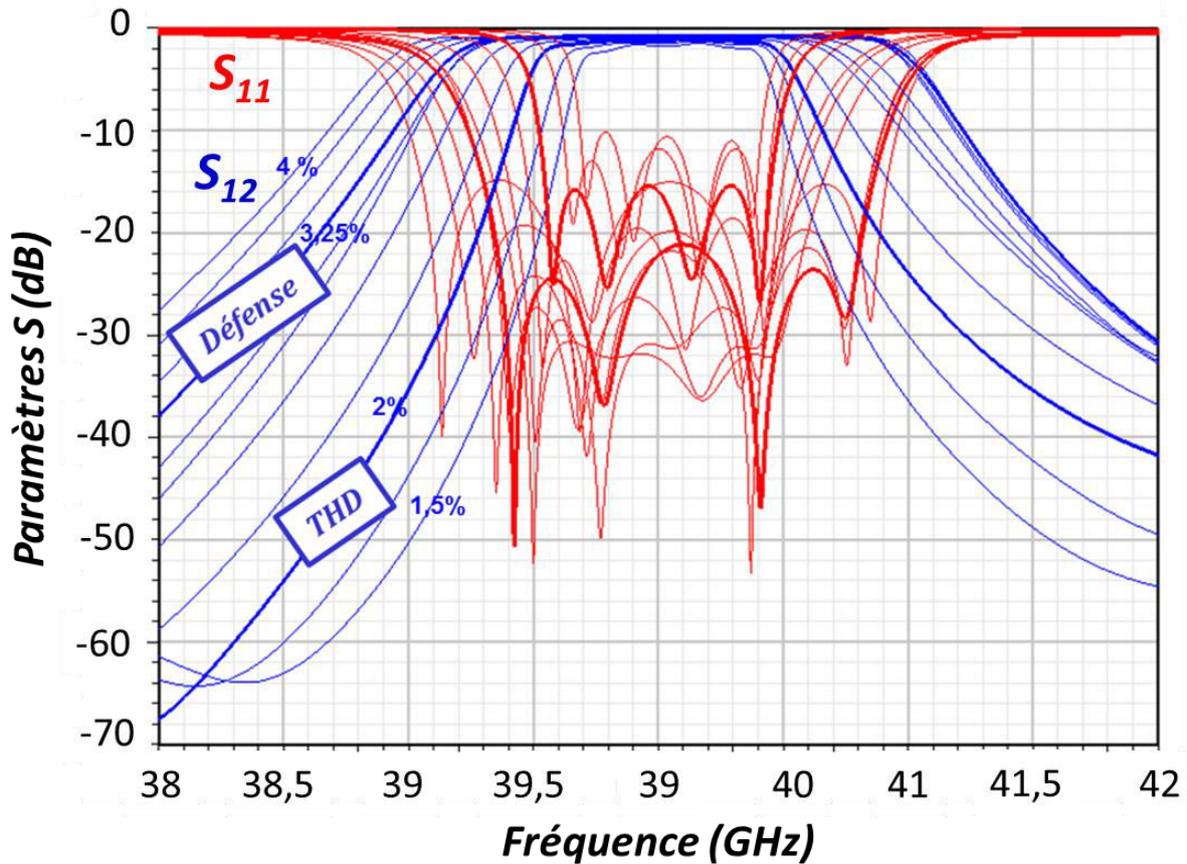


Figure III.130 : Généricité de la bande passante.

III.8.2 Sensibilité aux tolérances de fabrication

Le procédé de fabrication des filtres en thermoplastiques est encore exploratoire et les précisions de fabrication dans ce cas n'étaient pas bien définies à l'étape de conception d'où la nécessité d'effectuer une analyse de sensibilité aux tolérances de fabrication de ces structures. Les sensibilités sont évaluées dans le cas de :

- variations des caractéristiques électriques du substrat :

Le filtre est simulé dans un premier temps avec une variation de la permittivité entre 2,2 et 2,6 ; ce qui se traduit par un décalage fréquentiel de 41,85 GHz et 37,87 GHz (cf. figure III.131). Des solutions de post-réglage sont imaginées afin de recentrer la réponse du filtre sur 40 GHz. Ces solutions impactent néanmoins fortement le facteur de qualité. Ceci est d'autant plus vrai que le décalage à régler est important (cf. annexe 2). Nous simulons ensuite le filtre pour différentes tangentes de pertes allant de 10^{-4} à 10^{-3} . Pour les différentes valeurs, les pertes par insertion restent au-dessous de 3 dB mais la platitude du filtre est fortement impactée.

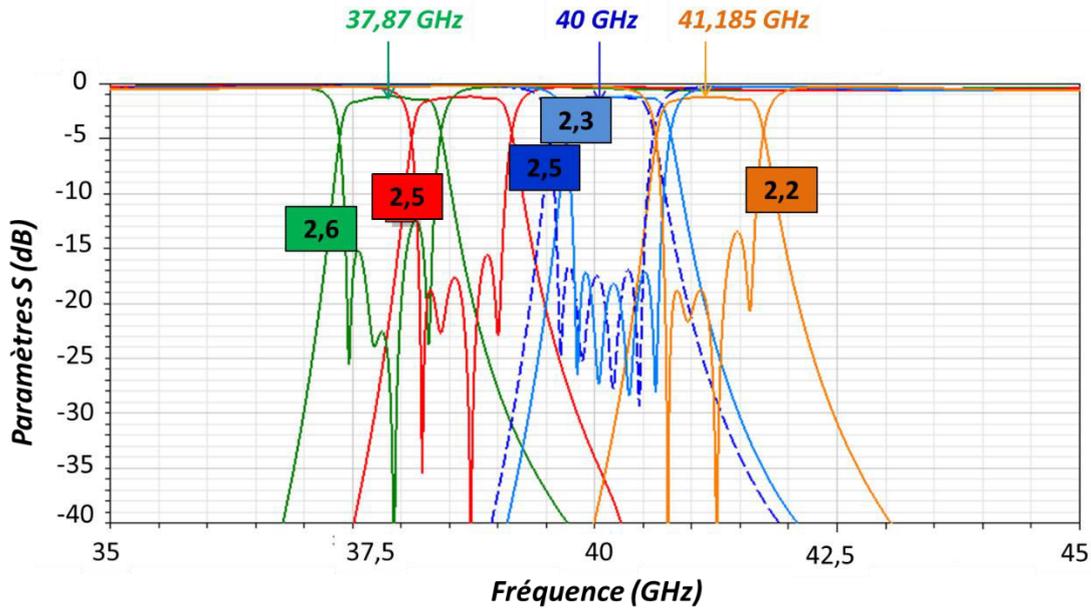


Figure III.131 : Sensibilité de la réponse du filtre COP aux variations de la permittivité.

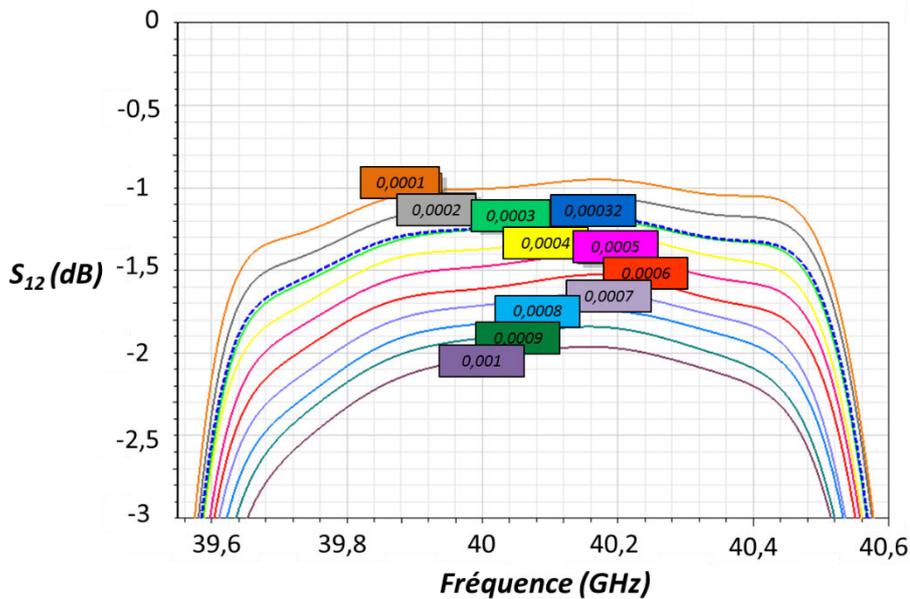


Figure III.132 : Sensibilité de la réponse du filtre aux variations de la tangente de pertes.

- variations dimensionnelles du filtre :

Les variations dimensionnelles du filtre concernent la longueur et la largeur du filtre ainsi que les diamètres et les positions des trous. La méthode adoptée consiste à faire varier les différentes dimensions séparément et d'en évaluer l'impact sur la réponse du filtre. La limite de sensibilité dans ce cas correspond à une réponse de filtrage qui ne respecte plus le gabarit de filtrage en bande Q comme dans l'exemple de la figure III.133. Les précisions nécessaires pour chaque dimension sont listées dans les tableaux de la figure III.134.

Cette méthode ne tient pas compte de la sensibilité de la réponse lors de la variation simultanée des différents paramètres à la fois sachant qu'un décalage due à une variation de permittivité peut être corrigé en redimensionnant et en repositionnant les trous. Une analyse de Monte Carlo avec une fonction de distribution comme dans [8] aurait été plus judicieuse à appliquer mais les temps de simulation et d'analyse auraient été beaucoup plus importants.

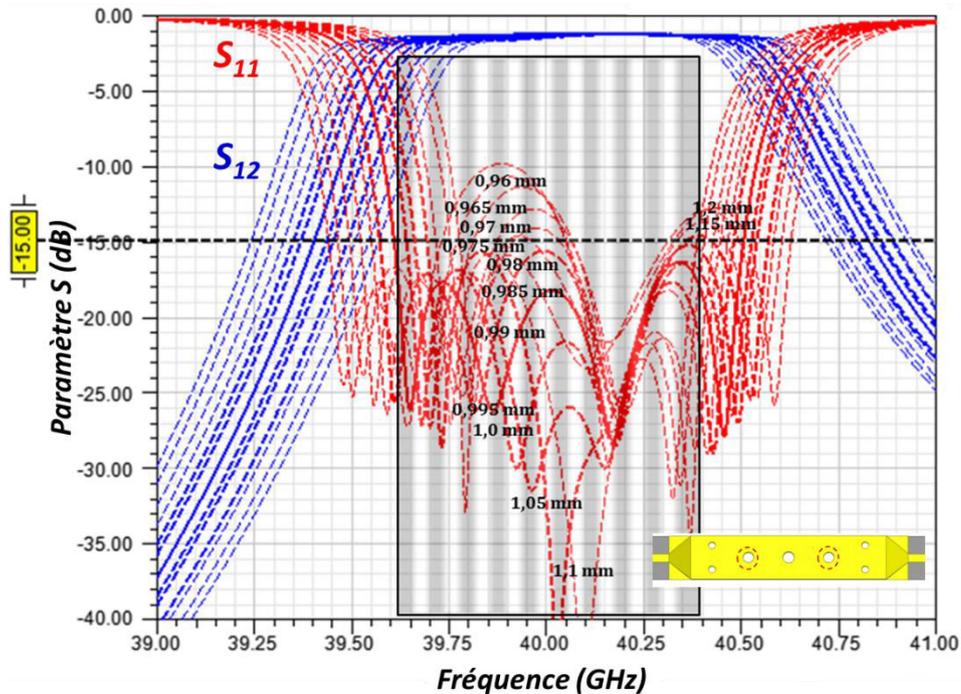


Figure III.133 : Variation de la réponse du filtre suite à une variation du diamètre des trous centraux.

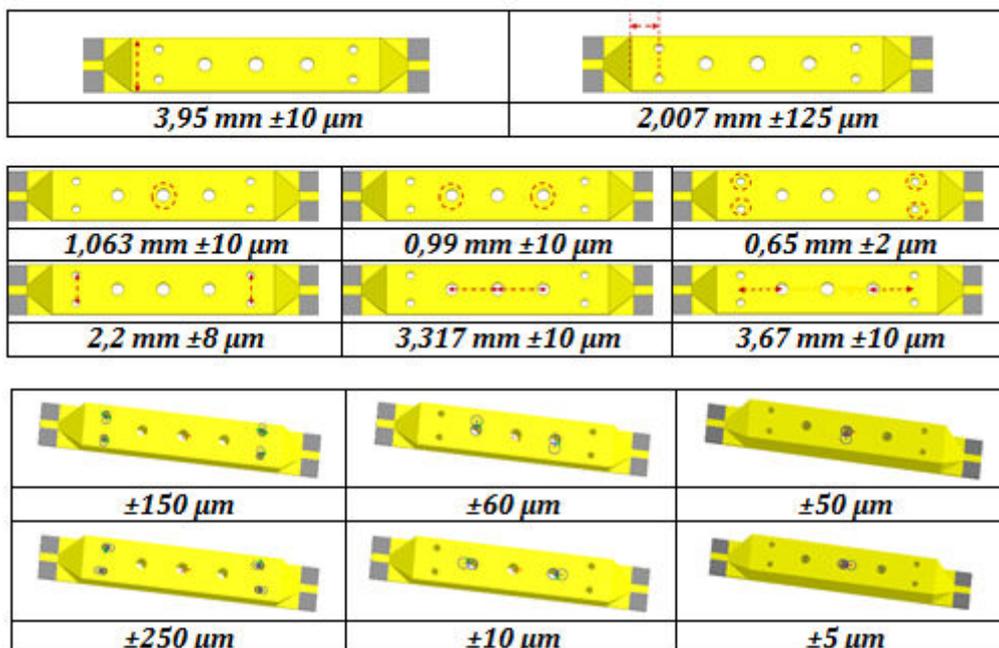


Figure III.134 : Limites de sensibilités dimensionnelles du filtre COP.

III.9. Mesures

Ce paragraphe reprend les résultats de mesures des filtres sur substrats d'alumine, de silice fondue et de thermoplastique COP. Dans le cas de la silice fondue, seul le résultat de mesure du filtre planaire est présenté, le filtre 3D étant actuellement en cours de fabrication.

III.9.1 Résultats de mesures des filtres sur substrats d'alumine et de silice fondue

III.9.1.1 Résultats de mesure des filtres sur substrat d'alumine

Les filtres sur substrat d'alumine ont été mesurés à Thales Alenia Space. Ces filtres sont d'abord reportés sur une semelle et câblés à deux lignes 50 Ω pour être ensuite mesurés sous pointe. Les résultats des mesures sont présentés sur la figure III.135.

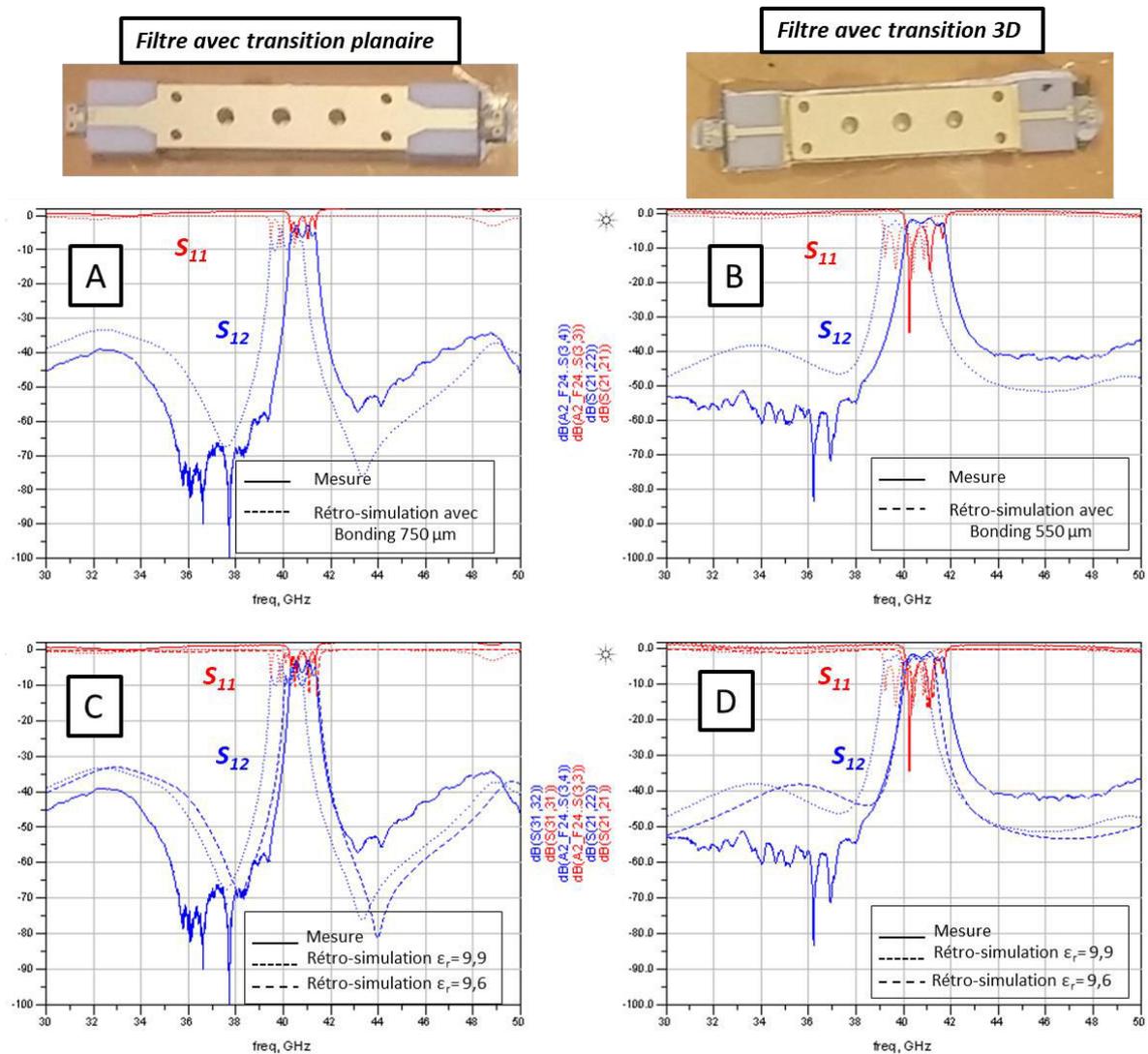


Figure III.135 : Résultats de mesures et de rétro-simulations des filtres sur substrat d'alumine.

Globalement, les mesures effectuées présentent trois problèmes :

1. Problème de calibration : Nous notons, sur les réponses des filtres, un paramètre S_{11} supérieur à 0 dB . Ce problème nous a également été signalé par le technicien ayant effectué la mesure à Thales Alenia Space.
2. Problème de longueur de fils de câblage : Pour les filtres planaires, il était initialement prévu de les mesurer dans une monture type Wiltron semblable à celle utilisée pour la mesure des filtres COP (cf. figure III.139). Vu sa petite taille, le filtre planaire sur substrat d'alumine a finalement été mesuré avec des fils de « bonding » sans motifs de compensation à ses accès d'où sa désadaptation. De même, le filtre 3D a été conçu avec un motif de compensation permettant de compenser $225\text{ }\mu\text{m}$ de fils. Lors du report, Thales Alenia Space nous a indiqué que des fils plus longs ont été utilisés pour le câblage. Après rétro-simulation, nous estimons la longueur des fils à compenser côté filtre à $750\text{ }\mu\text{m}$ dans le cas du filtre planaire et à $550\text{ }\mu\text{m}$ dans le cas du filtre 3D (cf. figures III.135 A et B), toujours en considérant que $225\text{ }\mu\text{m}$ de longueur de fils est compensée côté MIC. Ainsi, les longueurs globales de « bonding » sont respectivement de $975\text{ }\mu\text{m}$ et de $775\text{ }\mu\text{m}$. Afin de vérifier ce résultat, il suffit pour le cas du filtre 3D de compenser les $325\text{ }\mu\text{m}$ de fils supplémentaires. Grâce à une capacité, nous réalisons un de-embedding en simulation, en ajoutant l'opposée du paramètre S_{11} (effet inductif) introduit par les $\frac{1}{2}$ fils de $325\text{ }\mu\text{m}$ de longueur sur une ligne $50\text{ }\Omega$ idéale (cf. figure III.136). Le résultat de mesure avec l'étape de de-embedding est nettement amélioré (cf. figure III.137).

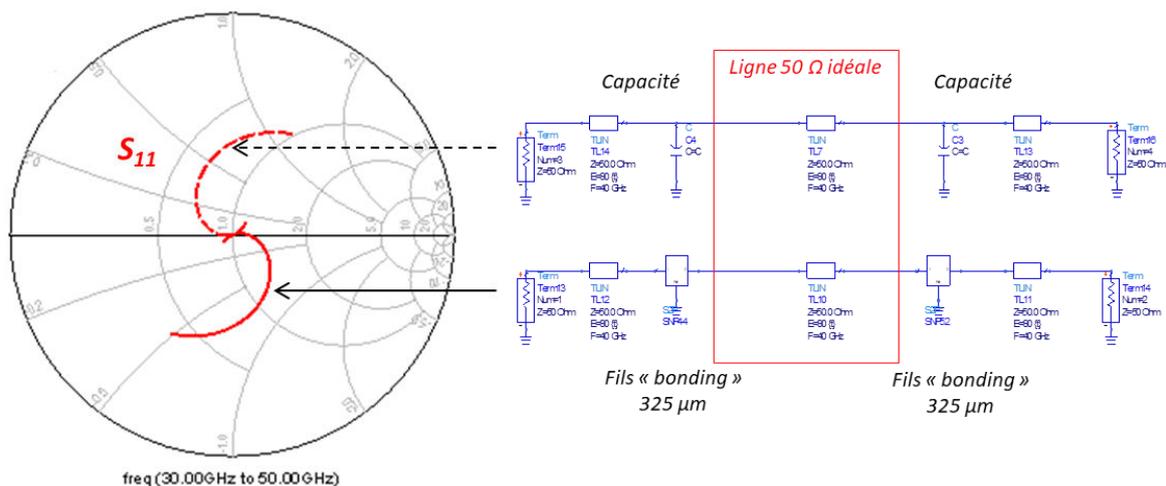


Figure III.136 : De-embedding de $325\text{ }\mu\text{m}$ de longueur de « bonding ».

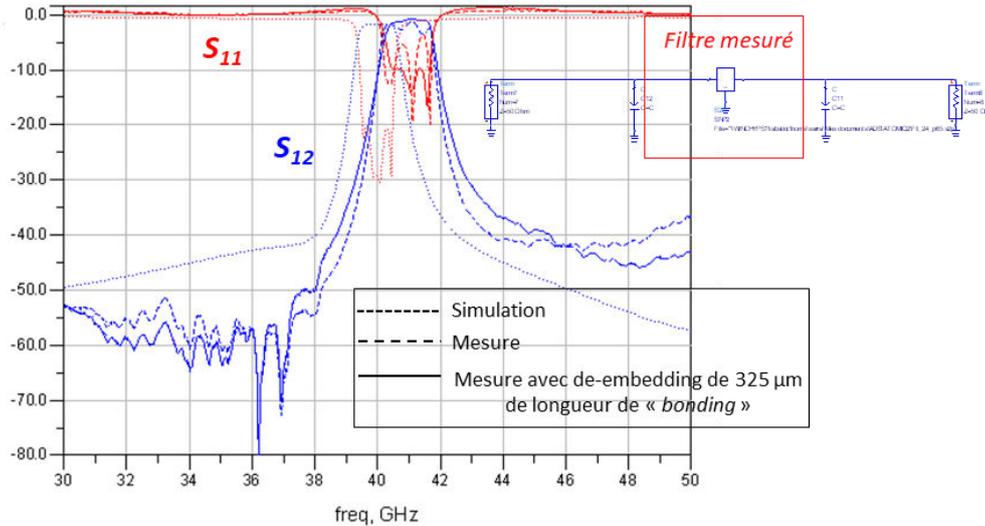


Figure III.137 : Filtre mesuré après de-embedding de 325 μm de longueur de "bonding".

3. Problème de variation de la permittivité : Nous notons par ailleurs un décalage fréquentiel de la réponse du filtre. Ceci est probablement dû à une variation de la permittivité qui serait de l'ordre de 9,6 au lieu de 9,9 à 40 GHz (cf. figure III.135 C et D).

III.9.1.2 Résultats de mesure des filtres sur substrat de silice fondue

Le filtre planaire sur substrat de silice fondue est également mesuré à Thales Alenia Space à l'aide d'une monture Wiltron. Le résultat de mesure est présenté sur la figure III.138. Ayant initialement conçu le filtre pour un substrat de permittivité égale à 3,2, sa réponse subit un décalage d'environ 5 GHz et un élargissement de la bande passante. D'après les données du nouveau fournisseur, la silice utilisée a une permittivité de 3,8. Après rétro-simulation de la structure avec la bonne valeur de la permittivité, un décalage fréquentiel persiste. Pour recentrer la réponse simulée sur celle mesurée, il faut une valeur de permittivité égale à 4,2. Seulement, si on imagine que la caractérisation du matériau est faite à une fréquence plus faible, la valeur de la permittivité doit être inférieure à 3,8 à 40 GHz. A titre indicatif et afin d'expliquer l'élargissement de la bande passante, nous avons effectué une rétro-simulation avec une largeur de guide plus importante, une permittivité de 3,4 et une erreur non-uniforme sur les diamètres des trous. Le résultat de la rétro-simulation superposé à celui de la mesure est donné sur la figure III.138. Ce résultat n'explique néanmoins pas la forte désadaptation observée sur le résultat de mesure. Un contrôle dimensionnel est en cours à Thales Alenia Space afin d'orienter les prochaines rétro-simulations.

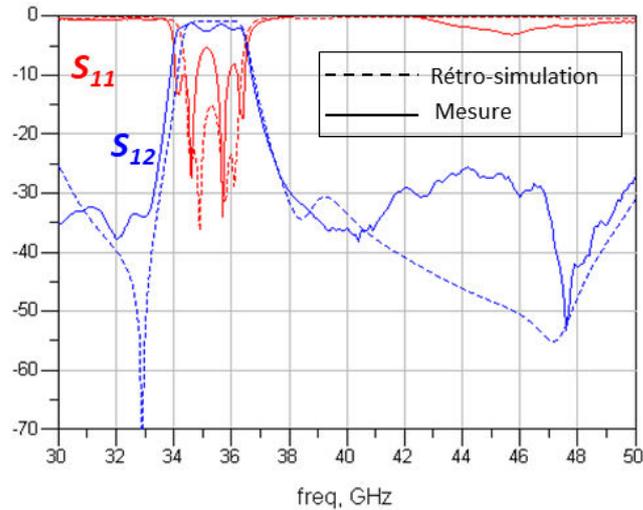


Figure III.138 : Résultats de mesure et de rétro-simulation du filtre planaire sur substrat de silice.

III.9.3 Résultats de mesure des Filtres 3D sur substrat thermoplastique COP

Pour les filtres COP, trois campagnes de mesure ont été effectuées en interne au Lab-STICC après chaque fabrication (les 3 procédés suivis et présentés dans le chapitre II). Le dispositif utilisé est présenté sur la figure III.139, Il comporte :

- Une cellule type Wiltron Anritsu 3680 K.
- Un analyseur de réseau E8364 50 GHz.
- Des câbles coaxiaux de 2,4 mm de diamètre.

Une calibration SOLT (Short, Open, Load, Thru) est effectuée au bout des câbles coaxiaux. Ainsi, seules les pertes liées à la cellule de mesure sont à prendre en compte.

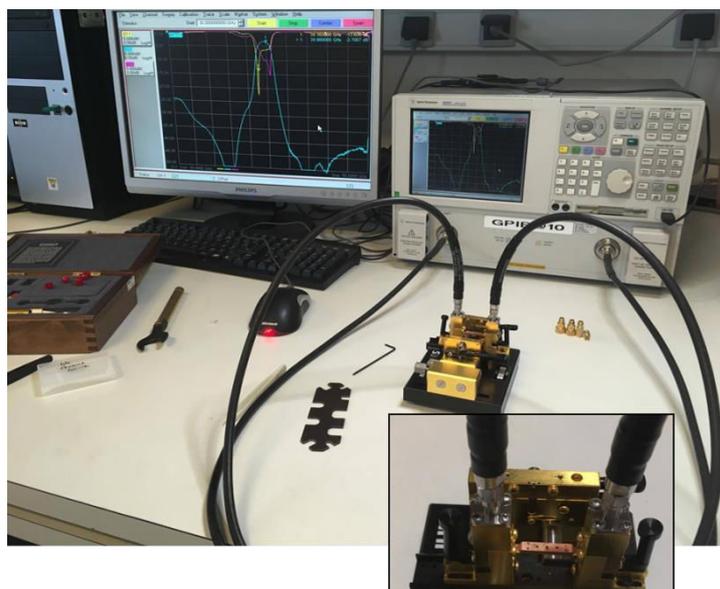


Figure III.139 : Dispositif utilisé pour la mesure des filtres COP.

La figure III.140 présente les mesures de trois filtres réalisés avec les trois procédés détaillés dans le chapitre II. Les réponses mesurées sont superposées à la réponse simulée avec les diamètres de perçage réalisables à l'aide de la micro-usineuse LPKF disponible à l'Open UBO Factory (cf. chapitre II). Pour le filtre C, nous avons rajouté de la laque d'argent sur les faces supérieure et inférieure afin d'améliorer l'état de la métallisation (Très mauvaise adhérence dans ce cas). Pour les différents filtres, nous notons une mauvaise adaptation bien qu'elle soit améliorée pour le filtre C. Cette désadaptation est principalement due à l'élargissement de la ligne d'accès, à la mauvaise définition des motifs d'accès, à la non-adhérence du métal au niveau de la ligne microruban et de l'entrée de la transition 3D. De nouveaux prototypes sont actuellement en cours de réalisation. Pour ces prototypes, le masquage ainsi que les étapes de métallisation doivent être optimisés afin d'obtenir des résultats plus exploitables.

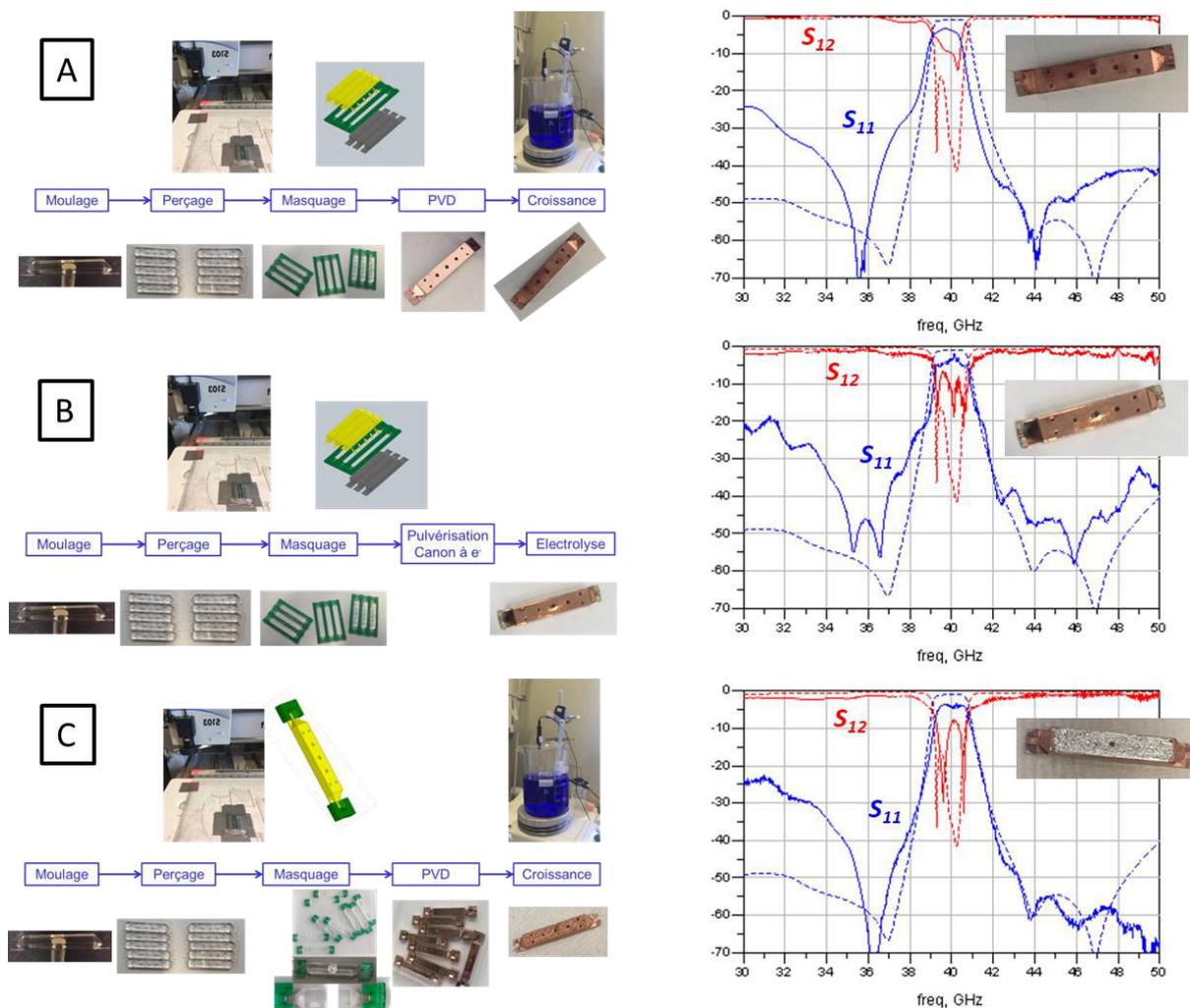


Figure III.140 : Résultats de mesure des filtres COP.

III.10. Conclusion

Ce chapitre, reprend les étapes de conception adoptées pour le développement des solutions de filtrage sur substrats d'alumine, de silice fondue et d'un polymère thermoplastique, le COP. Les résultats de mesure de différents prototypes réalisés sont également présentés à la fin de ce chapitre.

Une nouvelle transition 3D a été proposée afin d'offrir plus de flexibilité d'un point de vue compromis performance-intégrabilité. En effet, Nous avons pu démontrer que des substrats épais étaient à privilégier afin d'atteindre de meilleurs facteurs de qualité. Cette augmentation de l'épaisseur de substrat s'accompagne néanmoins de limitations d'un point de vue intégrabilité du filtre SIW entre deux *MIC* de $254 \mu m$ d'épaisseur. La transition proposée permet de pallier ce problème en assurant à la fois la transformation de mode et la jonction des épaisseurs entre le quasi-TEM au niveau de l'accès microruban gravé sur un substrat de $254 \mu m$ et le mode TE_{10} se propageant dans le SIW d'épaisseur plus importante.

Pour les structures en alumine et en silice fondue, le procédé d'ablation laser utilisé dans ce cas pour la mise en forme du substrat limite les épaisseurs de substrat à $635 \mu m$ et $500 \mu m$ respectivement. En simulation, le facteur de qualité est évalué dans ce cas à environ 600 pour les filtres bande Q.

Le moulage polymère, permet pour les structures en thermoplastique d'atteindre des épaisseurs plus importantes. Le filtre COP est simulé avec une épaisseur de substrat de $2 mm$ pour un facteur de qualité évalué à 1100. La limitation dans ce cas concerne la taille de la transition. En effet, en termes de pertes d'insertion nous ne gagnons pas plus de $0,5 dB$ par rapport aux solutions sur substrats d'alumine et de silice fondue. Ceci est dû au fait que pour le filtre COP la transition devient encombrante introduisant plus de pertes conductrices et de pertes diélectriques.

Les résultats de mesures des différents filtres proposés sont encourageants mais restent inexploitablement notamment afin d'en extraire le facteur de qualité.

Bibliographie du Chapitre III

- [1] *G.L Matthaei, L. Young, and E.M.T. Jones, « Design of Microwave Networks, Impedance Matching Networks, and Coupling Structures ». New York: McGraw-Hill, 1964.*
- [2] *N. Marcuvitz, Waveguide Handbook (IET), New York: McGraw-Hill, 1951.*
- [3] *D. Deslandes, "Design equations for tapered microstrip-to-Substrate Integrated Waveguide transitions," 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Anaheim, CA, 2010, pp. 704-707.*
- [4] *F. Alimenti, P. Mezzanotte, L. Roselli and R. Sorrentino, "Multi-wire Microstrip Interconnections: a Systematic Analysis for the Extraction of an Equivalent Circuit," 51st ARFTG Conference Digest, Baltimore, MD, USA, 1998, pp. 167-170.*
- [5] *Dean Nicholson and Hee Soo Lee, "Characterization and modeling of bond wires for high-frequency applications", Microwave Engineering Europe, August/September 2006.*
- [6] *Adrien Glise, « Application des Cyclo Oléfin Polymère & Copolymère (COP/COC) pour la mise en œuvre de microsystemes communicants autonomes et des capteurs associés », Thèse de doctorat, sous la direction d'Eric Rius, soutenue le 8 décembre 2015, Université de Bretagne Occidentale, Brest.*
- [7] *Y. Arbaoui et al. , "Full 3-D Printed Microwave Termination: A Simple and Low-Cost Solution," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 64, no. 1, pp. 271-278, Jan. 2016.*
- [8] *X. P. Chen and K. Wu, "Substrate Integrated Waveguide Filters: Practical Aspects and Design Considerations," in IEEE Microwave Magazine, vol. 15, no. 7, pp. 75-83, Nov.-Dec. 2014.*

Conclusion générale

&

Perspectives

Conclusion générale

Les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit visent à développer des solutions de filtrage innovantes pour les convertisseurs de fréquence type Q/V des nouvelles générations de satellites multimédia.

L'orientation vers la technologie SIW est justifiée à partir des éléments de l'état de l'art présentés dans le chapitre I. Les structures SIW présentent en effet le meilleur compromis performance – intégrabilité répondant aux problématiques des récepteurs à embarquer dans les futures charges utiles.

Afin d'augmenter le degré de flexibilité de ces structures pour un meilleur compromis intégrabilité - performance, une nouvelle transition 3D est présentée dans le chapitre III. Cette transition est utilisée pour assurer un meilleur report des filtres en alumine, silice fondue et thermoplastique COP sur une semelle où ils seront connectés à deux MIC de $254 \mu\text{m}$ d'épaisseur par câblage filaire de type « *bonding* ». Cette transition assure la jonction entre un accès microruban gravé sur un substrat de $254 \mu\text{m}$ et le cœur RF d'épaisseur plus importante évitant ainsi les effets parasites accompagnant le rallongement des fils de « *bonding* » ou encore l'élargissement de la ligne 50Ω à l'accès.

D'un point de vue technologique, il s'agit d'adopter des procédés de mise en forme de substrats 3D et d'adapter des procédés de métallisation existant à ce type de forme. Les étapes de réalisation des filtres développés dans cette thèse sont détaillées dans le chapitre II. L'ablation laser UV est utilisée pour le substrat alumine et silice fondue. La limitation de cette technique de mise en forme concerne les épaisseurs de substrat accessibles. Nous nous sommes donc limités à une épaisseur de $635 \mu\text{m}$ pour l'alumine et de $500 \mu\text{m}$ pour la silice fondue. Après optimisation des procédés de l'ablation laser, les solutions en alumine fabriquées par les sociétés TFP et μUL présentent des formes nettes et des motifs de métallisation propres. Les mesures faites sur ces filtres avaient trois problèmes majeurs, notamment un problème de longueur de fils utilisés lors du report des filtres et dont les effets n'étaient pas pris en compte lors de la conception. Ces résultats ne permettent donc pas de valider complètement les étapes de conception et de fabrication des filtres sur substrat d'alumine. D'autres campagnes de mesures et de fabrications sont prévues afin de s'affranchir de ces problèmes et d'avoir des résultats plus exploitables.

Lors des premiers essais de réalisabilité avec les substrats en silice, la longueur d'onde de 355 nm du laser UV utilisé à μ UL s'est avérée inadaptée causant des arrachements de matière non-maîtrisés lors de l'ablation. Les filtres SIW en silice n'ont malheureusement pas pu être fabriqués. L'IEMN à Lille dispose de la plateforme Equipex LEAF de l'IEMN, équipement avec lequel nous envisageons de faire des essais avec un laser dont la longueur d'onde est plus faible (environ 200 nm), mieux adaptée à la silice en raison d'une bande d'absorption à cette longueur d'onde. Ces essais sont actuellement en cours.

Le procédé de fabrication de la solution utilisant le polymère thermoplastique COP a été développé en interne au Lab-STICC en partant des étapes de moulage et de perçage pour ensuite considérer deux voies pour le masquage et la métallisation : PVD + autocatalyse (Lab-STICC) et PVD + électrolyse (IETR Rennes). Pour le perçage, il s'agit d'un perçage mécanique. Faute de flexibilité sur les diamètres des trous, les trous considérés ne permettent pas de répondre au gabarit de la mission type THD. Ces perçages permettent d'obtenir une bande passante de 3% alors que la bande passante attendue pour cette mission est de 2%. Les résultats de mesures pour ces filtres sont encourageants mais restent difficiles à exploiter. En effet, des problèmes de masquage, d'adhérence du métal et de définition du motif d'accès persistent, sans parler des incertitudes dues à la méthode de mesure. Un autre run est en cours. Dans ce dernier run des correctifs seront apportés aux différentes étapes posant problème.

Perspectives

Outre les améliorations à apporter aux problèmes de mesure (cas des filtres alumine) et aux procédés de fabrication (cas des filtres silice fondue et COP) qui constituent des objectifs à court-terme, ce travail ouvre les portes à d'autres problématiques :

- La transition 3D proposée permet d'avoir un meilleur compromis performance-intégrabilité pour les différentes solutions proposées (à différentes épaisseurs). En parallèle, des conceptions ont été faites sur du LTCC en intégrant cette transition. Pour toutes ces structures, les paramètres de la transition sont obtenus en utilisant l'outil d'optimisation du logiciel de simulation EM dépendamment de la structure à laquelle elle est dédiée. Il serait intéressant

d'élaborer un modèle mathématique tenant compte de tous les paramètres mis en jeu et permettant de généraliser son usage.

- Les filtres COP propose une alternative plus accessible et plus facilement reproductible que les solutions en alumine. De par le coût d'un moule, le procédé de moulage enlève des degrés de liberté sur les dimensions de la structure. Le perçage laser va permettre de réaliser des perçages plus précis afin de moduler la bande passante du filtre avec une fréquence centrale donnée et ainsi maximiser l'usage du moule. L'impression 3D peut être envisagée comme alternative afin d'avoir des pièces dont les dimensions restent flexibles surtout que ce procédés est actuellement en plein essor et va bientôt permettre de meilleures précisions de fabrication.
- Le COP présente une température de transition vitreuse de $138^{\circ} C$ ce qui le rend thermiquement stable en comparaison à d'autres polymères thermoplastiques. L'usage de polymères avec des températures de transition vitreuse plus importantes serait plus pertinent dans le cadre des applications spatiales. En revanche, ces polymères sont plus difficiles à mettre en forme. Un copolymère cyclo olefin (TOPAS 6017) présente une température de transition vitreuse de l'ordre de $170^{\circ}C$. Il peut être considéré dans un premier temps pour ouvrir la porte à d'autres essais avec des polymères qui seraient thermiquement plus stables.
- Le travail sur l'utilisation des absorbants afin de réduire les remontées parasites (évoqué p133-134) est à poursuivre.

Annexes

Annexe 1 : Repliement des filtres Alumine et Silice fondue

En plus du compromis performances – intégrabilité, les structures SIW profitent d’une flexibilité de conception avec des topologies permettant de réaliser des structures avec différentes formes. Afin de diminuer l’encombrement des différentes structures à reporter sur les circuits hybrides de la charge utile, Thales Alenia Space privilégie les formes carrées. Le repliement des filtres a été envisagé dans cette optique.

La figure 141 présente les différentes étapes de repliement du filtre 3D silice fondue. La figure 142 présente les réponses obtenues à chaque passage. La transformation $n^{\circ}1$ ramène les deux accès du filtre du même côté renforçant les couplages entre les lignes microruban et rehaussant le niveau des planchers parasites. L’introduction d’un plan métallique séparant les deux accès permet de diminuer le niveau des planchers parasites qui reste néanmoins très élevé. Afin de diminuer davantage ce couplage parasite, les accès sont par la suite mis en opposition (transformation $n^{\circ}2$).

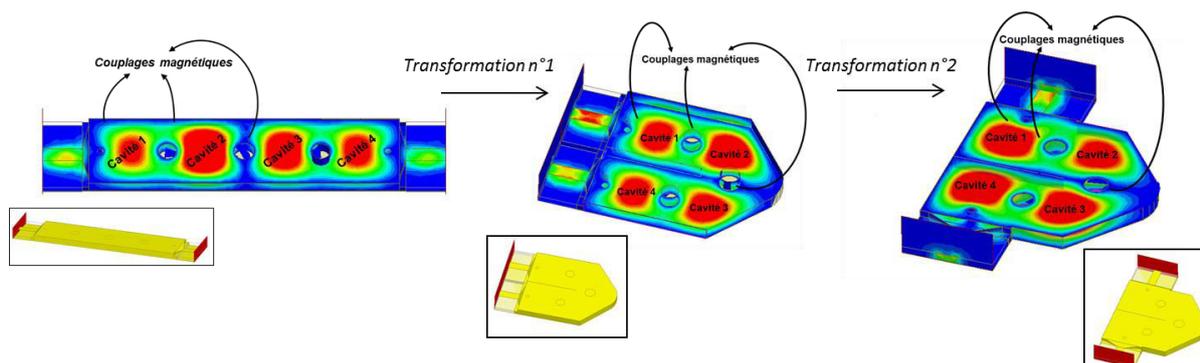


Figure 141 : Repliement du filtre 3D en silice fondue.

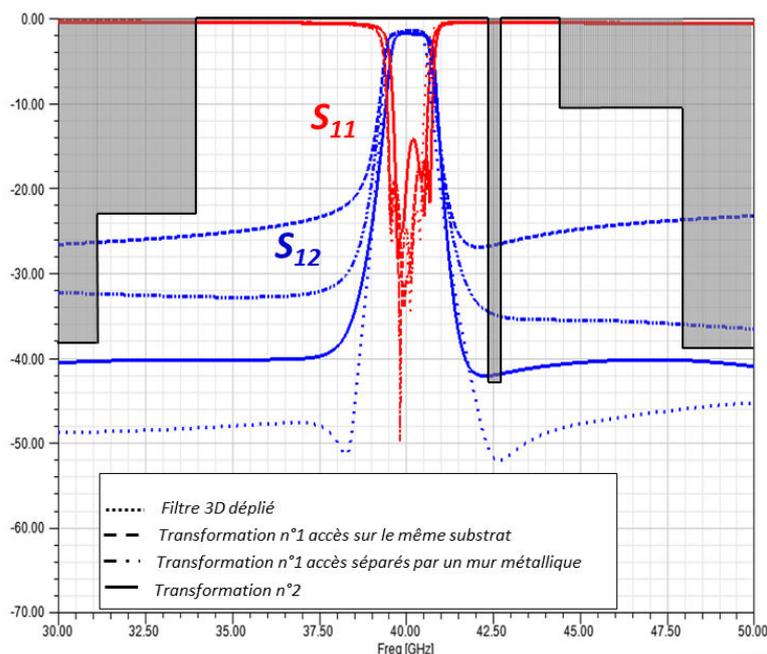


Figure 142 : Réponses des structures obtenues aux différentes étapes de repliement.

Les compartiments du filtre ainsi conçu sont séparés par un mur métallique. Cette configuration n'est pas réalisable. La séparation peut être faite par une rangée de vias métallisés ou encore par une rainure limitant les parasites pouvant être introduits par les vias (cf. figure 143). La forme finale se rapproche d'une forme carrée avec un rapport longueur par largeur égale à 1,5.

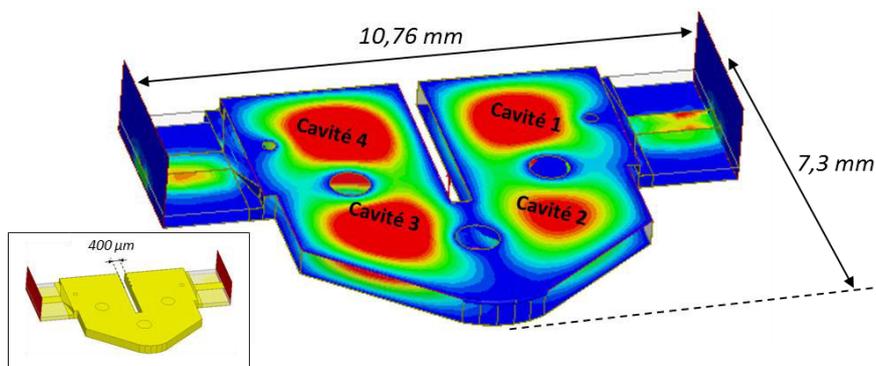


Figure 143 : Structure finale du filtre replié.

Les réponses des filtres repliés alumine et silice fondue sont comparées à celles des filtres dépliés initiaux. Le niveau d'adaptation des formes quasi-carrée est difficile à régler surtout pour les structures en alumine de petite taille. Dans ce cas, le triangle terminant la rainure permet de dévier une partie de l'énergie réfléchie sur les accès afin qu'elle se propage dans le guide grâce à quoi la spécification d'un niveau d'adaptation inférieur à 15 dB est respectée. Toujours dans le cas des filtres alumine, le repliement améliore les réjections et permet de respecter le gabarit de la mission type THD-sat (cf. figure 144).

Bien que présentant des rapports de forme intéressants, ces structures n'ont pas été validées par Thales Alenia Space pour des problèmes de standardisation et de motifs de collage pour le report. Ils sont par conséquent mis de côté. Un travail intéressant à poursuivre sur ces structure serait l'introduction de couplages électriques entre les cavités 1 et 4 afin de profiter de la flexibilité de la topologie et d'introduire des zéros de transmission améliorant les réjections.

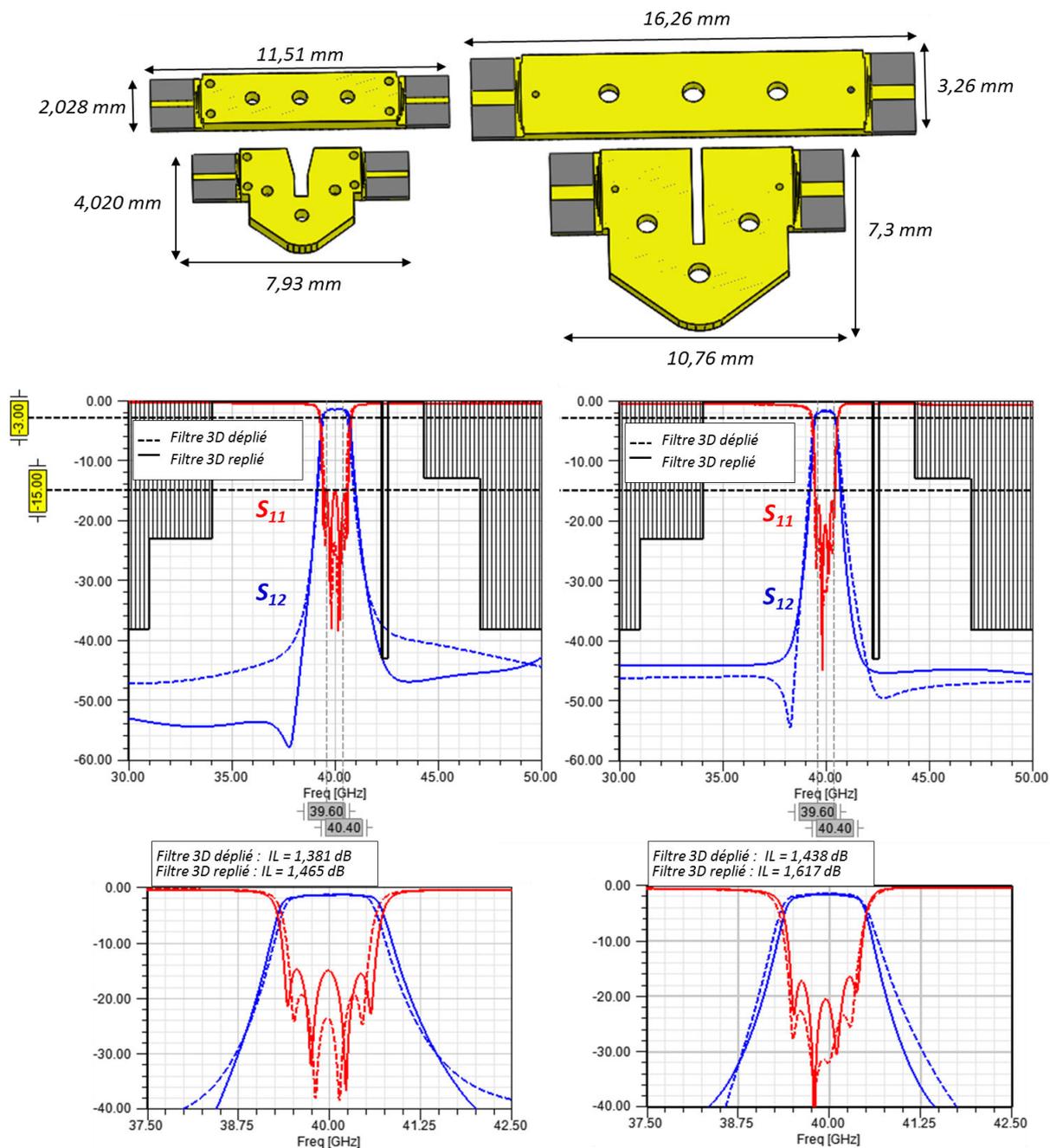


Figure 144 : Résultats de simulation des filtres 3D repliés en alumine et en silice fondue comparés à ceux des filtres 3D dépliés initiaux.

Annexe 2 : Solutions de post-réglages pour le filtre COP

Contrairement aux filtres sur substrats d'alumine et de silice fondue, les facteurs de qualité atteints par le filtre COP ainsi que sa taille permettent d'implémenter des solutions de post-réglage. On ne peut néanmoins pas introduire des solutions à base de vis de réglages comme dans le cas des structures volumiques. Le réglage dans ce cas se fait en gravant des motifs sur le métal au centre des cavités du filtre. Ce réglage n'est par conséquent pas réversible et doit être étudié avec attention avant d'être réalisé.

Les motifs de post-réglages étudiés dans ce paragraphe sont ceux de la figure 145. Les figures 146 et 147 présentent un exemple de décalage fréquentiel de 300 MHz assuré par la gravure des différents motifs proposés.

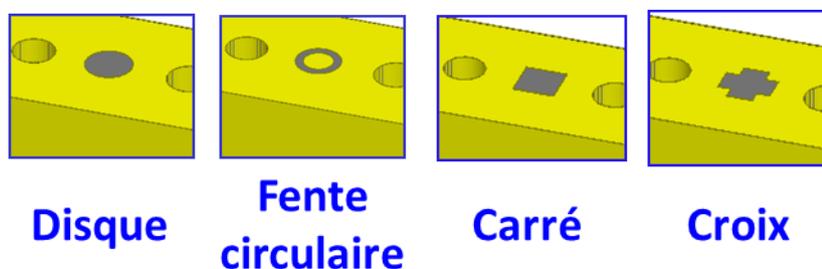


Figure 145 : Motifs de post-réglages.

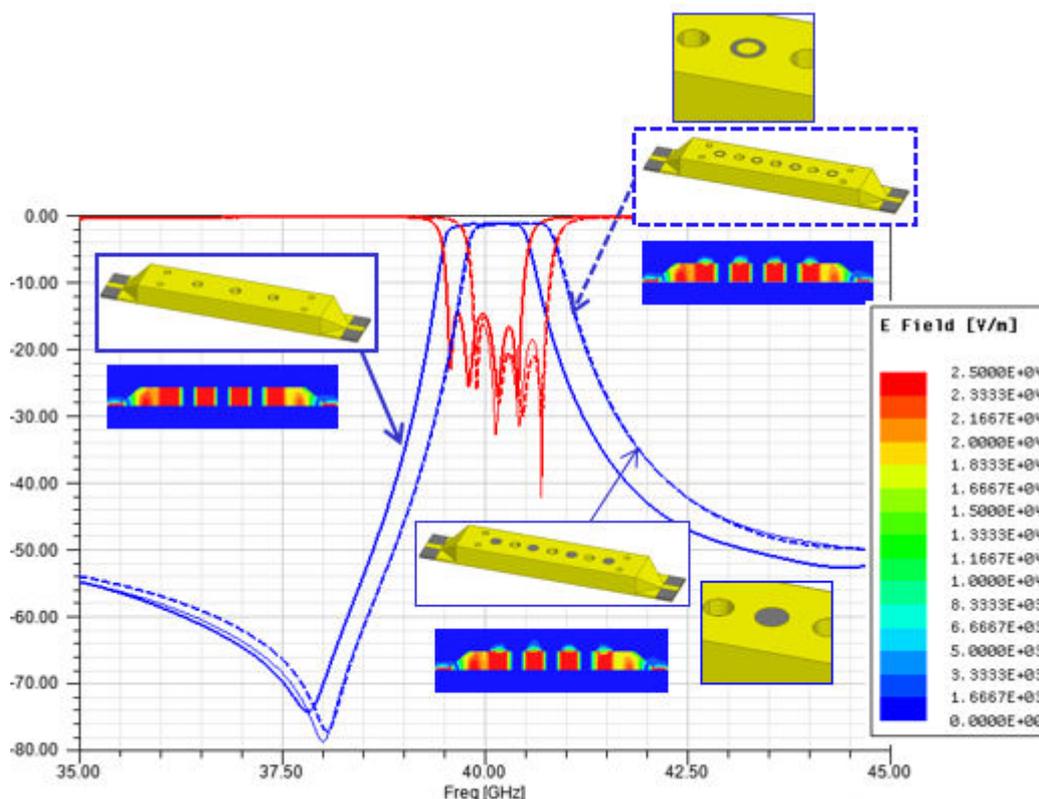


Figure 146 : Décalage fréquentiel de 300 MHz assuré par la gravure d'un disque et d'une fente circulaire.

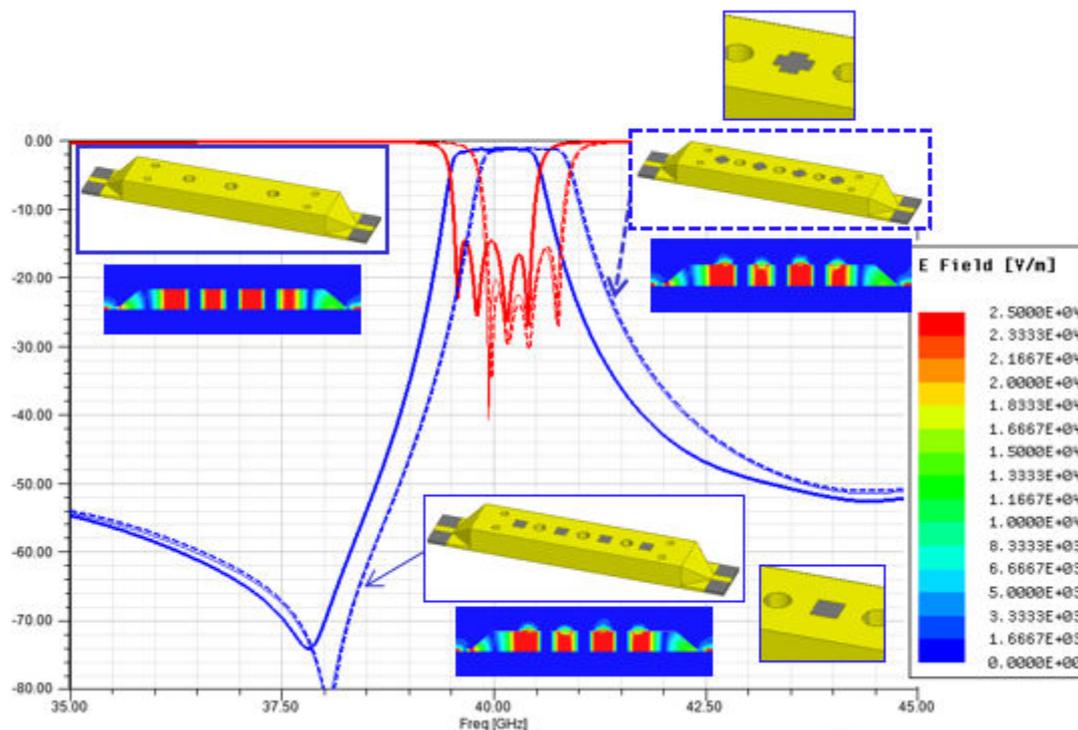


Figure 147 : Décalage fréquentiel de 300 MHz assuré par la gravure d'un carré et d'une croix.

Impact sur le facteur de qualité

Plus le décalage fréquentiel à corriger est important, plus la taille du motif est importante et plus le facteur de qualité des résonateurs est impacté. Les figures 149 et 150 et 151 tracent l'évolution du facteur de qualité et de la fréquence de résonance d'une cavité du filtre pour différentes dimensions des motifs de post-régalage. L'outil Eigenmode d'HFSS™ ne permettant pas la simulation de cavités ouvertes, le facteur de qualité est déterminé à partir d'une méthode de sous-couplage par transmission. En effet, les diamètres des trous métallisés sont surdimensionnés afin d'assurer un faible couplage, et l'espacement entre les trous est réglé, afin de recentrer la réponse sur la fréquence de résonance de la cavité initiale (cf. figure 148). Pour la cavité sous-couplée, on peut admettre le résultat de l'équation Eq 1.

$$Q_0 = Q_{ch} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad \text{Eq 1}$$

Q_{ch} : Facteur de qualité en charge de la cavité

f_1 et f_2 : fréquences de coupure à -3 dB.

Afin d'avoir un sous-couplage suffisant, il faut simuler la cavité fermée (sans motif) avec à la fois l'outil Eigenmode et la méthode explicitée plus haut. En comparant les valeurs de facteur de qualité obtenues, nous déterminons le sous-couplage nécessaire pour une bonne évaluation du facteur de qualité.

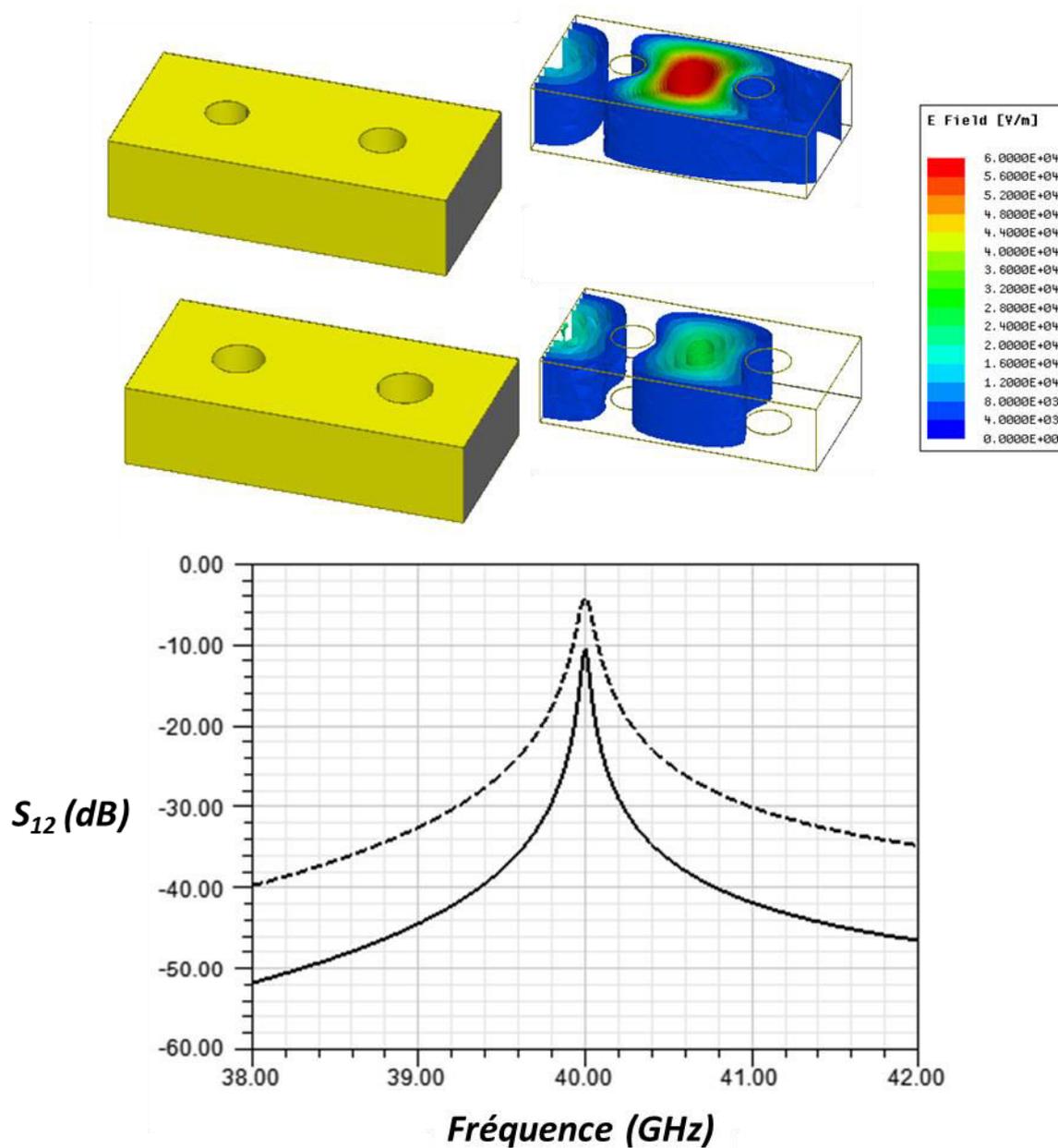


Figure 148 : Méthode de sous-couplage en transmission pour l'évaluation du facteur de qualité à vide.

Dans le cas du motif disque, un décalage fréquentiel de 3,75 % entraîne la division par deux du facteur de qualité. De la même manière, les évolutions des courbes avec fentes d'épaisseurs variables retracent les résultats obtenus avec le disque en offrant plus ou moins de flexibilité. Dans le cas du motif carré, le même décalage fréquentiel entraîne un moindre impact sur le facteur de qualité. De plus, la géométrie du motif autorise des décalages plus importants mais toujours avec plus d'impact sur le facteur de qualité.

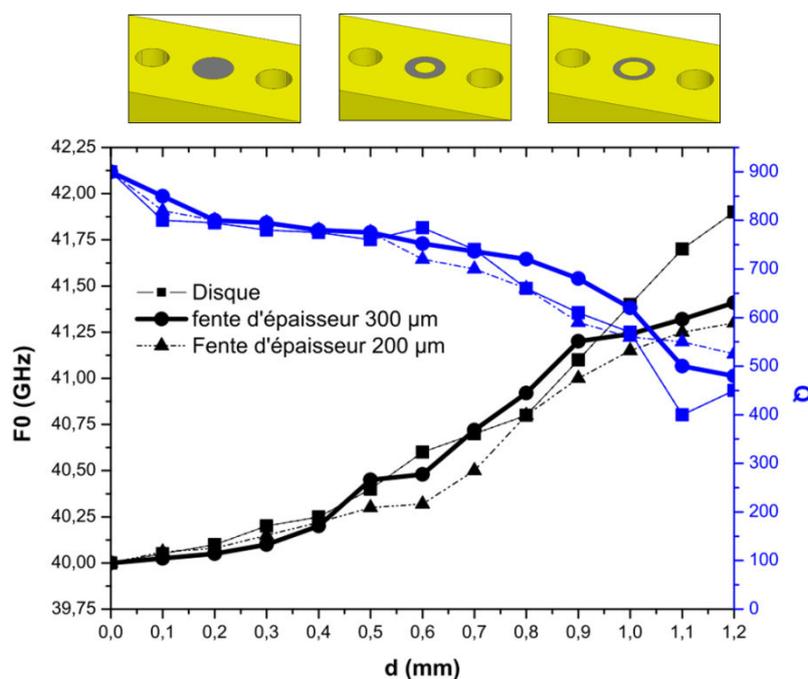


Figure 149 : Décalage fréquentiel et évolution du facteur de qualité en fonction du diamètre du motif de post-régalage : Disque circulaire et fentes.

Les solutions en croix dérivant de la solution du motif carré permettent des réglages plus sensibles que ceux obtenus par les solutions précédentes avec un impact similaire sur le facteur de qualité. La variation de la largeur du segment vertical permet une meilleure sensibilité de réglage que celle d'une variation de la largeur du segment horizontal. Néanmoins, pour une taille de croix importante, la variation de la largeur du segment horizontal permet d'obtenir un décalage fréquentiel plus important pour un même impact sur le facteur de qualité (cf. figure 153).

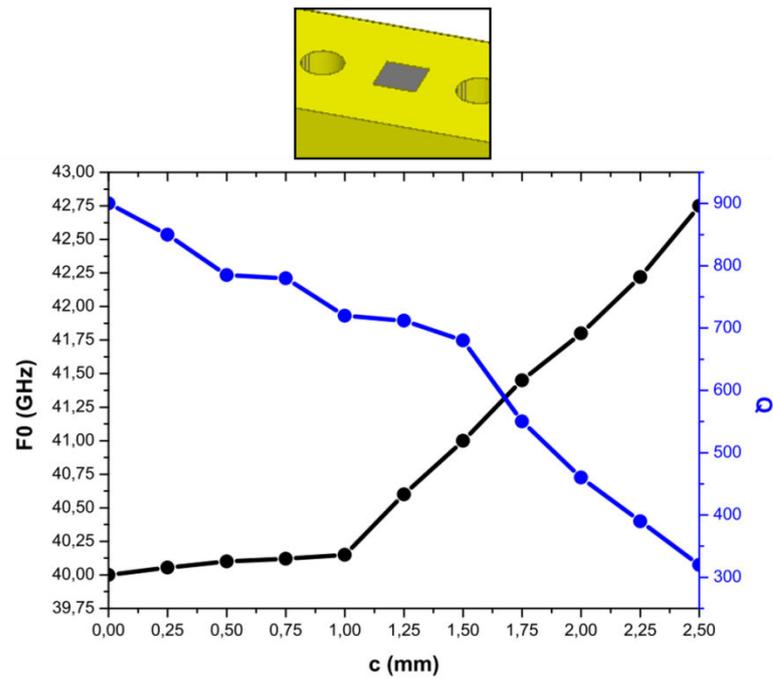


Figure 150 : Décalage fréquentiel et évolution du facteur de qualité en fonction du côté du motif de post-réglage carré.

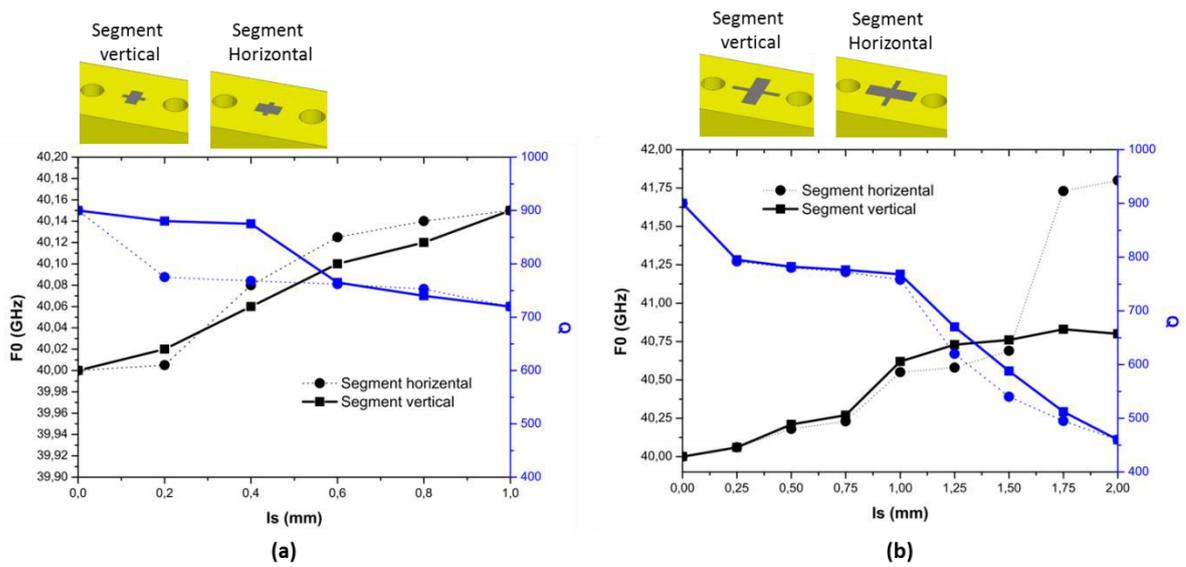


Figure 151 : Décalage fréquentiel et évolution du facteur de qualité en fonction de la largeur su segment horizontal ou vertical d'une croix de côté égal à 1mm (a) et à 2 mm (b).

Evaluation du rayonnement

Un autre problème accompagnant les solutions de post-réglage est le rayonnement qu'elles induisent. Afin d'évaluer les pertes dues au rayonnement, nous traçons pour différentes dimensions de disque et de carré le facteur de pertes pour des cavités avec et sans pertes. Dans le cas d'une cavité sans pertes, le facteur de pertes correspond uniquement aux pertes par rayonnement (cf. figure 152). Il est nul pour une cavité sans motif de post-réglage et devient de plus en plus important avec l'augmentation du décalage fréquentiel. Pour les larges dimensions de motifs (décalages fréquentiels importants), le facteur de pertes correspondant au rayonnement seul est plus important que celui obtenu en présence de pertes diélectriques et conductrices. Similairement à une antenne patch, le rayonnement s'améliore en l'absence de pertes pour les faibles permittivités de substrat (cf. figures 153 et 154).

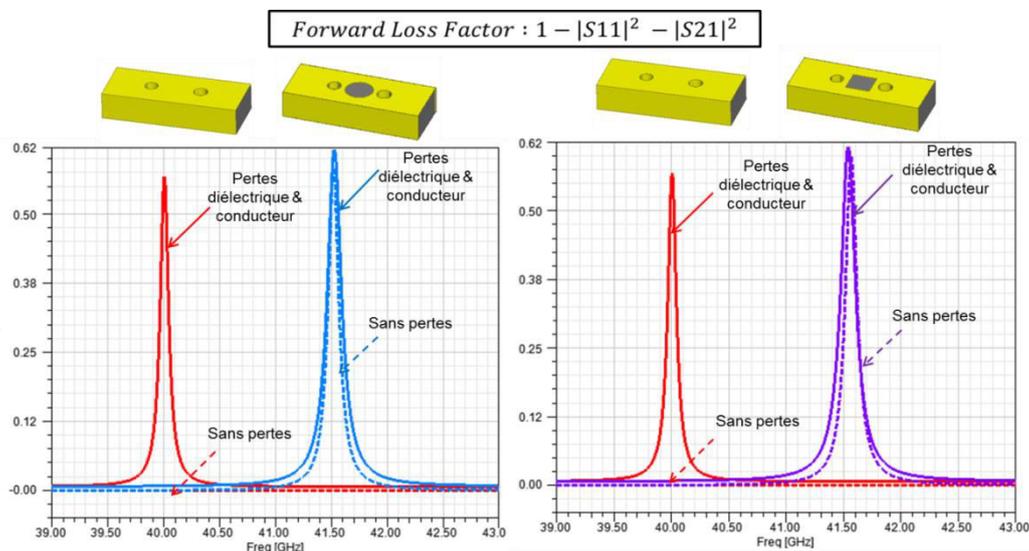


Figure 152 : Evaluation du facteur de pertes avec et sans pertes diélectriques et conductrices.

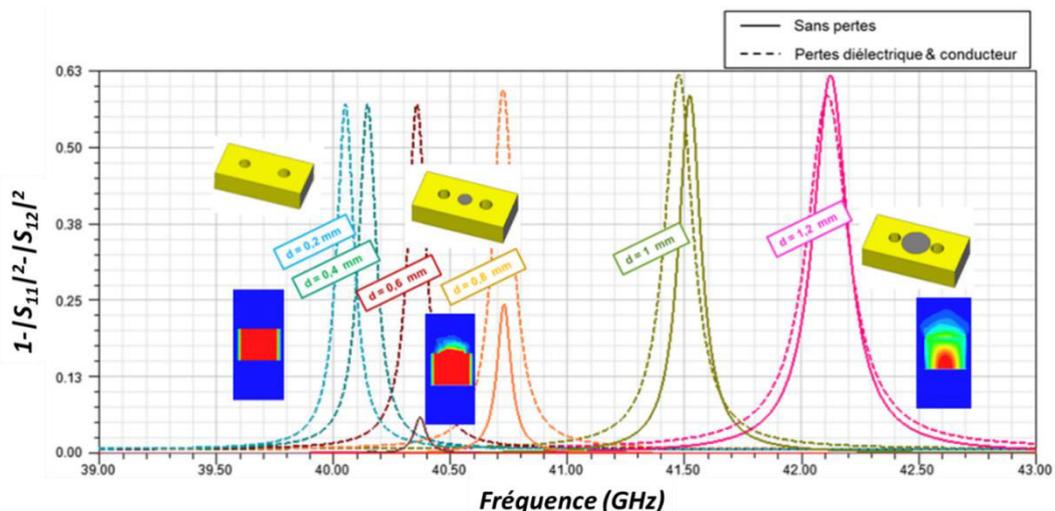


Figure 153 : Evaluation du rayonnement pour un décalage fréquentiel assuré par un motif en disque.

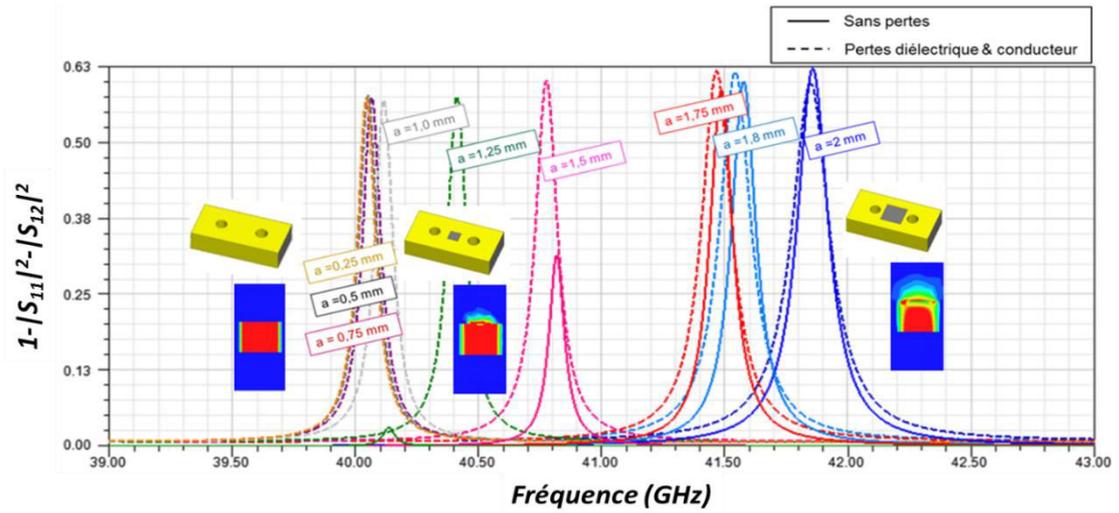


Figure 154 : Evaluation du rayonnement pour un décalage fréquentiel assuré par un motif en carré.

Solutions innovantes pour des filtres de fréquences volumiques et semi-volumiques performants, en céramique, silice fondue et thermoplastique COC /COP... Nouvelles alternatives pour les futurs programmes de satellite multimédia

L'émergence des satellites très haut débit pour la couverture des zones rurales s'accompagne de nombreuses contraintes technologiques. Dans le cadre du plan France très haut débit, le projet THD-sat proposé par le CNES se base sur l'utilisation des bandes Q et V pour assurer les liaisons avec les stations au sol et libérer de la ressource sur la bande Ka communément utilisée par les satellites ancienne génération. Avec la montée en fréquence, les besoins en termes de filtrage deviennent très stricts nécessitant des considérations particulières.

Le premier chapitre reprend le contexte de l'étude et expose les différents éléments permettant de justifier le choix de la technologie SIW qui profite à la fois des bons facteurs de qualité des modes volumiques se propageant dans le substrat et de l'aisance du procédé technologique et de l'intégration des structures planaires. Les performances des cavités SIW restent néanmoins intimement liées à l'épaisseur de substrat qui doit être augmentée pour atteindre de meilleurs facteurs de qualité. L'augmentation de l'épaisseur de substrat s'accompagne de deux principales limitations : le rallongement des fils de « bonding » utilisés pour le câblage du filtre à son environnement MIC d'épaisseur $254 \mu\text{m}$ et l'élargissement de la ligne d'accès 50Ω induisant des problèmes de discontinuités et d'excitations de modes parasites. L'approche suivie consiste à considérer des formes 3D permettant l'adaptation de mode et d'épaisseur entre une ligne microruban sur substrat de $254 \mu\text{m}$ d'épaisseur et le SIW d'épaisseur plus importante. Une nouvelle transition 3D est dès lors imaginée.

Le chapitre II reprend les différents procédés technologiques utilisés pour la mise en forme et la métallisation des substrats 3D. Les substrats considérés sont l'alumine et la silice fondue mis en forme par ablation laser et le thermoplastique COP mis en forme par moulage. La principale limitation de l'ablation laser concerne les épaisseurs de substrat accessibles. Nous nous limitons à $635 \mu\text{m}$ dans le cas de l'alumine et à $500 \mu\text{m}$ dans le cas de la silice fondue. Le moulage polymère permet de s'affranchir de cette limitation et de viser des substrats plus épais (2mm pour la solution COP).

Le chapitre III reprend les étapes de conception des différentes solutions de filtrage avec la nouvelle transition 3D. Des résultats de mesures de différents prototypes réalisés sont par ailleurs présentés. Ces résultats sont globalement encourageants mais nécessitent d'être davantage développés pour être mieux exploitables.

Mots clés : Satellite multimédia, Filtre RF, Bande millimétrique, technologie SIW, Intégration hybride, transition 3D, Ablation laser, Moulage polymère, dépôt de couches minces.

*Innovative solutions for efficient SIW & 3D frequency filters, on ceramic, fused silica and Cyclo Olefine COC/COP...
New alternatives for future multimedia Satellites programs*

The emergence of satellite high-speed internet for the coverage of rural zones is accompanied by numerous technological constraints. The current trend is to use higher frequency bands to release the satellite capacity for users. The increasing frequency requires new considerations especially for filtering needs which become notably strict in terms of performance and integration in small integrated circuits. This work introduces filtering solutions based on high quality factor Substrate Integrated Waveguides (SIW) using a novel 3D transition for a better integration in widely planar Hybrid ICs.

The first chapter introduces the study's context and the different elements justifying the use of the SIW technology. In fact, these structures profit from both the good quality factors of TE-modes propagating in the substrate and the easy fabrication process and integration of planar circuits. However, to increase the SIW quality factor, the substrate's height should be increased which induces interconnection limitations such as long bond wires with high parasitic effects and large microstrip access lines with discontinuity problems and the propagation of parasitic modes. The adopted approach consists in imagining 3D shapes providing both mode and thickness matching between a microstrip line etched on a thin substrate and a high substrate SIW.

The second chapter introduces the different manufacturing processes used for the substrate's shaping and metallization. Three substrates are considered: Alumina, fused Silica and Cyclo Olefin Polymer COC. Alumina is widely used in space applications and has a well-mastered process. For equivalent dielectric losses, fused silica has a lower permittivity for bigger structures with less manufacturing tolerance sensitivity. Both Alumina and fused silica substrates are shaped using a laser ablation. The reachable substrate's height using this machining method is relatively low. The polymer solution (COP) is elaborated using a molding process allowing higher substrates heights.

The last chapter outlines the design steps of the different solutions and the measurement results of the first prototypes. These results are on the whole encouraging but require further development.

Keywords : Satellite telecommunication, RF Filter, Millimeterwave, SIW technology, Hybrid integration, 3D transition, Laser ablation, Molding, thin film deposition.